

Mag-Bio 186/02

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM

Inscrit Sous le N°	4872
Date de	
Cours	18-10-10

N° d'ordre : 18/DST/10

**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

BOUREK Rachida

MODELISATION PLUIE – DEBIT.

APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA MACTAA (NW ALGERIEN)

Soutenu le 06 /10/ 2010 devant les membres du jury :

Mr Mustapha BENSALAH	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr Abderrazak BOUANANI	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mme Leila MEBROUK	Maître de conférences A	Univ. Oran	Examinat
Mr Abdesselam MEGNOUNIF	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Invité
Mme Kamila BABA-HAMED	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Invité

DEDICACE

J'ai une pensée particulière à ceux et celles qui me sont très chers (es)

A mes chers parents

A la mémoire de ma sœur

A mon frère

Et à toute ma famille

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

REMERCIEMENTS

Je remercie notre Bon Dieu le Tout Puissant de m'avoir guidé, aidé et donné la foi et le courage pour accomplir ce travail.

J'exprime ma plus vive gratitude à Monsieur A .BOUANANI, mon encadreur, pour sa disponibilité, son soutien sans réserve et surtout ses qualités humaines.

J'adresse, mes sincères remerciements à Monsieur M. BENSALAH d'avoir bien voulu présider le jury et également mes remerciements à Madame L.MEBROUK et Monsieur A. MEGNOUNIF pour avoir accepté d'examiner ce travail et qui m'ont fait l'honneur de le juger.

Au même titre, j'adresse ma vive reconnaissance à Madame K. BABA-HAMED qui a accepté notre invitation.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à me faciliter la réalisation de ce travail. Je pense tout particulièrement à Monsieur le Directeur de l'A.N.R.H d'Oran qui a accepté volontiers de me fournir les documents que je convoitais.

Je n'oublierai pas Monsieur M. KASSOURI, Chef des projets systèmes (D S I) SEOR pour l'aide précieuse qu'il m'a offerte.

Enfin que tous mes enseignants y trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

ملخص

دراسة العلاقة بين المطر و التدفق، السنوية و الشهرية الممتدة على مدى 25 سنة، على مستوى الثلاث محطات: الحسيبة ، سيدي علي بن يوب و سيدي بلعباس. هذه المحطات موزعة من أعلى إلى أسفل حوض "مكرة" و الذي مساحته 4102 كلم².

النتائج المحصل عليها من دراسة تحول المطر إلى التدفق باستعمال نموذج GR1A و GR2A تظهر أن النموذجين ذات الخزانين أثبتا النجاعة من النموذج نوع "العلبة السوداء".
و بالفعل ، النموذج GR يأخذ بعين الاعتبار التسلسل الزمني للظواهر من جهة و ضغوط العوامل المناخية (التبخّر) و كذا العوامل "الفيزيويديروجيولوجيا" للحوض من جهة أخرى (رطوبة التربة و التبادلات الخارجية) .

الكلمات المفتاحية: المطر ، التدفق ، الحسيبة ، سيدي علي بن يوب ، سيدس بلعباس ، واد مكرة ، GR1A و GR2A السنوية و الشهرية

RESUME

L'étude de la relation pluie – débit à l'échelle annuelle et mensuelle au niveau du bassin de la Mekerra est basée sur une série de données, relative à une période de 25 ans et mesurées aux trois stations : El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes.

Ces stations sont réparties de l'amont à l'aval du bassin versant de la Mekerra dont la superficie est de 4102 km².

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation du modèle du Génie Rural GR1A et GR2M indiquent que les modèles « à réservoirs » sont plus satisfaisants qu'un modèle de type « boîte noire ». 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 :

Pluie –Débit, El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub, Sidi Bel Abbes, bassin versant, Mekerra, GR1A, GR2M.

ABSTRACT

The rainfall-discharge relationship on an annual and monthly scale was based on climate data series for a period of 25 years corresponding of three stations: El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub and Sidi Bel Abbes. These stations are situated in the basin for Mekerra river in which the area is 4102 km².

The result obtained for simulating the transformation of rainfall into runoff by using the model of « Genie Rural » GR1A and GR2M indicates that storage-type models are far better than a simple 'black box' model in which the geological aspect and temporal chronology and effect soil moisture and the evapotranspiration parameters are taken in the account.

Key Words:

Rainfall-discharge, El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub, Sidi Bel Abbes, basin, Mekerra, GR1A, GR2M.

SOMMAIRE

Introduction générale	10
Chapitre I : modélisation hydrologique.....	12
I.1-Introduction	13
I.2-Objet de l'hydrologie	13
I.3-Le système bassin versant.....	14
I.3.1-Définition du bassin versant	14
I.3.2- Approches de représentation du bassin versant.....	15
I.4-Modélisation hydrologique.....	16
I.4.1- Définitions générales.....	16
I.4.2- Objectifs de la modélisation... ..	17
I.4.3- Etapes d'élaboration d'un modèle	18
I.4.4 Classification des modèles.....	19
I.4.4.1- Modèle conceptuel.....	19
I.4.4.2- Modèle à bases physiques.....	19
I.4.4.3- Modèle global.....	20
I.4.4.4- Modèle distribué.....	20
I.4.4.5- Modèle analytique.....	20
I.4.4.6- Modèle stochastique.....	20
I.4.4.7- Modèle déterministe.....	20
I.4.4.8- Modèle mécaniste.....	20
I.4.5- Critères d'évaluation de la modélisation.....	21
I.4.5.2 -Erreur quadratique moyenne.....	21
I.4.5.3 -Coefficient de Nash.....	21
I.5- Présentation de quelques modèles.....	21
I.5.1- GIBSI.....	21
I.5.2- MIKE SHE.....	22
I.5.3- WATER WARE.....	23
I.5.4- CEQUEAU.....	23
I.5.5- TOPMODEL.....	25
I.5.6- AGRIFLUX.....	26
I.5.7-Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR).....	28
I.5.7.1- Introduction.....	28
I.5.7.1.1- Objectifs de développement	28
I.5.7.1.2- Mode de développement.....	28

I.5.7.1.3- Principales caractéristiques.....	29
I.5.7.2- Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	30
I.5.7.2.1- Introduction.....	30
I.5.7.2.2-Description mathématique.....	30
I.5.7.2.3- Paramètre.....	30
I.5.7.3- Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	31
I.5.7.3.1- Introduction.....	31
I.5.7.3.2-Description mathématique.....	31
I.5.7.3.3-Paramètres.....	33
I.5.7.4- Conclusions et perspectives.....	34
Chapitre II: Présentation du Bassin Versant de l'oued Mekerra.....	35
II.1-Présentation générale du bassin versant Macta.....	36
II.2-Présentation du bassin versant de l'oued Mekerra.....	37
II.2.1-Etude morphométrique.....	39
II.2.1.1 Caractéristique de forme	39
a-Indice de compacité de Gravilius (K_c).....	39
b-Rectangle équivalent	39
II.2.1.2-Etude du relief.....	39
a-Courbe hypsométrique.....	39
b- Les altitudes.....	40
c- Indices de pente et relief.....	41
II.2.2-Caractéristique climatique.....	42
II.2.2.1-Température de l'air.....	43
II.2.2.2-Evaporation	45
II.2.2.3-Evapotranspiration potentielle	45
II.2.2.4-Végétation	46
II.2.2.5-Pédologie	46
II.2.3- Réseau hydrographique	46
II.2.4-Aperçue géologique et hydrogéologique.....	47
II.2.4.1-Cadre géologique régional.....	47
II.2.4.2-Contexte géographique et morphologique de la zone d'étude.....	48
II.2.4.3 Cadre géologique de la plaine de Sidi Bel Abbés.....	49
II.2.4.4-La série stratigraphique.....	50

✚ Le Quaternaire.....	50
✚ Le Cénozoïque.....	50
✚ Le Mésozoïque.....	51
II.3.4.5-Tectonique	52
II.3.4.6-Contexte hydrogéologique.....	53
II.3.4.7-Hydrodynamisme de la nappe de la plaine alluviale de Sidi Bel Abbés.....	55
Chapitre III : Etude des paramètres Hydrologiques du Bassin Versant de l'oued Mekerra...	56
III.1-Introduction.....	57
III.2-Etude des précipitations	57
III.2.1-Variations annuelles des précipitations.....	59
III.2.2- Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité.....	60
III.2. 3-Variations mensuelles des précipitations	61
III.2. 4-Variations saisonnières des précipitations	62
III.3-Etude des écoulements	63
III.3.1-Variations annuelles des écoulements.....	64
III.3.2- Ajustement des débits annuels à une loi de probabilité.....	64
III.3.3-Variations mensuelles des lames d'eau écoulées.....	65
III.3.4-Variations saisonnières de débit	66
III.4-Evapotranspiration	67
III.4.1-Evapotranspiration réelle ETR	67
III.4.2- Evapotranspiration potentielle ETP	67
III.4.3- La formule de Turc.....	67
III.4.4-La formule de Thornthwaite.....	68
CHAPITRE IV: Modélisation Pluie-Débit dans Bassin Versant de la Mekerra.....	69
IV.1-Modélisation par corrélation.....	70
IV.1.1-Corrélation annuelle.....	70
IV.1.2-Corrélation mensuelle.....	74
IV.2-Modélisation de la relation pluie-débit par l'utilisation du modèle GR	78
IV.2.1- Modélisation de la relation pluie-débit par le modèle annuel GR1A.....	78
IV. 3.2- Modélisation de la relation pluie-débit par le modèle mensuel GR2M.....	82
Conclusion.....	89
Références bibliographiques.....	92
Annexes	96
Liste des tableaux.....	115
Liste des figures.....	116

INTRODUCTION

L'eau, une des plus importants ressources naturelles, doit être protégée de manière à garantir de façon durable son équilibre entre les besoins et les utilisations.

Le développement durable des activités humaines s'appuie, en particulier, sur une gestion intégrée des eaux. Une gestion efficace et durable des eaux ne se limite pas à garantir, en moyenne, une quantité et une qualité suffisantes pour les demandes humaines (eau potable, industrielle, d'irrigation,...).

La simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des modèles mathématiques a connu un fort essor depuis le début des années 60 grâce notamment à l'accroissement des capacités de calcul. Il existe aujourd'hui un grand nombre de modèles, parmi lesquels on trouve les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui représentent le lien entre la pluie et le débit par des agencements variés de réservoirs. Dans la représentation de la transformation pluie-débit, l'évapotranspiration représente un terme climatique majeur et devrait donc jouer un rôle essentiel.

Notre travail de recherche s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit et de sa représentation à l'échelle annuelle et mensuelle du bassin versant de Mekerra. Notre objectif principal est d'apprécier le fonctionnement d'un modèle de simulation des débits, celui du Génie Rural (GR1A, GR2M).

Ce travail est découpé en quatre chapitres distincts :

Dans le premier chapitre, nous entamons la modélisation hydrologique où nous présentons les modèles hydrologiques les plus utilisés ainsi que des logiciels les plus courants.

Au chapitre 2, nous donnons une présentation du bassin de l'oued Mekerra, il s'agit :

- La situation géographique,
- Le contexte climatique,
- Le contexte géologique.

Dans le chapitre 3, nous réalisons une étude des paramètres hydrologiques du bassin versant de l'oued Mekerra.

Pour cela nous utilisons des données des précipitations, des débits et des évapotranspirations des trois stations répartis de l'amont vers l'aval: El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbés.

Enfin, dans le chapitre 4, nous effectuons une modélisation Pluie –Débit dans le bassin versant de la Mekerra, il s'agit de :

- Modélisation par corrélation,
- Modélisation par l'utilisation du modèle Génie Rural (GR).

CHAPITRE I

MODELISATION HYDROLOGIQUE

I.1-Introduction :

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique.

I.2-Objets de l'hydrologie :

Il est assez difficile de définir l'hydrologie car ce n'est pas une science unifiée. Etymologiquement "science qui traite des eaux", la définition change d'une époque ou d'un hydrologue à l'autre. 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. Le sujet d'intérêt fondamental de l'hydrologie est le cycle de l'eau, (Figure 1). Dooge (1988 ; In Perrin, 2000) mentionne que 'l'affaire de l'hydrologie est de résoudre l'équation du bilan de l'eau.

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.

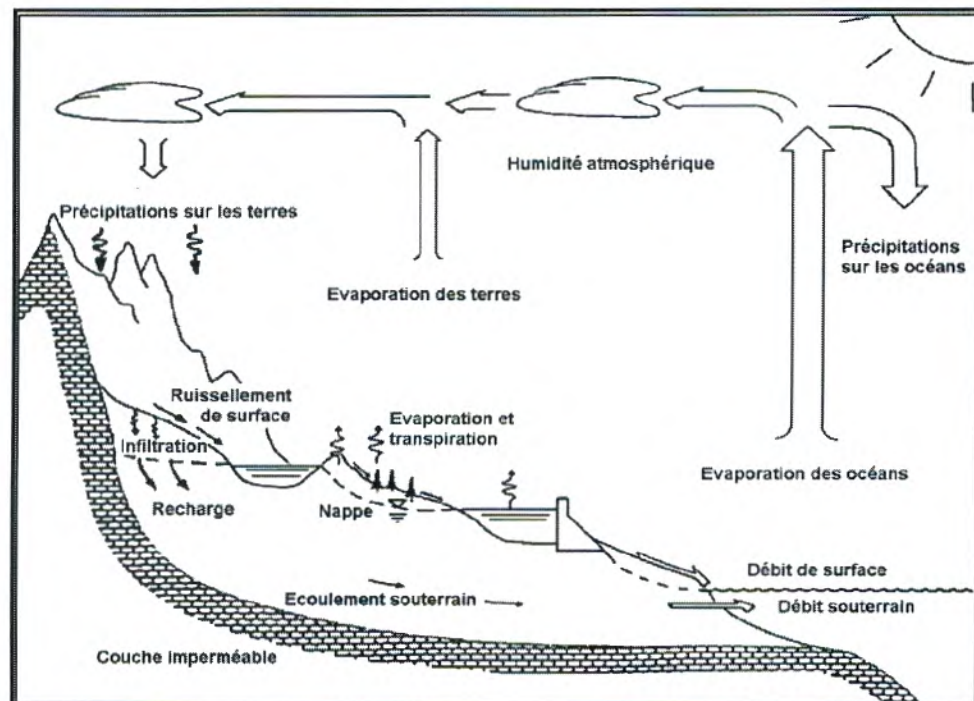


Figure 1: Le cycle hydrologique (d'après Maidment, 1992)

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.

Donc 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. La variabilité de cette ressource dans le temps est source de multiples problèmes de gestion, auxquels l'hydrologie peut contribuer à apporter des solutions (Michel, 1989; In Perrin, 2000).

I.3-Le système bassin versant :

I.3.1- Définition du bassin versant :

Le bassin versant en un point, ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau, représente la totalité de la surface topographique et géologique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Le bassin versant est un des objets d'étude de base en hydrologie. Il est considéré comme une unité fonctionnelle d'étude des flux d'eau, de matière et d'énergie.

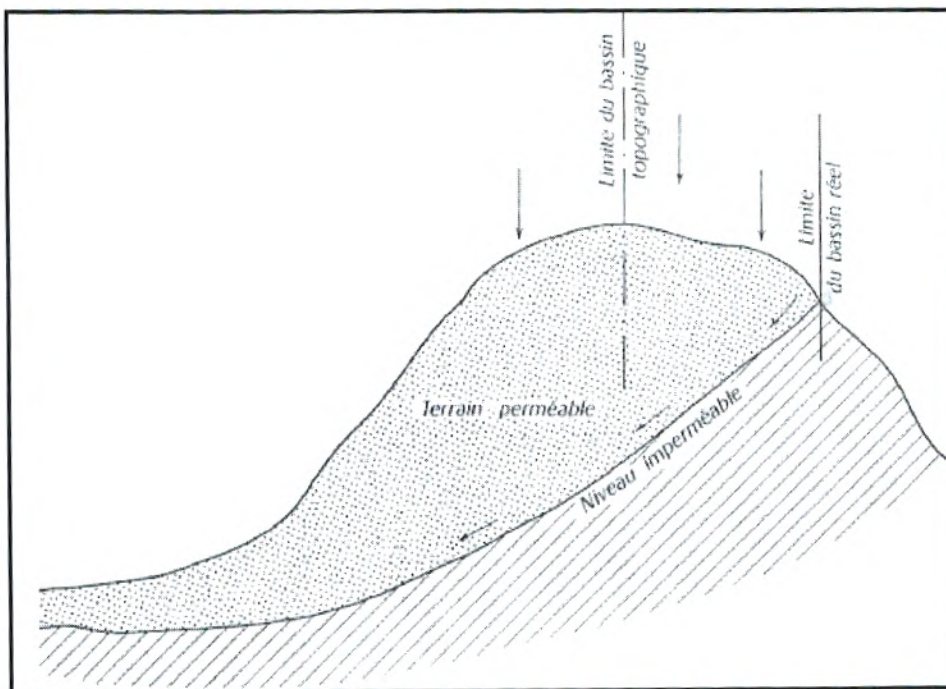


Figure 2 : Frontières d'un bassin versant (Roche, 1963) :

Différenciation du bassin versant topographique et du bassin versant hydrogéologique.

Ainsi, les bassins versants représentent une infinie diversité de tailles, de formes et de caractéristiques, allant des petits bassins versants (quelques hectares) à ceux de quelques millions de km² (Volga, Nil, Mississipi, Amazone, ...).

I.3.2- Approches de représentation du bassin versant :

Pour étudier les processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant, l'approche systémique est couramment utilisée. Selon Dooge (1973; In Mathevet ,2005) « un système est n'importe quel structure, dispositif, schéma ou procédure, réel ou abstrait, qui met en relation, dans une base de temps donnée, une entrée, une cause, ou un stimulus de matière, d'énergie ou d'information, et une sortie, un effet ou une réponse, de matière, d'énergie ou d'information».

Ainsi, le bassin versant peut être considéré comme un système, qui est principalement caractérisé par :

- sa géométrie, sa composition et ses limites,
- ses entrées et ses sorties,
- ses conditions initiales et aux limites,
- ses états internes.

La diversité des bassins versants est infinie et les processus hydrologiques à l'origine des flux en leur sein sont également très nombreux et spécifiques à chaque bassin versant. Quelles que soient la taille d'un bassin versant et les échelles spatiales et temporelles auxquelles on souhaite étudier un tel objet, la connaissance de toutes les composantes du système 'Bassin Versant' est en pratique impossible.

De plus, des incertitudes difficilement quantifiables résident dans la mesure et la représentativité de certaines des caractéristiques de ce système.

A l'échelle du bassin versant, le bilan d'eau peut s'exprimer de la manière suivante :

$$P = Q + ETR \pm \Delta S \pm L$$

où, P est la pluie reçue, Q est le débit (jaugé) à l'exutoire, ETR est l'évapotranspiration réelle, ΔS est la variation de stock d'eau et L représente les échanges non atmosphériques avec l'extérieur du système.

A l'heure actuelle, il est seulement possible de mesurer la pluie reçue et le débit. L'évapotranspiration réelle est très difficilement mesurable à l'échelle du bassin versant. Elle est plutôt estimée à partir d'un modèle d'évapotranspiration potentielle (ETP). La variation de stock et les pertes du bassin versant ne sont pas mesurables non plus et sont souvent abusivement négligées (Moine, 2005; In Mathevet ,2005). La conséquence de ces problèmes de mesure est qu'il est souvent difficile de boucler le bilan d'eau à l'échelle du bassin versant (Beven, 2001b; In Mathevet ,2005). Néanmoins, il n'y a aucune raison pour considérer que le bassin versant est un

système fermé par le bas, dont le bilan se limite à $P = Q + ETR + \Delta S$ (Mouelhi, 2003). Cette hypothèse a une forte influence sur les structures et les fonctions des modèles hydrologiques.

En caricaturant légèrement cette situation, l'étude des processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant est quelque chose d'assez extraordinaire, étant données toutes les incertitudes associées à cette pratique et la difficulté à appréhender cet objet :

- ses limites sont globalement mal connues, la majeure partie des phénomènes qui s'y passent est souterraine ;
- la pluie est mesurée en quelques points du bassin versant par des pluviomètres ;
- l'évapotranspiration réelle n'est pas mesurée ;
- les débits extrêmes que l'on essaye souvent de simuler ou de prévoir, sont généralement connus avec une forte incertitude.

I.4-Modélisation hydrologique :

I.4.1- Définitions générales :

Pour comprendre la notion d'un modèle hydrologique, il est indispensable de connaître l'ensemble d'éléments qui le constituent. Comme il a été présenté par Bonn (2003 ; In Boudhraa ,2007) un modèle est une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. On distingue quatre types de variables qui existent en totalité ou en partie dans chaque modèle (Figure 3).

- Variables d'entrées : Le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et /ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques 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, profondeur 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).

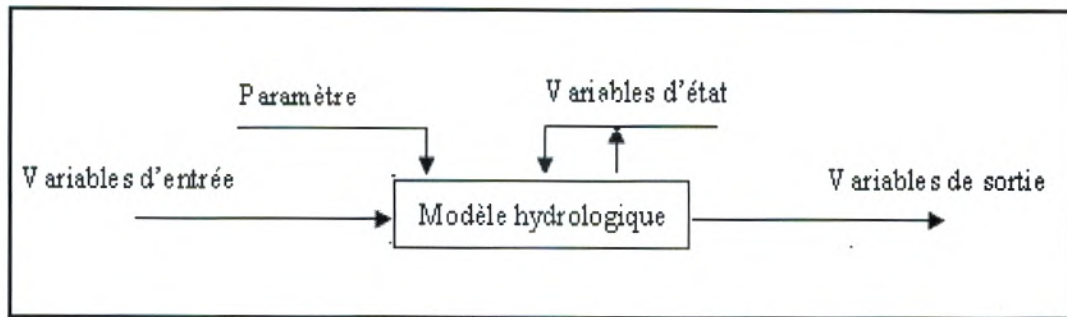


Figure 3: Les variables d'un modèle hydrologique (Gaume, 2002).

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 (Figure 4)

- 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 atteint le sol et celui où elle rejoint le cours d'eau (Morin, 1991; In Boudhraa, 2007). Elle exprime la transformation de la pluie brute en pluie nette, définie 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.

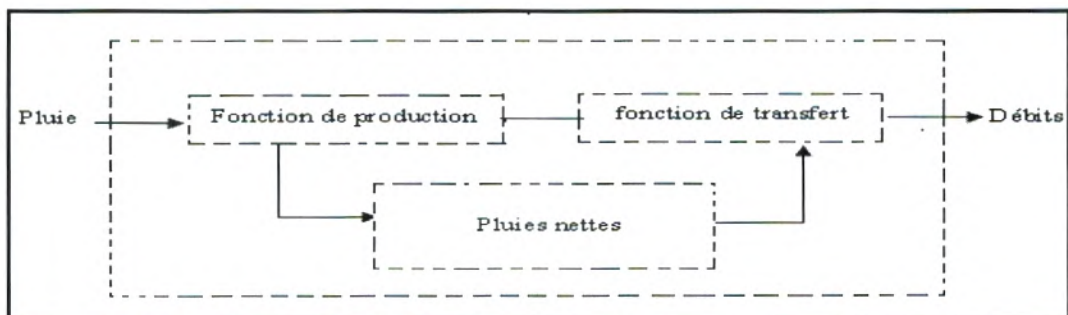


Figure 4: Schéma d'un modèle hydrologique

I.4.2- Objectifs de la modélisation :

La représentation d'un système physique par un modèle mathématique, est une démarche courante qui, en hydrologie, vise à répondre à l'un des objectifs suivants (Wery, 1990 ; In Boudhraa, 2007) :

- La prévision : Grâce à la mesure en temps réel des variables ou signaux d'entrée, il est possible d'évaluer les futures débits à l'exutoire d'un bassin versant.

- La simulation: C'est l'analyse du comportement du système pour un signal particulier (par exemple pour une averse exceptionnelle). Dans ce cas, les mesures antérieures du débit ne sont pas disponibles et sont remplacées par les valeurs calculées. En hydrologie, la simulation est utilisée dans le but de compléter des données manquantes, de faire la prédétermination des crues (évaluation du débit de pointe) ou, de générer des séries de données utiles à la gestion d'ouvrages de retenues.
- Le contrôle : Le contrôle, qui consiste à agir sur le signal d'entrée pour obtenir un signal de sortie ayant certaines caractéristiques, n'a trouvé que peu d'application en hydrologie.

En plus de ces objectifs, la modélisation est souvent utilisée comme outil d'analyse; la comparaison des résultats de modèles qui reposent sur des hypothèses différentes, peut servir à l'évaluation.

I.4.3- Etapes d'élaboration d'un modèle :

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles :

- Définir le modèle et ses objectifs en termes de précision (Ambroise, 1999). 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; Ambroise, 1999; In Boudhraa, 2007).
- 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 entrée -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, 1999; In Boudhraa, 2007). En fait, la formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèses concernant les conditions initiales et aux limites.

I.4.4-Classification des modèles :

Différentes classifications ont été attribuées aux modèles hydrologiques. Les critères de classifications utilisés sont multiples (Singh, 1995; In Boudhraa, 2007) et peuvent être selon le type de processus hydrologique contribuant à la sortie du système ou, selon l'échelle temporelle qui concerne l'intervalle de temps utilisé pour l'entrée du modèle et les calculs internes, et celui utilisé pour la sortie et le calage du modèle. Les modèles sont alors continus, journaliers, mensuels ou annuels. Il existe aussi le critère de l'échelle spatiale, qui distingue les modèles conçus pour les petits bassins versants ($< 100 \text{ km}^2$), pour les bassins versants moyens (entre 100 et 1000 km^2) et pour les grands bassins versants ($> 1000 \text{ km}^2$); le critère d'usage du terrain (terrain agricole, urbain, forestier, région désertique, montagneuse,...) ainsi que le critère d'usage du modèle qui distingue les modèles de planification, de gestion, de prédiction, d'analyse des phénomènes ainsi que leurs descriptions.

Certaines classifications considèrent que les modèles sont soit physiques, soit mathématiques. Les modèles physiques sont les modèles à l'échelle qui présentent un état naturel réduit, et les modèles analogiques qui tiennent compte des analogies entre les lois de l'hydrologie et celles de l'électricité. Les modèles mathématiques englobent les modèles déterministes caractérisés par l'unicité de la réponse à une sollicitation extérieure donnée, et les modèles stochastiques qui font intervenir un paramètre aléatoire dans la relation fonctionnelle reliant l'entrée à la sortie ou, dans les données elles-mêmes.

Une autre classification utilise le critère de « boîte ». On parle de modèle de « boîte noire » (De Marsily, 1994 ; Ambroise, 1999; In Boudhraa, 2007), lorsque l'entrée et la sortie du système sont connues alors que ses caractéristiques sont complètement ignorées. Le cas contraire définit les modèles de « boîte blanche ». Entre ces deux types de modèles, on retrouve la plupart des systèmes physiques, et on parle de « boîte grise ».

Dans ce qui suit, nous allons présenter les modèles les plus utilisés en hydrologie.

I.4.4.1-Modèle conceptuel :

D'après Ambroise (1991; In Boudhraa, 2007), le modèle conceptuel considère le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés et qui sont censés 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.

I.4.4.2-Modèle à bases physiques :

Mailhot (1998; In Boudhraa, 2007) a défini le modèle à base physiques comme étant un modèle 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 physiques.

I.4.4.3-Modèle global :

D'après Maison (2000), le modèle global s'applique globalement sur l'ensemble d'un bassin versant (approche par bilan). Les variables du système ne dépendent que du temps et n'ont aucune signification spatiale. Ce type de modèles, dit aussi modèle moyenné, considère que les variations des caractéristiques géographiques sont des valeurs moyennes ou même inconnues.

I.4.4.4-Modèle distribué :

Le bassin versant ou le réseau hydrographique est découpé en éléments de plus petite taille (Maison, 2000). Le but de ce modèle est de bien tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du bassin versant, au moyen de mailles ou entités régulières ou non.

I.4.4.5-Modèle analytique :

D'après Gaume (2002), c'est un modèle pour lequel les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. Les paramètres de ce modèle sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables.

I.4.4.6-Modèle stochastique :

Refsgaard et Storm (1995; In Boudhraa, 2007) ont caractérisé ce type en tant que modèle qui se base sur des lois de probabilités connues et n'impliquent pas de relation de cause à effet entre les entrées et les sorties. Il ne demande aucune information a priori sur le système. Un modèle stochastique permet de générer, aléatoirement, des données par des lois de distributions particulières.

I.4.4.7-Modèle déterministe :

Dans ce type de modèles, les entrées, les paramètres et les procédés sont connus et non soumis à des variations aléatoires. D'après Llamas (1993) un modèle est déterministe lorsque la réponse du système est à caractère déductif dominant, c'est-à-dire qu'on porte un jugement sur le système physique en essayant de connaître le comportement de ses éléments constructifs et leurs relations internes. Les équations mathématiques sont établies analytiquement et les données expérimentales sont utilisées simplement à titre de vérification. On y trouve les modèles empiriques qui se caractérisent par une approche directe pour obtenir la réponse à une sollicitation, et les modèles physiques qui s'appuient sur les règles de l'hydrodynamique pour représenter et expliquer le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

I.4.4.8-Modèle mécaniste :

Un modèle mécaniste est un modèle qui est capable, théoriquement, de surpasser du moindre calage, car les paramètres qui le régissent doivent être mesurables (Maison, 2000). Ce modèle s'apparente au modèle à base physique distribué.

I.4.5- Critères d'évaluation de la modélisation :

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 :

I.4.5.1-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 Boudhraa, 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.

I.4.5.2-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 supérieure à 0.8 (Gaume, 2002).

I.5-Présentation de quelques modèles :

I.5.1 -GIBSI :

Ce modèle, développé à l'INRS-Eau de 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 HYDROTEL, qui constitue le noyau du modèle GIBSI permet notamment l'interpolation des données pluviométriques sur le 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.* 1995; In Maison, 2000).

I.5.2-MIKE SHE :

Ce modèle d'inspiration mécaniste, a été élaboré au Danish Hydraulic Institute. MIKE SHE (Abbott et al, 1986 ; In Maison, 2000) 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. Parmi les domaines d'application de MIKE SHE, 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...).

Ce modèle est organisé en deux entités. La première (MIKE SHE WM) concerne l'hydrodynamique du bassin, alors que la seconde (MIKE SHE AD) est dévolue au transport des solutés. Le caractère mécaniste de ce modèle provient de l'utilisation de différents modèles mathématiques pour décrire chacune des composantes du cycle hydrologique et du cycle des polluants. De ce fait, la discrétisation du bassin versant s'effectue classiquement par un découpage en strates horizontales et en colonnes homogènes. Ce modèle, tout comme DEDALE-3D est donc, bien évidemment, tridimensionnelle.

Le tableau 1 nous montre brièvement les modèles utilisés dans le cadre de l'hydrodynamique.

Tableau 1 : Modélisation utilisée au sein du modèle hydrodynamique de MIKE SHE

Interception et Evaporation	Kristensen et Jensen (1975)
Ecoulement en zone non saturée	Richards (1931)
Ecoulement en zone saturée	Boussinesq (1904)
Ruissellement	Onde diffusive
Ecoulement dans le réseau hydrographique	Saint Venant (1871)

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

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

Toutefois, MIKE SHE dispose de nombreuses bases de données intégrées, ce qui lui confère un certain intérêt car la mise en place de campagnes d'acquisition n'apparaît indispensable que si l'utilisateur souhaite enrichir le plus possible la modélisation.

Dans un premier temps, l'utilisation des banques de données à disposition peut se révéler suffisante.

I.5.3-WATER WARE :

WATER WARE (Environmental Software and Services 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 est simulée par un modèle monodimensionnel de transport par advection et la qualité des eaux est représentée par un modèle stochastique.

Ce modèle, comme nous le voyons 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.

I.5.4-CEQUEAU :

Le modèle CEQUEAU (Morin et Paquet, 1995) est un modèle conceptuel ou, comme le décrivent ses concepteurs, un modèle paramétrique matriciel à bilan.

Cela sous entend trois choses:

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

Le bassin versant est doublement découpé. Un premier découpage en carreaux entiers homogènes (figure 5) et un second, permettant de tenir compte de la topographie, et donc du sens d'écoulement de l'eau (figure 6). 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.

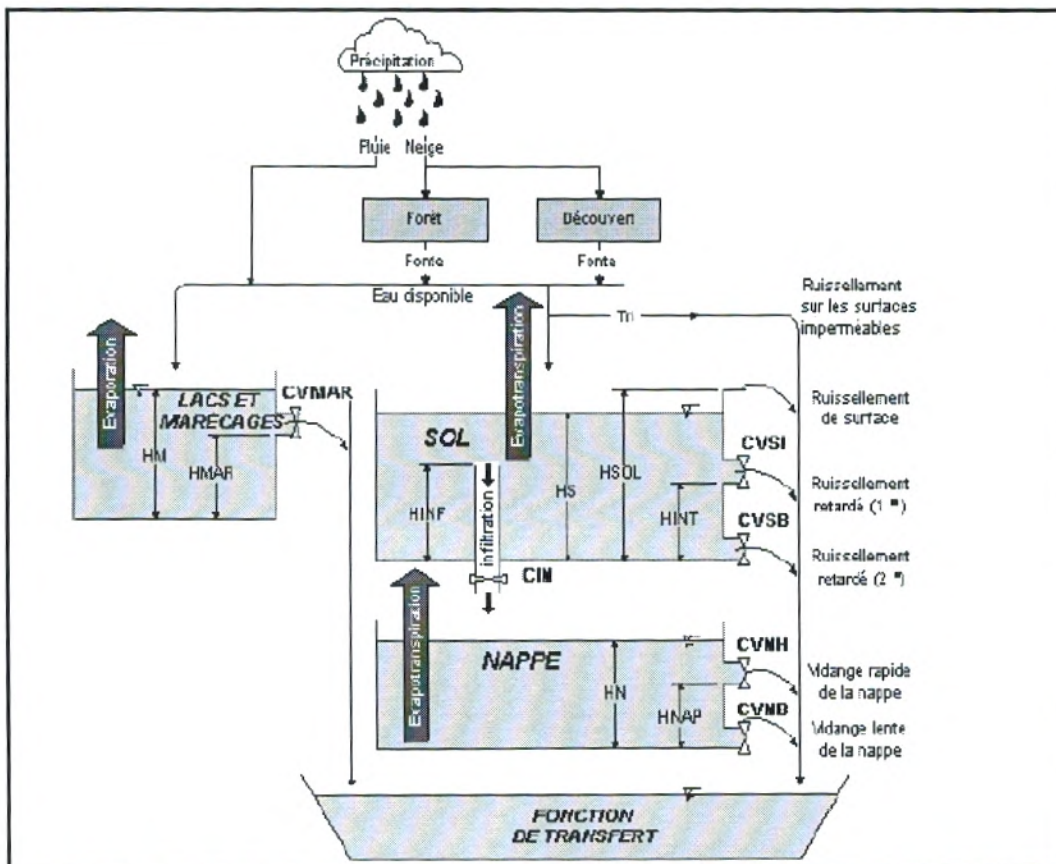


Figure 5 : Fonction de production du modèle CEQUEAU (Morin et Paquet., 1995).

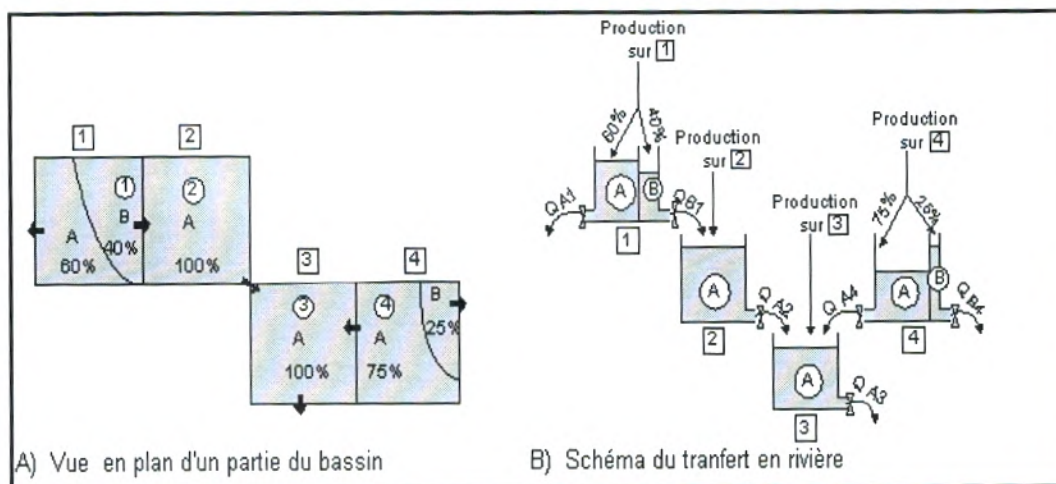


Figure 6: Fonction de transfert du modèle CEQUEAU (Morin et Paquet, 1995).

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 qui, 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 certes 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.

1.5.5-TOPMODEL :

TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979; In Maison, 2000) est un modèle conceptuel destiné à reproduire le comportement hydro morphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore aujourd'hui utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et d'index topographique. Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations de débit des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale.

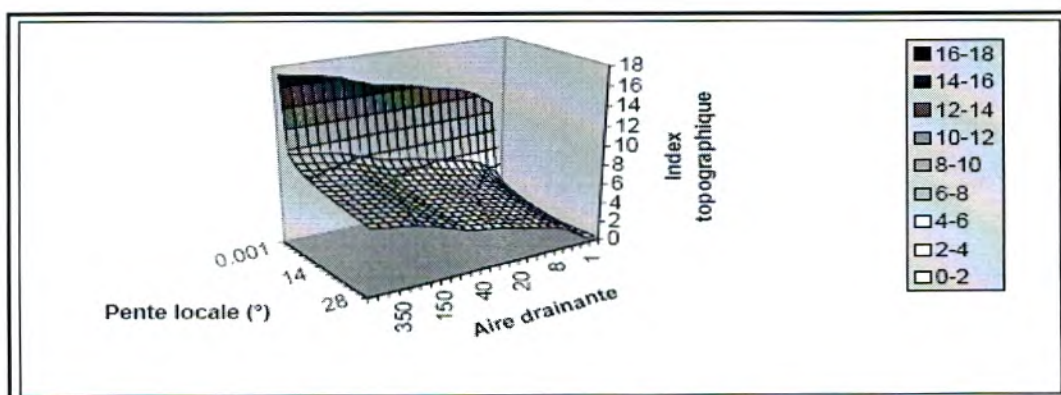


Figure 7 : Index topographique en fonction de l'aire drainante et de la pente locale du bassin

De ce fait, l'index topographique est utilisé pour connaître, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. En effet, le ruissellement issu de la saturation du sol est estimé en fonction de cet index x , que nous pouvons écrire (Franchini et al. 1996; In Maison, 2000) :

$$x = \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$$

Avec

a : aire drainante

β : pente de surface au point de calcul

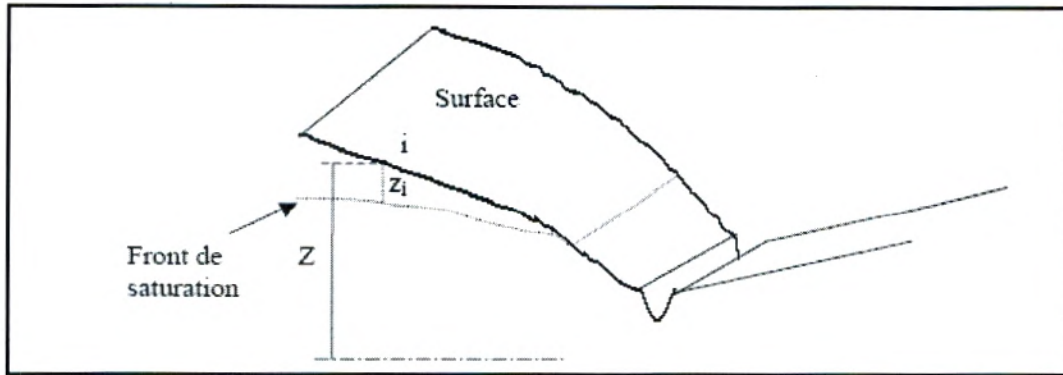


Figure 8 : Schématisation de la formation du ruissellement dans TOPMODEL

(D'après Sivapalan et al., 1987; In Maison, 2000)

Ainsi, si nous notons x^* la valeur de l'index topographique pour laquelle le front de saturation coïncide avec la surface du bassin versant, alors, les points présentant des valeurs de x supérieures à x^* seront en condition de saturation.

TOPMODEL repose sur un découpage du bassin versant en sous bassins homogènes en texture. Les sols et sous-sols sont représentés par des réservoirs successifs, d'où le caractère conceptuel de ce modèle.

Ce modèle, relativement abordable nécessite toutefois, bien évidemment, un certain nombre de données pour fonctionner, parmi lesquelles, nous notons les pluies horaires, l'évapotranspiration potentielle, une cartographie de la transmissivité T_0 et de la conductivité hydraulique verticale mesurée en surface K_0 .

En effet, le modèle utilise une loi de décroissance de la conductivité avec la profondeur du type :

$$K_z(z) = K_0 e^{-fz}$$

où l'axe z est orienté positivement vers le bas et f est un facteur de décroissance.

I.5.6-AGRIFLUX :

Le modèle AGRIFLUX (Banton *et al*, 1993) est un modèle conceptuel 1D vertical qui calcule notamment les flux de nitrates et de pesticides, au moyen des modules NITRIFLUX et PESTIFLUX (Banton *et al*, 1993 ; Larocque *et al*, 1998).

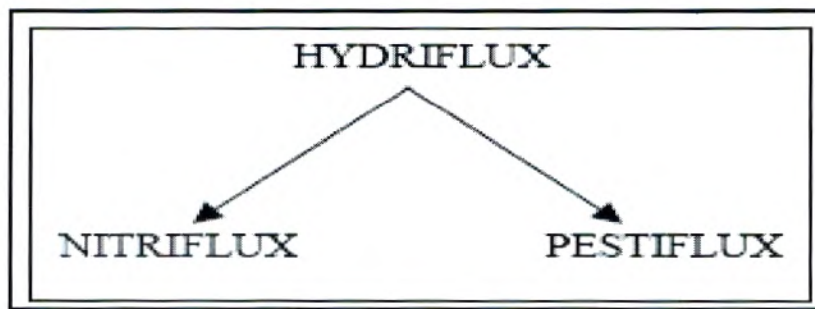


Figure 9 : Organisation modulaire d'AGRIFLUX

Ce modèle permet notamment de calculer les charges en nitrates et en pesticides exportées, d'évaluer des méthodes de gestion, de tester des scénarios afin de minimiser les risques de pollutions ou encore d'édifier des normes et des pratiques sanitaires.

AGRIFLUX est un modèle stochastique et mécaniste fonctionnant au pas de temps journalier. Le caractère stochastique permet notamment de fournir les variables de sortie du modèle assorties de leurs incertitudes respectives.

Sa construction en couche permet de prendre, en compte les hétérogénéités du sol, mais également de détailler la représentation des processus. Le fonctionnement dynamique de chaque couche est relativement classique car il s'agit alors de réservoir qui se vide lorsqu'il est plein avec l'hypothèse alors de gradient de charge unitaire, ce qui sous-entend une densité de flux q égale à la conductivité hydraulique non saturée.

Le tableau 2 résume les différentes composantes du cycle de l'eau, leur utilisation et leur signification au sein d'AGRIFLUX.

Tableau 2 : Caractéristiques du module HYDRIFLUX

Précipitations	Mesurées ou simulées
Evaporation	- Basés sur l'évaporation potentielle mensuelle - Couches supérieures du sol
Infiltration / Ruissellement	- Infiltration dans la première couche du sol - Ce qui ne s'infiltré pas est dévolu au ruissellement
Prélèvement	- Eau extraite par les plantes - La courbe de prélèvement suit une loi normale
Percolation	-Transfert vertical entre les couches et vers la nappe -Si la capacité au champ est dépassée, la vitesse est fonction de la conductivité hydraulique non saturée $K(\theta)$
Drainage artificiel	-Interception de la nappe en sol mal drainé

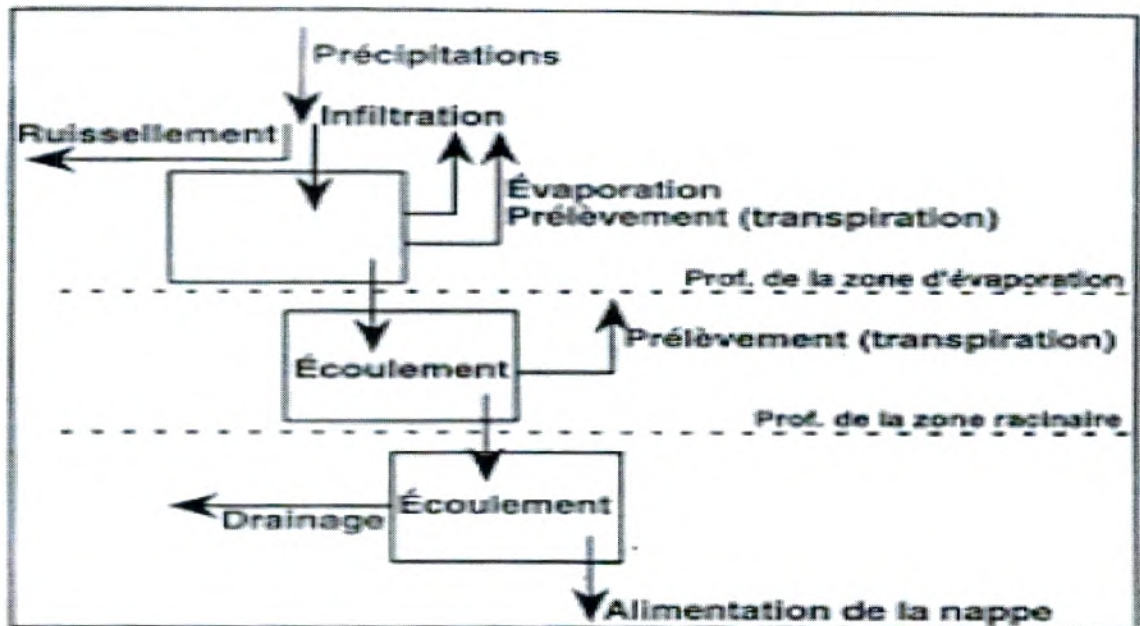


Figure 10 : Cycle de l'eau utilisé dans HYDRIFLUX (Banton et al., 1995)

I.5.7-Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) :

I.5.7.1- Introduction :

I.5.7.1.1- 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.

Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

I.5.7.1.2- 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,
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

I.5.7.1.3- 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 de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (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.

I.5.7.2-Description du modèle pluie-débit annuel GR1A :

I.5.7.2.1-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.

I.5.7.2.2-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 :

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

où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours.

Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

I.5.7.2.3-Paramètre :

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

I.5.7.3-Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :

I.5.7.3.1-Introduction :

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

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

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle.

Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

I.5.7.3.2-Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la Figure 11. 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 :

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

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

$$P_1 = P - P_s$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s$$

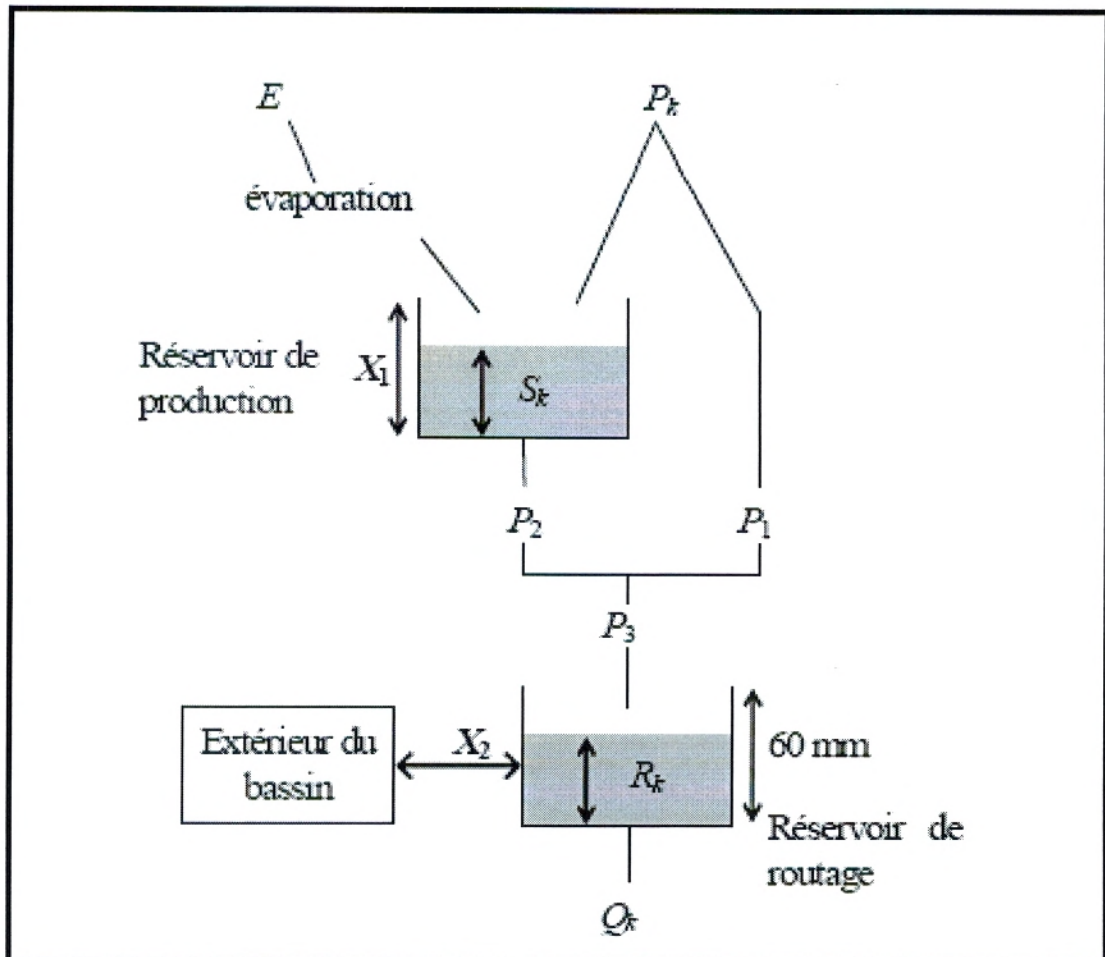


Figure 11 : Schéma de la structure du modèle GR2M

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

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

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

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

• **Percolation :**

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

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

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

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

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

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

$$P_3 = P_1 + P_2$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3$$

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

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

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

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

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

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

I.5.7.3-Paramètres :

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau 3.

Tableau 3: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants

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

I.5.7.4-Conclusions et perspectives :

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

C'est ainsi par exemple que les sous-modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales. Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps.

Comme tous les modèles hydrologiques actuels, ces modèles restent perfectibles, malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Pour toutes ces considérations, nous avons choisi le modèle GR que nous avons adopté pour étudier la relation pluie- débit au niveau du bassin de la Mekerra, qui a connu plusieurs débordements et a causé l'inondation de la ville de Sidi Bel Abbes à l'aval et d'autre localité à l'amont.

CHAPITRE II

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MEKERRA

II.1-Présentation générale du bassin versant Macta:

Situé au Nord-Ouest de l'Algérie, le bassin versant de la Macta s'étend sur une superficie de 14390 km². Il est drainé par deux principaux cours d'eau: l'oued Mebtouh, à l'Ouest, et l'oued El Hammam à l'Est (Figure 12).

Le bassin versant de la Macta associe :

- Une basse plaine littorale : Elle est séparée de la mer par un cordon dunaire et présente des altitudes le plus souvent inférieures à 9 m, ce qui favorise la présence de plans d'eau, de marais et de steppes plus ou moins humides. Vers l'amont, elle se prolonge au Sud-Est par les vallées des oueds Sig et Habra.
- Des massifs, orientés Sud Ouest-Nord Est, qui confèrent un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin versant : Les monts de Tessala (point culminant à 1061 m) bordent le bassin versant à l'Ouest et au Nord-Ouest. Ils sont traversés par l'oued Mebtouh avant qu'il ne rejoigne la basse plaine inférieure. Au Sud-Ouest, ils sont relayés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla). Les monts de Beni Chougrane (932 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant. Celui-ci remonte, à l'Est, jusqu'aux monts de Saïda (1201 m au djebel Tiffrit) et, au Sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455 m au djebel Mezioud) et jusqu'aux hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (1415 m au djebel Beghira) qui séparent le terrain d'étude de la dépression du Chott Chergui.
- Enfin, de larges plaines alluviales insérées dans les massifs montagneux : Celle de Sidi Bel Abbés, de direction Sud-Nord, est associée à l'oued Mekerra (nom donné à l'oued Mebtouh dans sa partie supérieure). Le bassin de l'oued El Hammam, de son côté, renferme la plaine de Ghriss-Mascara, qui est orientée Ouest-Sud Ouest - Est-Nord Est, et qui est drainée par l'oued Ain Fekane.

Les plaines intérieures sont essentiellement constituées de formations détritiques, à prédominance marno-argileuse dans la région de l'Habra et sablo-argileuse avec des passages de graviers dans la région de Ghriss (Borocco, 1950 ; Perrodon, 1957 ; In Meddi et al, 2009).

Les massifs sont armés par des roches carbonatées : calcaires du Crétacé dans les monts de Tessala et de Beni Chougrane, calcaires et/ou dolomies du Jurassique dans ceux de Tlemcen et de Dhaya. Sauf dans les monts de Tlemcen, la présence de roches tendres (marnes, argiles, grès) favorise les phénomènes d'érosion.

En amont de Bouhanifia, le bassin versant de l'oued El Hammam couvre un peu moins de 7700 km². L'oued El Hammam se forme à Trois Rivières, où se rejoignent les oueds Melrir, Hounet (formé par la confluence des oueds Sefioum et Berbour) et Sahouet (formé par la confluence des oueds Taria et Saïda – l'oued Sahouet est grossi de l'oued Fekane).

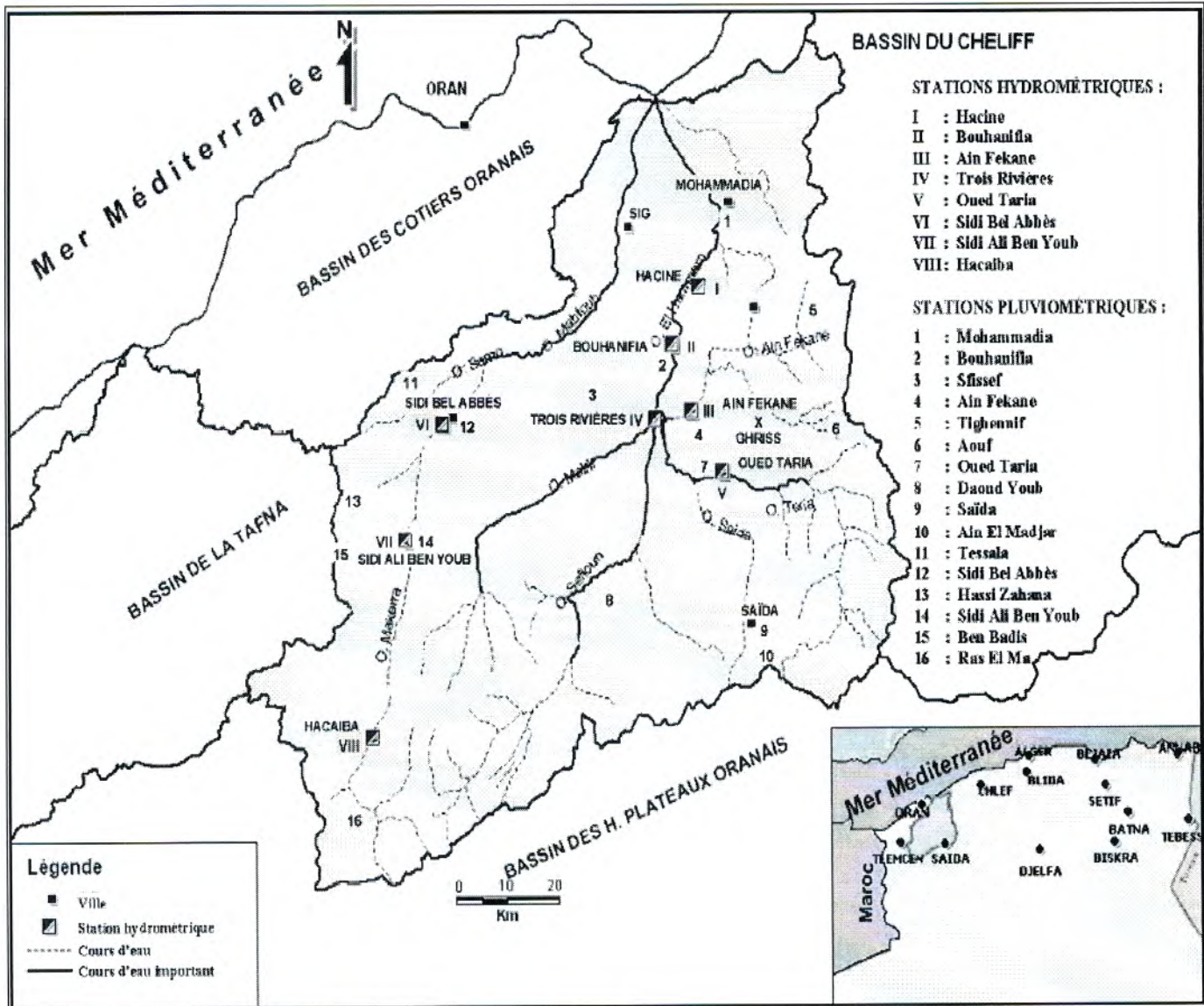


Figure 12 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Macta.

II.2-Présentation du bassin versant de l'oued Mekerra :

Le bassin versant de l'oued Mekerra est situé au Nord Ouest du territoire algérien, ce bassin occupe une superficie de 4102 km² (28.5% de la superficie du bassin de la Macta).

Le bassin de l'Oued Mekerra est limité au :

- Nord, par les marais de la Macta.
- Sud, par le Chott Chergui.
- Est, par le sous bassin de Oued El Hammam (Macta).
- Ouest, par le bassin côtier Oranais Central.

Il prend son origine dans les hautes vallées de la steppe au Sud de Ras El Ma à une côte avoisinant les 1450 m. La côte moyenne de Sidi Bel Abbès est d'environ 480 m. La superficie de son bassin versant au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès est d'environ 3 000 km², la longueur de l'oued est de 134 km. Le

bassin versant, a une forme allongée du Sud au Nord. La superficie du bassin est à 50% située à une côte dépassant les 1000 m.

Du point de vue géomorphologique, le bassin versant de l'oued Mekerra peut être subdivisé en trois parties (figure 13) :

- **la haute Mekerra** : Elle s'étend depuis la source de ce cours d'eau au Sud de Ras El Ma jusqu'à Sidi Ali Benyoub.
- **la moyenne Mekerra** : Occupe la zone comprise entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbés.
- **la basse Mekerra** : Elle correspond à toute la partie du bassin versant située en aval de la ville de Sidi Bel Abbés.

Le réseau hydrographique du bassin est très développé, mais représenté fréquemment par des cours d'eau temporaires. Les oueds sont alimentés par des précipitations et par des sources dont la plus importante est Ain – Skhouna (Sidi Ali Benyoub) qui débite environ 100 l/s.

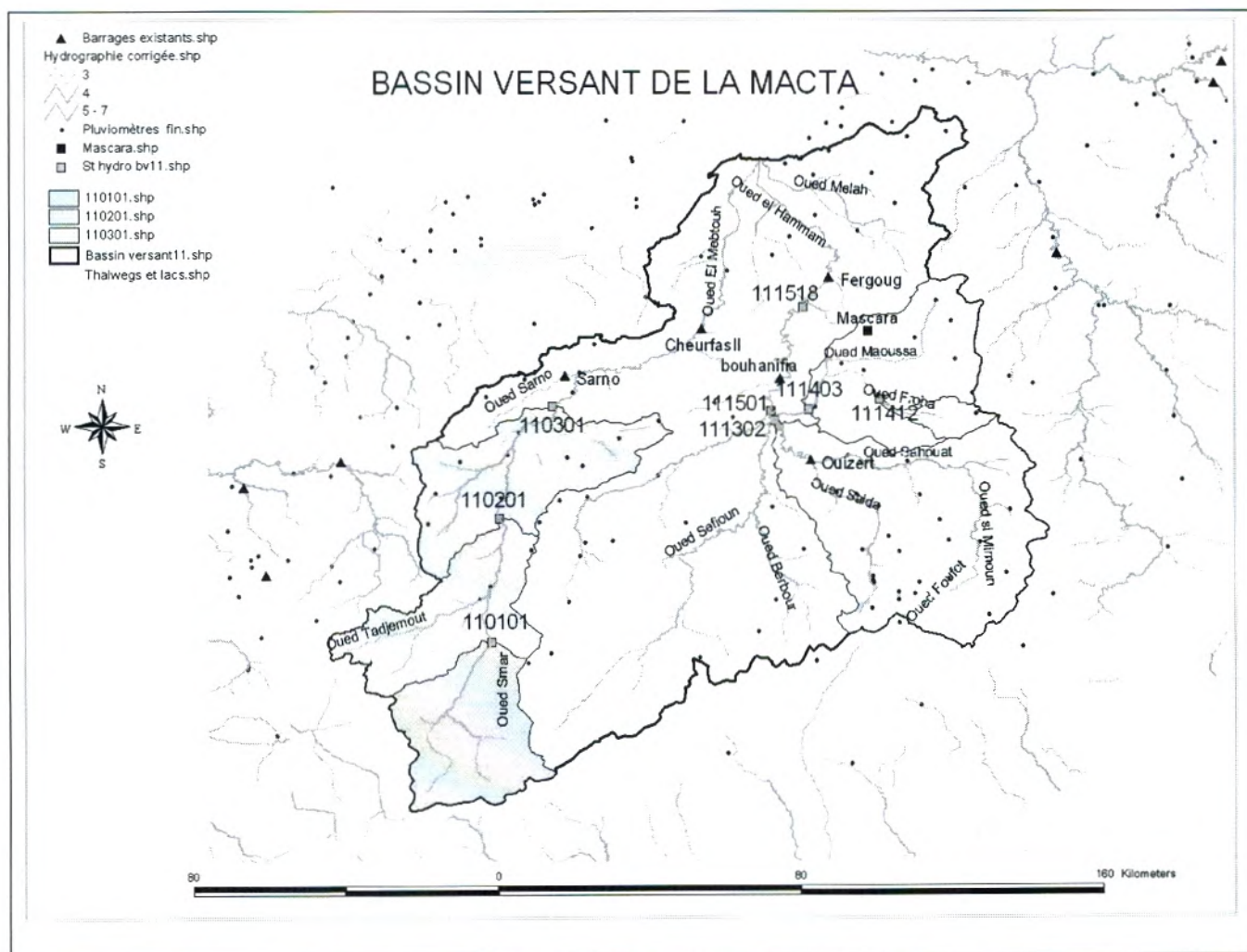


Figure 13: Situation du bassin versant de l'oued Mekerra dans le bassin de la Macta.

II.2.1-Etude morphométrique :

L'utilisation des différents types de paramètres morphométrique a pour but, la quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant.

II.2.1.1 Caractéristique de forme :

a. Indice de compacité de Gravilius (K_c) :

Cet indice qui caractérise la forme du bassin versant est donné par la relation suivante :

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

Où P : Périmètre du bassin versant ($P = 353 \text{ Km}$);

S : Surface du bassin versant ($A = 4102 \text{ Km}^2$).

Sur le plan morphologique, la valeur élevée de l'indice de compacité ($K_c = 1,55$) traduit la forme allongée du bassin versant de la Mekerra, d'où la prédominance d'une érosion linéaire et régressive et par conséquent un débit solide très important.

b. Rectangle équivalent :

Partant de l'indice de compacité de Gravilius, il est possible suivant la méthode de Roche d'établir un rectangle représentatif du bassin versant de l'oued Mekerra dont les paramètres sont :

Longueur (L)

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

$$L = 148.37 \text{ km.}$$

Largeur (l)

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

$$l = 27.65 \text{ km.}$$

II.2.1.2-Etude du relief :

a. 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 (Tableau 4), nous avons établi la courbe hypsométrique (Figure 14).

Tableau 4: Répartition hypsométrique du bassin versant de l'oued Mekerra

Tranche d'altitude (m)	S_i (Km ²)	S_i (%)	S_i cumulées (Km ²)	S_i Cumulés (%)
> 1700	0	0	0	0
1700 à 1500	2,72	0,09	2,72	0,9
1500 à 1300	124,08	4,14	126,8	4,23
1300 à 1100	1067,72	35,59	1194,52	39,82
1100 à 900	854,9	28,50	2049,42	68,31
900 à 700	549,02	18,30	2598,44	86,61
700 à 500	327,19	10,91	2925,63	97,52
< 500	74,37	2,48	3000	100

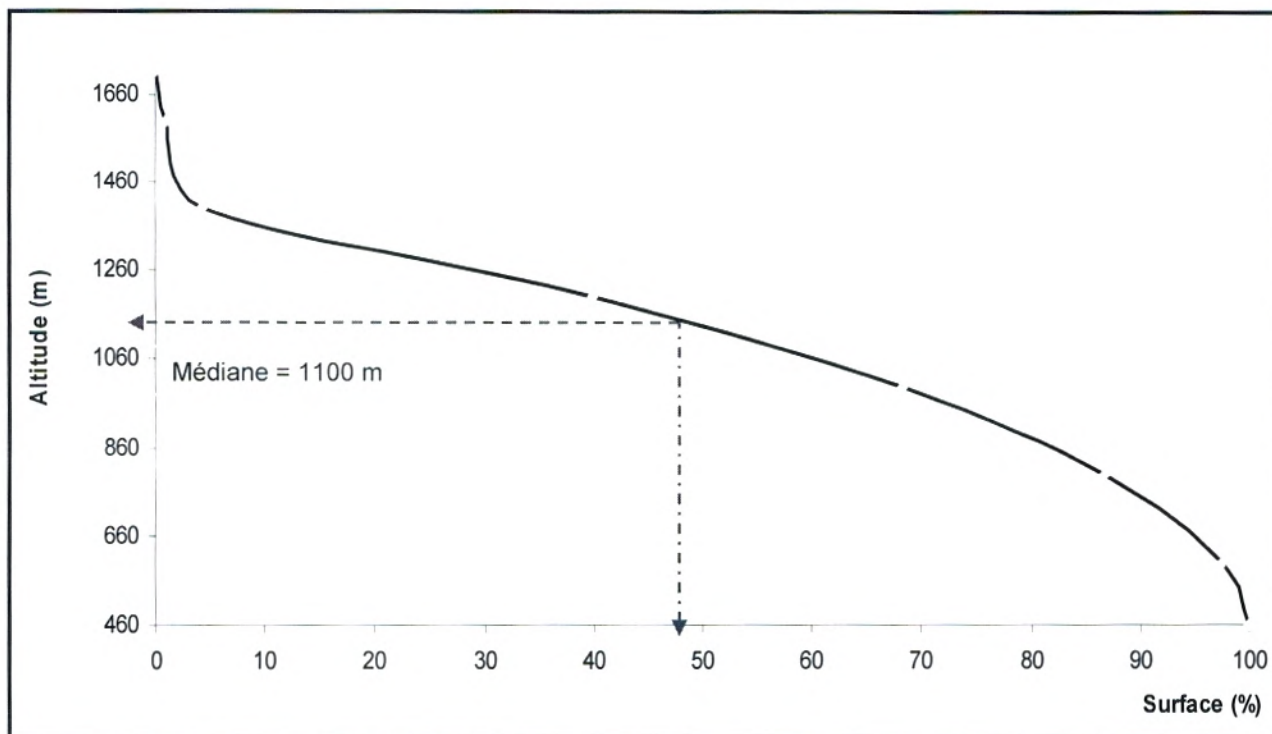


Figure 14: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Mekerra

L'allure de la courbe hypsométrique nous renseigne sur la répartition des altitudes au niveau du sous bassin versant de l'oued Mekerra où l'on constate que les altitudes supérieures à 1400 m sont peu étendues et le point le plus culminant atteint 1714 m (Dj. Ouargla).

Par contre la tranche d'altitudes comprise entre 1300 et 700 m couvre plus de 80% de la surface totale du bassin.

b. Les altitudes :

L'altitude minimale est de 437 m au niveau de la ville de Sidi Bel Abbés.

L'altitude maximale est de 1714 m à Djebel Ouargla.

L'altitude médiane qui correspond à l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique, est de 1100 m.

L'altitude moyenne est obtenue à partir de la relation suivante :

$$H_{\text{moy}} = \sum_{i=1}^n \frac{(H_i s_i)}{S}$$

Où H_i : altitude moyenne entre deux courbe de niveau (m).

s_i : surface partielle comprise entre deux courbes de niveaux (Km²)

S : surface totale du bassin versant (Km²).

L'altitude moyenne du bassin versant de l'oued Mekerra est de 960 m.

c. Indices de pente et relief

• Indice de pente (I_p)

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 I_p donné par la relation :

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

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 deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

L : longueur du rectangle équivalent.

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

$$I_p = 5,19\%$$

• Indice de pente globale (I_g)

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

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin. La dénivelée D est donc égale à $H_{5\%} - H_{95\%}$ où $H_{5\%} = 1395$ m et $H_{95\%} = 660$ m.

L'indice de pente I_g est également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égal à :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad ; \quad I_g = 0,0052$$

Où, I_g : indice globale de Roche

D : dénivelée (m) = 735 m.

L : Longueur du rectangle équivalent = 113,4 m

D'après la classification de l'ORSTOM (Tableau5), et d'après la valeur obtenue de $I_g = 5,8 \%$ ($0.005 < I_g < 0.01$) on peut ranger le bassin versant de l'oued Mekerra dans la classe du relief assez faible.

Tableau 5: Classification des reliefs d'après l'ORSTOM

Relief très faible	$I_g < 0.002$ 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 m/km $< I_g$

- **Indice de pente moyenne (I_{moy}) :**

Le rapport entre la dénivelée totale du rectangle équivalent et sa surface

$$I_{moy} = \frac{D}{L}$$

Où **D** : Dénivelée totale du rectangle équivalent ($H_{max} - H_{min} = 1714 - 437 = 1277$ m)

L : Longueur du rectangle équivalent (Km) = 113,4 Km

$$I_{moy} = 1,12 \%$$

Ainsi, la forme allongée du bassin versant, la faiblesse de la pente de la plaine et la fragilité du sol lié à l'irrégularité du couvert végétal sont autant de facteurs qui favorisent le phénomène de l'érosion et de la sédimentation dont les conséquences se manifestent par l'inondation de plusieurs localités situées dans la plaine.

II.2.2-Caractéristique climatique :

C'est un facteur important qui conditionne l'hydrographie. Le bassin de l'Oued Mekerra subit les influences maritimes au Nord et sahariennes au Sud. L'influence saharienne y est toutefois prépondérante. On distingue d'une façon générale une saison sèche (été) et une saison humide (hiver), bien distinctes, avec une transition dans le Tell et le littoral, moins marquée au printemps. On peut dire que le bassin de l'Oued Mekerra est caractérisé par un climat semi-aride.

Afin de donner un aperçu général sur le climat de la zone d'étude, nous avons pris en considération la station la plus professionnelle du bassin versant de l'oued Mekerra, qui est celle de Sidi Bel Abbés (Lat. = 35° 12; Long. = 00° 37 W; Alt. = 475 m) (figure 15), située à la limite nord du bassin versant de Mekerra. Les données climatiques (température, humidité relative, ensoleillement, vitesse du vent et évaporation) sont fournies par l'Office National de la Météorologie (ONM) et enregistrées sur une période de 18 années (1987-2004).

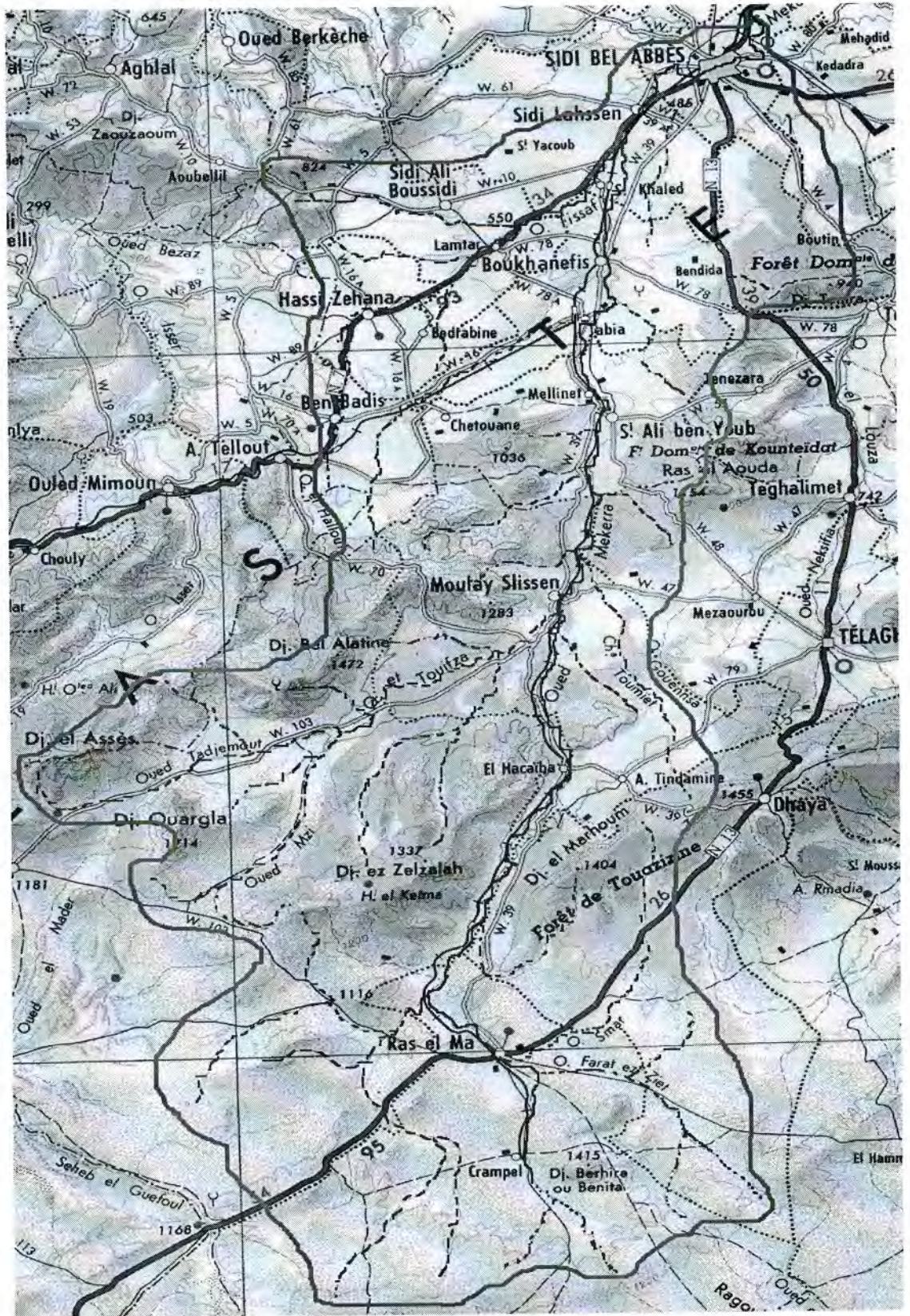


Figure 15 : Bassin versant de l'oued Mekerra

II.2.2.1-Température de l'air :

Les températures ont été mesurées à l'aide de thermomètre à minima et maxima.

Les moyennes obtenues correspondent à 18 années d'observations (1987–2004). Les moyennes mensuelles et annuelles sont résumées dans le tableau 6.

Tableau 6: Températures moyennes mensuelles et annuelles à la station de Sidi Bel Abbés

Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Minima (m)	16,7	12,4	8,3	5,8	4,0	3,7	6,8	8	16,7	15,8	20,6	20	11,5
Maxima (M)	27,7	22,2	17,3	13,0	11,6	15,3	16,6	18,6	17,9	27,4	30,8	32,4	20,9
T° Moyenne	22,2	17,3	12,8	9,4	7,8	9,5	11,7	13,3	17,3	21,6	25,7	26,2	16,2

La température moyenne annuelle est de 16.2°C. En terme saisonnier, les températures varient entre 7.8°C au mois de janvier, généralement accentuées, par la proximité des effets continentaux et 26.2°C aux mois de juillet août, dont les entrées sahariennes envahissent pratiquement l'ensemble de la région en été (Figure 16).

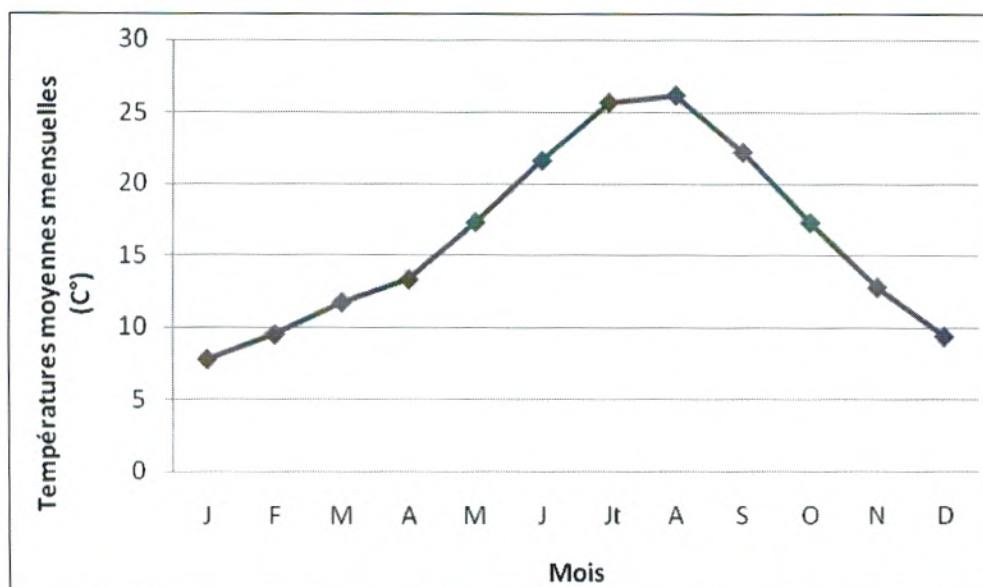


Figure 16: Répartition mensuelle des températures moyennes mensuelles du bassin de l'oued Mekerra

La moyenne des minimas est de 11,5 avec un minimum absolu de -2°C observé au mois de Janvier. La moyenne des maximas est de 20,9 °C, avec un maximum absolu de 47,7 °C observé au mois de juillet ; ceci est dû à l'influence continentale venant du Sud (siroco).

De novembre à avril, la température moyenne annuelle varie entre 7,8 °C et 13,3 °C donc toujours inférieur à la moyenne annuelle. Par contre de mai à octobre, elle varie entre 17,3 °C et 26,2 °C, valeurs supérieures à la moyenne annuelle.

Nous pouvons donc considérer que l'année se répartit en deux saisons :

L'une froide : de novembre à avril

L'autre chaude : de mai à octobre

II.2.2.2-Evaporation :

Les

mesures de l'évaporation ont été effectuées sous abri à l'aide d'un évaporomètre «Piche» à la station de Sidi Bel Abbés. Le tableau 7 résume les moyennes mensuelles de l'évaporation en millimètre au niveau de la station de Sidi Bel Abbés sur la période de 18 années (1987 – 2004).

L'évaporation est importante en juin, juillet et août et elle est faible en novembre, décembre, janvier et février. Il faut noter que l'évaporation, qui a été prise égale à 1987 mm (presque 2 mètres), représente l'évaporation annuelle.

Tableau 7: Evaporation moyennes mensuelles et annuelles à la station de Sidi Bel Abbés

Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Evaporation Piche (mm)	184	144	93	84	91	86	119	142	189	271	301	283	1987

II.2.2.3-Evapotranspiration potentielle :

Sur la base des différentes études réalisées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH) dans la région et compte tenu des observations enregistrées dans la plaine de Sidi Bel Abbés, l'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle a été évaluée à 1182 mm (Tableau 8). Ce chiffre montre notamment à quel point la région est soumise au climat semi aride. La répartition mensuelle donne plus de 50% de perte d'eau par évaporation sur les quatre mois plus secs de l'année (mai - août).

Tableau 8: Répartition Mensuelle de l'évapotranspiration potentielle (Région de Sidi Bel Abbés)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Evapotranspiration	124	81	66	35	37	45	73	101	135	151	181	154	1182
en %	10,8	5,6	4,1	2,7	2,7	3,7	5,8	8,0	11,0	13,9	17,7	14,2	100,0

Les autres paramètres climatiques sont résumés dans le tableau 9 :

Tableau 9 : Paramètres climatiques enregistrés à la station de Sidi Bel Abbés

Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
Humidité (%)	62	69	74	65	74	73	70	68	64	53	49	52	65
Vitesse vent (m/s)	2,2	2,3	2,2	2,3	2,6	2,2	2,5	2,9	2,7	2,6	2,4	2,2	2,4
Ensoleillement (heure)	8,9	7,7	6,8	6,2	6,6	8,0	7,9	8,8	9,9	11,3	11,3	10,3	8,6

La vitesse moyenne annuelle du vent est de 2,4 m/s, n'étant pas trop variable pendant l'année. Elle est de 2,9 m/s au maximum et de 2,2 m/s au minimum. Une certaine stabilité au cours de l'année est notable.

L'analyse du tableau ci-dessus met en valeur l'importance de l'insolation dans cette zone (environ 8,6 heures / jour = 3139 heures /an).

L'humidité relative moyenne annuelle de la région est de 65 %, avec des valeurs extrêmes atteintes en décembre (76 %) et juillet (49 %). C'est un élément important du cycle hydrologique contrôlant l'évaporation du sol et la couverture végétale. Elle représente le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau.

II.2.2.4-Végétation :

La végétation naturelle ne subsiste plus guère que dans les secteurs montagneux. Elle est constituée en grande partie par les pins d'Alep (forêts de Louza, de Belarbi, de Tenira).

Au sud (forêts de Kouteidat et de Tassa) les thuyas se mêlent en minorité aux pins d'Alep. Dans la région du Djebel Kerroucha, seul le chêne vert a subsisté.

Dans la plaine défrichée à partir de 1842, les cultures annuelles (production céréalière fourrage) et les jachères couvrent les deux tiers de la surface. La grande partie du sol est occupée par la vigne, principalement à raisin de cuve. De petites surfaces de plantations d'oliviers et d'arbres fruitiers sont distribuées dans toute la plaine. Des cultures irriguées (environ 4 000 hectares), principalement le maraîchage, sont pratiquées par dérivation de l'Oued Mekerra et par pompage dans les régions riches en eau. L'extension des terres aptes à l'irrigation, environ 20000 hectares, nécessite d'énormes besoins en eau, dont l'exploitation se fera par des puits à galeries et des forages.

II.2.2.5-Pédologie :

Le déficit en eau dans le sol se trouve aggravé par une évaporation active dont l'intensité influence directement l'évolution du sol. La proportion de la croûte calcaire observée sur le bassin est importante. Elle joue un rôle important dans le phénomène de montée des crues.

II.2.3- Réseau hydrographique :

L'Oued Mekerra constitue le chenal le plus important, traversant la ville de Sidi Bel Abbés et drainant ainsi les eaux de ruissellement d'un bassin versant de 4102 km², mais également les eaux usées des agglomérations qu'il traverse ou passe à proximité.

Il prend sa source au Djebel Touazine à une altitude de 1200 m situé au Sud Est de Ras El Ma, à la limite des wilayas de Sidi Bel Abbés et Tlemcen.

Il traverse sur une distance de près de 150 km plusieurs agglomérations secondaires notamment Haçaiba, Sidi Ali Benyoub, Tabia, Boukhanefis, Sidi Lahcen, avant la ville de Sidi Bel Abbés située à une altitude moyenne de 500 m.

↓ Caractéristiques du réseau hydrographique :

Les caractéristiques du réseau hydrographique de l'oued Mekerra sont récapitulées dans le tableau 10

Tableau 10: Caractéristiques du réseau hydrographique (Source : ABH)

Sous Bassin	S/Sous Bassin	Affluents		Altitudes		ΔH (m)	Longueur des affluents (km)
		Rive Gauche	Rive Droite	Côte amont	Côte anal		
1101 Mekerra amont 29.50 km	01	O.Ras el Ouidan		1210	1098	112	20.50
	02		O.Faret ez-Ziet	1170	1098	72	12.50
	03	O.Taifza		1160	1082	78	6.00
	04	O.Es.Sekrara		1123	1055	68	6.50
	05		O.Ferrer	1073	1035	38	5.50
	06	O.El Messameche		1250	1030	220	8.50
	07		O.El Ksob	1300	947	353	6.00
1102 Mekerra Moyen 32 km	08		O.Oum El Djebbour	890	819	71	4.50
	09	O.Moulay Slissen		920	810	110	6.00
	10	O.Mkilta		920	770	150	10.00
	11	O.Chaabet Guelmen		820	710	110	4.50
1103 Sarno 65 km	12		O.Chaabet Bechir	740	610	130	3.50
	13	O.Tissaf		550	515	35	11.50
	14	O.Sarno		480	419	61	6.00
1104 Mebtouh 35.25 km	15	O.Malah		600	405	195	8.50
	16		O.Chaabet Zelifa	380	355	25	4.50
	17	O.Imbert		600	350	250	7.50
	18		O.Ain Inadden	500	220	280	10.00
	19	O-Afferd		485	210	275	7.00

II.2.4-Aperçue géologique et hydrogéologique :

II.2.4.1-Cadre géologique régional:

La structure actuelle du Nord de l'Algérie est due aux mouvements Hercyniens et Alpains, qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines. En Oranie, nous avons du Nord au Sud (Guardia ,1975):

✚ Le domaine de nappes Telliennes

Au nord, zone complexe, constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur, de bassins intra montagneux d'âge néogènes tardifs (bassin du Chellif), dont la série sédimentaire s'étend du jurassique au miocène. Cette zone est constituée de reliefs jeunes modelés au cours du tertiaire par les mouvements Alpains. Ils sont les témoins d'une tectonique cassante matérialisée par des accidents limitant des plaines d'effondrement, plus basses topographiquement que les reliefs qui la ceinturent. Ces plaines sont caractérisées par un substratum rocheux recouvert en surface d'alluvions et de colluvions. (Figure 17).

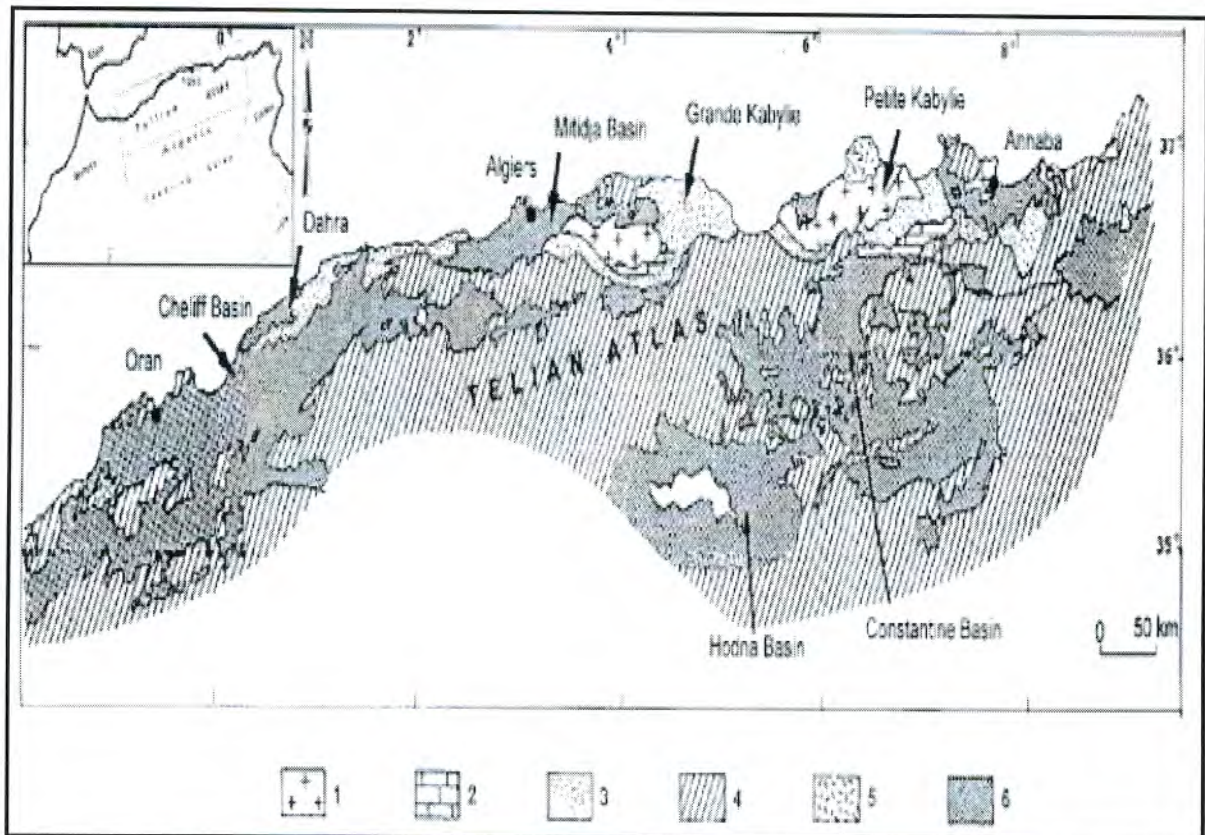


Figure 17: carte géologique de l'Atlas tellien (d'après M. Meghraoui; In Hallouche, 2007)

- (1) Paléocène (2) Jurassique (3) Flyschs Crétacé – Oligocène (4) Jurassique et Crétacé Tellien
(5) Volcanisme néogène (6) Bassins néogènes et quaternaires

✚ Le domaine de la Meseta Oranaise (hauts plateaux)

Au centre, avant-pays alpin, à couverture sédimentaire réduite où les processus locaux ont permis la formation de bassins intra montagneux comme le bassin de Telagh ou au sud de Tabia.

✚ L'Atlas Saharien

Au sud, est né d'un long sillon subsidiant pincé entre les hauts plateaux et la plate-forme saharienne.

Les limites de ces unités sont marquées par des accidents majeurs de direction WSW – ENE. La limite Sud du front des nappes telliennes est constituée par une ligne irrégulière délimitant le Tell correspondant au domaine Alpin. L'accident Nord Atlasique qui correspond à une série d'accidents donnant une ligne de séparation entre le domaine Atlasique et le domaine de la Meseta Oranaise.

Le bassin versant de l'oued Mekerra occupe un espace qui correspond à la zone de transition entre le domaine Tellien au Nord et celui de la Meseta Oranaise au Sud.

II.2.4.2-Contexte géographique et morphologique de la zone d'étude :

La plaine de Sidi Bel Abbés, se situe, entre l'Atlas Tellien au Nord et le massif tabulaire de Tlemcen - Saida (bordure septentrionale des Hauts plateaux) au Sud. Elle fait suite à la plaine d'Hennaya - Isser à l'Ouest et se prolonge vers l'Est par la plaine de Mascara dont elle est limitée par l'étranglement de Sfisef.

Cette plaine correspond au bassin versant de la moyenne MEKERRA entre la cluse de Sidi Ali Benyoub et le seuil du Rocher en aval de la Ville de Sidi Bel Abbés.

Du point de vue morphologique la région d'étude présente différents aspects :

- Au Nord, à l'Est et au Sud - Est, de multiples collines marneuses et marno - gréseuses culminent entre 600 et 900 m (*Djebel Ténira*),
- Au Sud, d'importants massifs calcaires sont coiffés de sommets dépassant les 1.000 mètres (*Djebel Es Seigaa*),
- Au Nord - Ouest des sommets calcaires atteignent environ 800 mètres (*Djebel Kerroucha*).

La plaine est faiblement ondulée, quelques basses collines subsistent en son centre. Son altitude est comprise entre 450 et 800 mètres NGA.

II.2.4.3 Cadre géologique de la plaine de Sidi Bel Abbés :

La plaine de Sidi Bel Abbés est une cuvette à reliefs de bordure très diversifiés :

↓ **Bordure Nord**

Les Monts de Tessala constituent la bordure septentrionale de la plaine. C'est une chaîne de reliefs, allongés en direction Sud Ouest - Nord Est, très plissés à ossature crétacé et à recouvrement tertiaire très épais, qui aurait été transportée par charriage en deux ensembles principaux (Guardia, 1975) qui sont :

a) **Crétacé supérieur**

Cet ensemble est constitué par des formations argilo - marneuses, à semelle de trias salifère et gypseux recouvrant en contact anormal les terrains du Miocène anté- nappe.

b) **Mio - Pliocène**

Le Miocène est constitué par des argiles bleues et des calcaires organogènes. Les formations de cet étage reposent directement en contact anormal sur le Crétacé supérieur.

Vers l'Est le domaine des nappes disparaît et laisse la place à une série continentale du Pliocène.

↓ **Bordure Sud**

La bordure Sud de la plaine est constituée par les Monts de Tlemcen - Saida, formés en totalité par les terrains secondaires du Jurassique moyen et supérieur et du Crétacé inférieur. Ces reliefs sont compris entre deux môtles granitiques de Ghar Roubane à l'Ouest et Tiffrit à l'Est dont les déformations se transmettent difficilement aux matériaux du Mésozoïque à prédominance calcaréo - gréseux. Il est à noter que les reliefs sont affectés par une tectonique cassante.

↓ **Bordure Ouest**

La bordure Ouest constitue la limite topographique entre les deux bassins de l'Isser à l'Ouest et de la Mekerra à l'Est. Elle a l'aspect d'une colline encroûtée formée de matériaux Plio - Quaternaire subhorizontaux.

↓ **Bordure Est**

La bordure Est correspond à la topographie élevée des terrains Plio - Quaternaire et Miocène.

La bordure Sud - Est de la plaine est caractérisée par une puissante formation continentale Pliocène où apparaît vers le Sud le Miocène. Au Sud du Village Caïd Belarbi, le crétacé inférieur (Calcaire de l'Aptien) affleure à la faveur d'un horst.

✚ Le centre de la plaine

Le centre de la plaine présente une vaste cuvette à substratum argilo - marneux, imperméable, du Miocène ou du Pliocène inférieur, et comblée de sédiments détritiques provenant de la désagrégation des reliefs environnants.

II.2.4.4-La série stratigraphique :

La série stratigraphique telle qu'elle se présente en affleurements et dans les sondages dans la plaine de Sidi Bel Abbés s'établit comme suit (Auclair ,1967 ; In Hallouche, 2007) :

✚ Le Quaternaire

Le Quaternaire est représenté par des formations limoneuses, argilo - sableuses, argileuses de faibles épaisseurs (jusqu'à 10 m) développées dans le centre et la partie Nord de la plaine. Les bordures des oueds sont occupées par des terrasses constituées par des alluvions et conglomérats. Ces formations sont couronnées par une croûte calcaire qui se développe principalement en bordure des massifs calcaires.

✚ Le Cénozoïque

Les terrains du Cénozoïque occupent un vaste étendu dans la plaine de Sidi Bel Abbés et sont représentés par les formations suivantes :

a) Le Pliocène

Quatre formations peuvent être attribuées au Pliocène :

- **les dépôts alluvionnaires des plateaux** : affleurant principalement dans la partie Sud - Ouest de la plaine. Ce sont des dépôts caillouteux et limoneux, parfois grés - sableux avec des intercalations de bancs de poudingues à gros éléments.
- **les conglomérats des chenaux aquifères** : Cette formation, attribuée au Salétien, est essentiellement conglomératique formée de galets hétérométriques (centimétriques à décimétriques) le plus souvent reliés par un ciment argilo - carbonaté. Ces galets sont le résultat de la désagrégation des terrains jurassiques et crétacés suite à des épisodes torrentiels. On rencontre aussi des lentilles argileuses et sableuses. Ces dépôts occupent les anciennes vallées creusées dans le plateau détritique pliocène (dont quelques lambeaux subsistent dans les interfluves) par les Oueds Mekerra et Lamtar alors très actifs.
- **Le complexe argilo - sableux** : principalement déposé au Sud et à l'Est de la plaine : argiles, argiles sableuses et argiles silteuses.

- ##### b) Le conglomérat des Hauts plateaux
- C'est un conglomérat ferrugineux à ciment dolomitique ou calcaire formé d'éléments centimétriques et décimétriques, contenant quelques lentilles gréseuses. Au Sud de la plaine et dans la vallée alluviale de Sidi Ali Ben Youb particulièrement au pied des

reliefs et au niveau des Oueds qui les traversent, se sont amassés d'importants cônes de déjections conglomératiques.

c) Le Miocène

Le Miocène se divise en deux formations :

- **Continental** : Formant le Djebel Ténira et les Djebels au Sud de Caïd Belarbi. Ce sont des dépôts d'environ 300 mètres de marnes grises à bancs de grès et à lentilles de galets plus ou moins cimentés.
- **Marin** : Il affleure au Nord Est de la plaine, dans la forêt de Louza. Il est constitué de grès, de marnes quelquefois à gypse.

d) L'Oligocène

L'Oligocène constitue l'essentiel des nappes de Tessala formant les reliefs Nord du Bassin versant. C'est un ensemble de marnes parfois gypseuses, grises avec quelques bancs de conglomérats à la base et de minces plaquettes de grès dans la partie supérieure.

e) L'Eocène

Il appartient aux nappes de charriage. Il affleure essentiellement à l'Ouest de Sidi Ali Boussidi et dans le Djebel Tinégmar. Il est constitué par un calcaire gris - bleu, à entroques, dur, massif, bien lité, percé de lapiez.

↓ Le Mésozoïque

Les formations du Mésozoïque affleurent au Nord du bassin au niveau des monts de Tessala et au Sud dans la zone des hauts plateaux. Le Mésozoïque est représenté par des formations carbonatés, gréseuses et argileuses d'âge Crétacé et Jurassique.

a) Le Crétacé moyen et supérieur

Cette formation allochtone affleure au Nord - Ouest du bassin versant sous forme de marnes salifères comprenant quelques bancs de calcaires.

b) L'Aptien

Il affleure au Sud de Caïd Belarbi à la faveur d'un horst. Il est constitué de calcaires microcristallins ou rognoneux gris - bleus appelés calcaires de Zigyne. Cette formation a une épaisseur d'environ 150 mètres.

c) Le Barrémien

Il n'affleure pas sur le bassin de la plaine mais a été reconnu par le forage de Baudens 1. C'est une formation puissante constituée essentiellement de grés roux admettant des intercalations d'argiles. Le sommet étant constitué de calcaires graveleux. Cette formation est appelée grés de Berthelot.

d) L'Hauterivien

C'est le membre calcaréo - gréseux du Zégla D. Il affleure au Sud - Est du bassin versant sous forme d'une épaisse formation de 150 mètres de calcaires graveleux et gréseux, de grés, avec, à la base un ensemble marneux à bancs calcaires.

e) Le Berriasien - Valanginien

C'est le membre marno - calcaire du Zéglia C de la formation des calcaires de Remaila. Il affleure au Sud - Est et au Sud - Ouest de la plaine. C'est un ensemble monotone de 120 mètres de marnes vertes et jaunes et de calcaires graveleux, zoogènes ou lumachelliques.

f) Le Portlandien

C'est le membre marno - calcaire du Zéglia B de la formation des calcaires de Remaila. Il affleure largement entre Sidi Ali Benyoub et Ain Tellout. D'une puissance de 200 mètres, il est constitué de bas en haut par des grès blancs, des marnes verdâtres, et des calcaires graveleux.

g) Le Kimméridgien Supérieur

C'est le membre calcaréo - dolomitique du Zéglia A de la formation des calcaires de Remaila. Ce membre est constitué dans son ensemble par une alternance de marnes gris - vert et de calcaires variés, souvent gréseux, en bancs massifs près de la base.

h) Le Trias

Des affleurements très localisés du Trias ont été observés aux environs de la localité de Zerouala, et à Sidi Bel Abbés à proximité de la gare ferroviaire de Sidi Bel Abbés. Le Trias est représenté par des argiles et des marnes bariolées multicolores, associées à du gypse, des dolomies bréchiques, des cargneules, et des ophites.

II.2.4.5-Tectonique :

A part l'important diapir triasique au Sud - Ouest, près d'Ain Tellout, la plaine est caractérisée par deux styles tectoniques différents (Benest, 1985) (figure 18):

Au Nord : Les phénomènes de charriage ont permis à l'Oligo - Miocène, avec à son front des lambeaux de calcaire Eocène, de recouvrir les terrains autochtones indifférenciés d'âge crétacé moyen et supérieur, ceux - ci reposant sur le miocène moyen marin anténappe.

Au Sud : Les terrains calcaires peu plastiques, légèrement ondulés, donnent un style tectonique cassant, accidents verticaux et subverticaux, sans doute le reflet des déformations du socle, découpant le massif suivant deux directions

Ouest Sud Ouest - Est Nord Est : Accidents effondrant, en marches d'escalier, le substratum Jurassico - Crétacé dans la plaine de Sidi Bel Abbés,

Est Sud Est - Ouest Nord Ouest : accidents obliques délimitant les panneaux en horst et grabens.

Une activité tectonique récente est attestée :

- Par les déformations du Miocène,
- Par une faille dont le rejet peut atteindre 10 mètres au contact pliocène continental Plio - Quaternaire,
- Par une faille à faible rejet dans les conglomérats quaternaires des terrasses de l'Oued Tissaf.

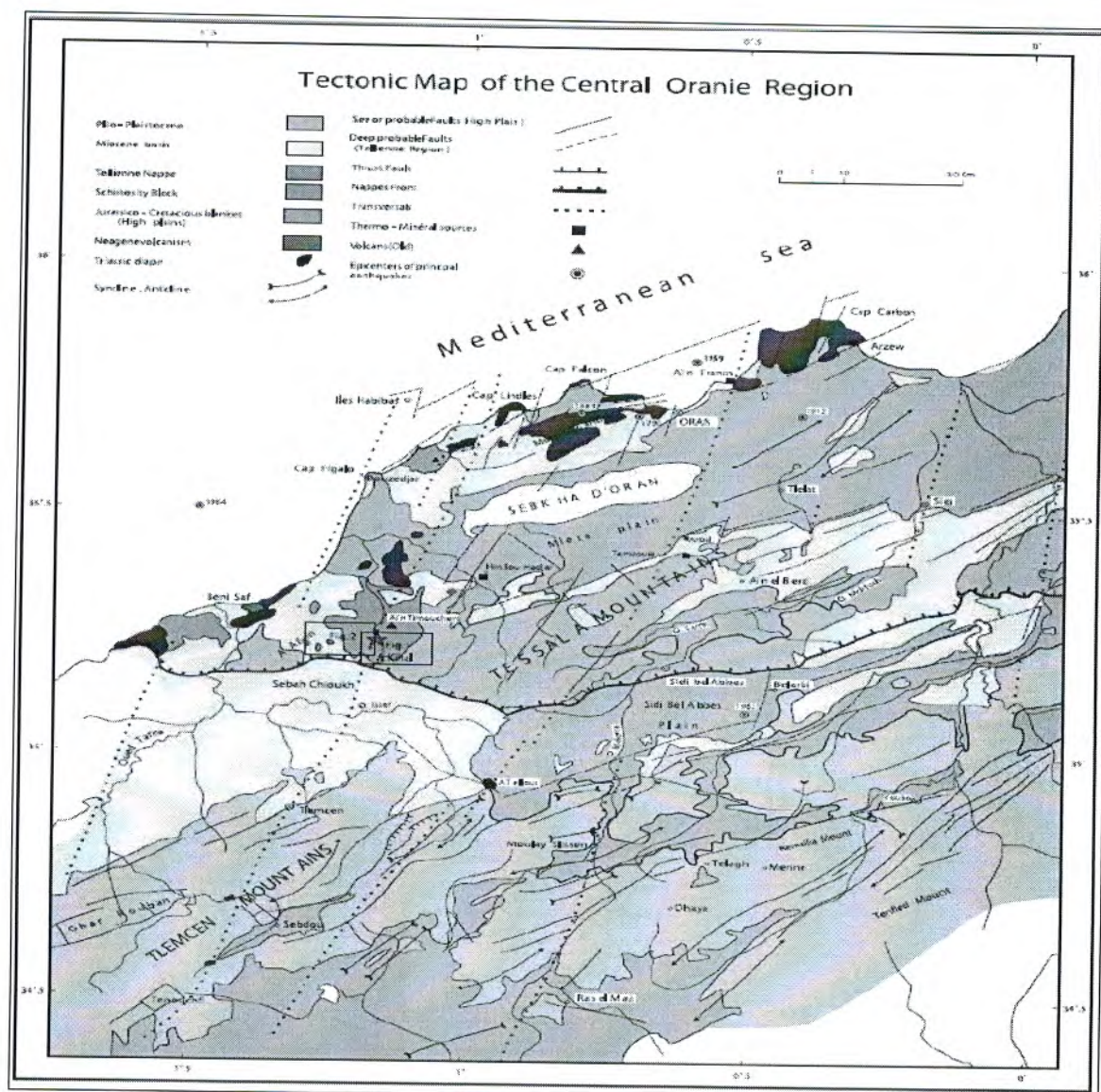


Figure 18: Carte tectonique de la région d'Oran

II.2.4.6-Contexte hydrogéologique :

Cette région d'étude est caractérisée par la présence de cinq aquifères à savoir :

La plaine alluviale Plio - quaternaire de Sidi Bel Abbès,

Les calcaires et dolomies Jurassico - Crétacés des monts de Sidi Ali Benyoub,

Les calcaires de Zigyne (Aptien) de la forêt domaniale de Belarbi,

Les calcaires éocènes de Sidi Ali Boussidi,

Les grès pliocènes de la forêt de Tenira,

La nappe du Plio - Quaternaire acquiert un intérêt particulier du fait que les autres horizons perméables sont en communication hydraulique, directe ou indirecte, avec celle - ci.

⚡ **Nappe des calcaires et dolomies Jurassico – Crétacés**

L'aquifère composé de deux ensembles perméables en grand (faciès dolomitique karstifié - dolomie de Tlemcen et faciès calcaires fissurés - calcaires de Remaila) est du point de vue hydrogéologique mal connu.

Les zones de bonne perméabilité sont probablement en contact par l'intermédiaire de nombreuses failles.

Grâce à une position haute, favorable à une bonne pluviométrie, cette nappe est bien alimentée. Les eaux infiltrées semblent ne pas gagner les panneaux effondrés sous la plaine de Sidi Bel Abbés mais des communications hydrauliques latérales peuvent s'établir par l'intermédiaire des cônes de déjection de conglomérats ou des dépôts argilo - gréseux de piémont de faible perméabilité.

Vers la plaine, la capacité d'écoulement des eaux, provenant des calcaires est réglée par la perméabilité des cônes conglomératiques. Les eaux qui ne peuvent s'écouler vers la plaine sont restituées par d'importantes sources pérennes, Ain Skhouna, Ain Mekhareg et Ain Tatfamane.

⚡ **Nappe des calcaires de Zigyne**

L'aquifère, formé de calcaires fissurés, a été capté par le forage de Caïd Belarbi (débit de 14l/s).

⚡ **Nappe des calcaires Eocènes :**

Les écailles de calcaires éocènes, posées sur les marnes du Crétacé supérieur et du Miocène marin, contiennent une nappe alimentée par son impluvium. Cette nappe est entièrement drainée par des sources dont les plus importantes sont : Ain El Hadjar, Ain Annefress et Ain Meddah. Une partie des eaux de ces sources (Ain El Hadjar et Ain Annefrees) est captée pour l'AEP, l'autre partie se déverse soit directement dans les alluvions, soit sur le Miocène marneux pour se ré - infiltrer ensuite dans les alluvions de l'Oued Annefress.

Cette nappe s'étend au Nord de l'unité (Djebels Touil et Sidi Daho).

⚡ **Nappe des grés Pliocènes :**

Cet ensemble argilo - gréseux, de faible perméabilité, contient une nappe discontinue qui alimente la nappe alluviale par l'intermédiaire de petites vallées étroites qui jouent le rôle de drain grâce à leur remplissage alluvionnaire. Ces grés, exclusivement alimentés par leur impluvium, sont caractérisés par des paramètres hydrauliques de faible valeur.

⚡ **Nappe du Plio – Quaternaire**

La nappe Plio – Quaternaire d'une superficie de 730 km² est contenue exclusivement dans les formations d'âge Plio – Quaternaire et quaternaire. Ces dernières remplissent la grande vallée de Sidi Bel Abbés et sont le siège d'un écoulement souterrain transitant principalement par les alluvions plus ou moins cimentées et les conglomérats des "Chenaux aquifères". L'ensemble de cet écoulement forme une nappe libre à l'exception de quelques niveaux conglomératiques du Chenal aquifère entre Sidi Khaled et Sidi Bel Abbés dans lesquels la nappe devient semi - captive.

L'alimentation de cette nappe se fait suivant trois processus :

- a. Alimentation directe par la pluie,
- b. Alimentation par les aquifères adjacents ; soit par infiltration latérale directe dans les alluvions et conglomérats des 'Chenaux aquifères', des eaux provenant des calcaires et dolomies Jurassico - Crétacés et des grès du pliocène ; soit par l'intermédiaire de sources (résurgences des calcaires et dolomies du jurassique supérieur et des calcaires de l'Eocène) dont les eaux s'infiltrent ensuite dans les alluvions et les conglomérats,
- c. Alimentation par les Oueds principalement en période de crue sauf pour l'Oued Mouzen (Tissaf) qui alimente constamment la nappe car la majeure partie des débits de cet Oued se réinfiltré dans la nappe particulièrement au niveau du chenal conglomératique près de Sidi Khaled.

III.2.4.7-Hydrodynamisme de la nappe de la plaine alluviale de Sidi Bel Abbés :

Les mesures des paramètres hydrodynamiques effectuées par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques permettent de distinguer (Sogreah, 1983; In Hallouche, 2007):

- a. Un large chenal traversant toute la plaine le long de l'Oued Mekerra, presque interrompu près de Boukhanéfis,
- b. Un chenal Nord Est - Sud Ouest suivant le cours des Oueds Bedrabine et Mouzen (Tissaf) et rejoignant le premier chenal près de Sidi Khaled.

Dans ces chenaux, les valeurs des transmissivités s'échelonnent de 5.10^{-3} à 10^{-2} m²/s dans certaines zones (Sidi Bel Abbés, Sidi Lahcen, Sidi Khaled, Lamtar, Bedrabine, Sidi Ali Benyoub).

En dehors de ces chenaux, il existe des zones isolées à bonne transmissivité, en particulier près de Caïd Belarbi, Chetouane, Tabia. Dans le reste de la plaine, les valeurs sont très faibles en raison de la composition argileuse du remplissage alluvionnaire.

Les fortes valeurs des coefficients d'emmagasinement correspondent aux zones de bonne transmissivité. Les zones à emmagasinement important (S = 20 %) sont : Vallée de Bedrabine ; Oued Lamtar ; Vallée de Tabia ; Vallée de Sidi Ali Benyoub. D'autres zones présentent des valeurs d'emmagasinement bon et de l'ordre de 10 % : Vallée le long de l'Oued Mekerra ; Vallée de l'Oued Annefress ; une partie Sud de la vallée de Caïd Belarbi.

Partout ailleurs les valeurs de 'S' sont inférieures à 2 ou 3 %. Les conglomérats profonds de la partie basse de la plaine, entre Sidi Khaled et le Rocher, montrent avec des valeurs inférieures à 10^{-2} , qu'une partie de la nappe devient semi - captive.

CHAPITRE III

ETUDE DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MEKERRA

III.1-Introduction :

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté mondiale à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs impacts sur les ressources en eau. Parmi elles, on peut citer la sécheresse qui a affecté les pays du Maghreb, et l'Algérie en particulier, depuis les années 1970 (Laborde, 1993 ; Haida *et al.*, 1999 ; Meddi, 2001 ; El Mahi, 2002 ; Meddi et Hubert, 2003 ; El Mahi *et al.*, 2004 ; Ketrouti *et al.*, 2004 ; Talia et Meddi, 2004 ; Kingumbi, 2006 ; Meddi , 2007 ; Laftouhi et Persoons, 2007 ; Lahache et Pillet, 2008 ; Bekkoussa *et al.*, 2008).

Le régime hydrologique du bassin versant de la Macta est marqué par une forte irrégularité d'écoulement, tant saisonnière, qu'annuelle. Les crues sont rapides, souvent violentes mais peu durables (inondations catastrophiques de la région de Sidi Bel Abbés) et elles représentent un apport liquide près de 80% du totale annuel. Quant à l'écoulement superficiel, les potentialités en eau sont évaluées à plus de 260Hm³, repartis entre 70 Hm³ pour le bassin de la Mekerra et 190 Hm³ pour le bassin d'El Hammam qui draine la partie orientale la plus arrosée du bassin.

Par contre, les transports solides sont considérables du fait de deux facteurs naturels essentiels, d'une part l'irrégularité des écoulements et, d'autre part, la violence des crues

Le bassin de la Macta est contrôlé par :

- 120 stations Pluviométriques.
- 05 stations Climatologiques.
- 24 stations Hydrométriques.

Les précipitations, qui sont le facteur principal de l'alimentation des cours d'eau, ont une influence sur la variabilité des écoulements à toutes les échelles de temps. 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 la Mekerra.

III.2-Etude des précipitations :

La pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P. Seltzer, 1913-1938, H. Gausson, 1918-1947, M. Chaumont et C. Paquin, 1913-1963). La plupart des stations de mesures ont cessé de fonctionner pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autre part de nombreuses stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien et leurs données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente (1970-2006). L'intérêt et le but de cette série et de permettre la confrontation avec l'écoulement correspondant afin de dégager une étude hydro pluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin.

Pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et déceler l'anomalie qui pourrait les

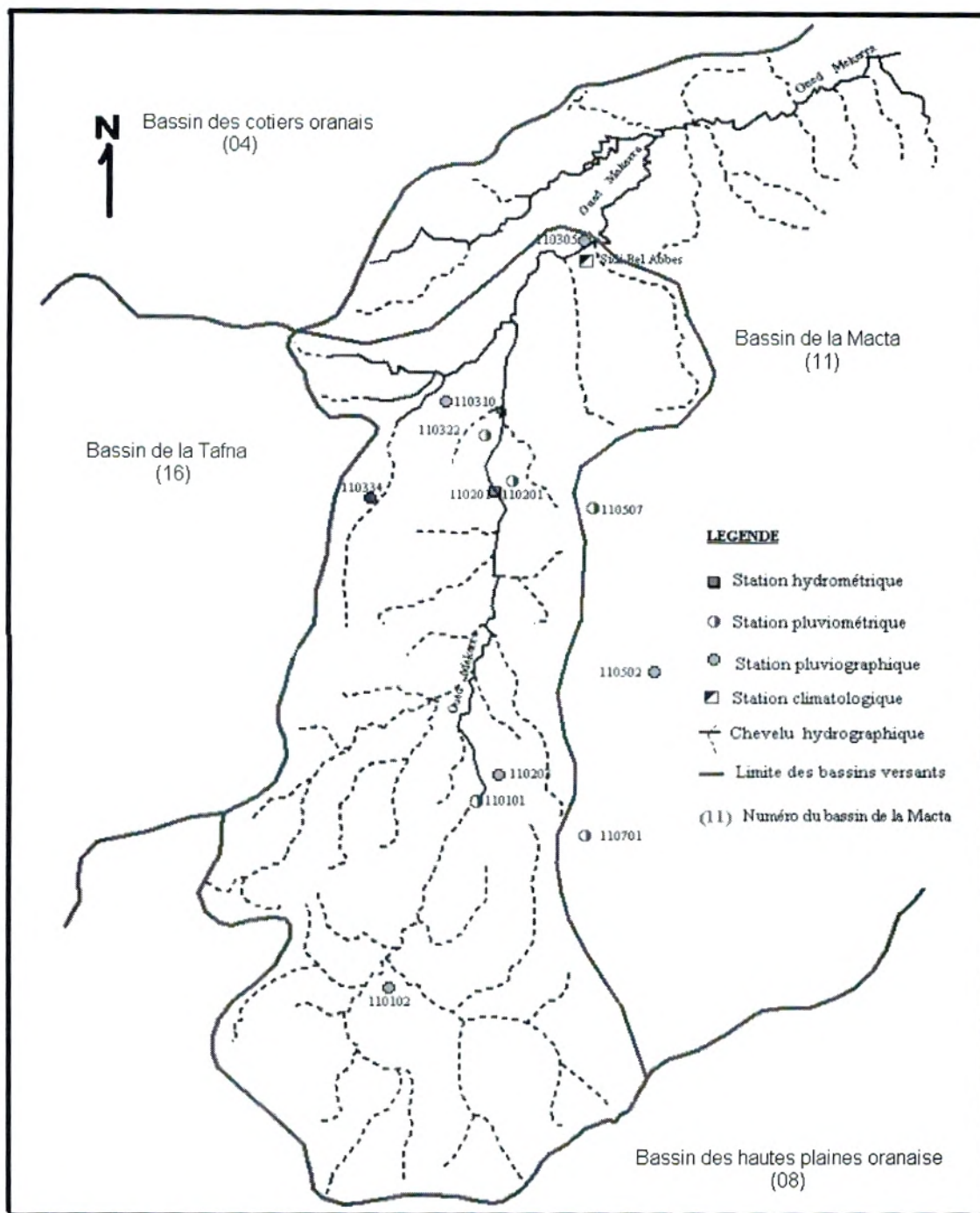


Figure 19: Localisation des stations hydro climatologiques

III.2.1-Variations annuelles des précipitations :

Selon les données obtenues, l'étude de la pluviométrie du bassin est basée sur les données de trois stations disposées de l'amont vers l'aval : El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub, et Sidi Bel Abbés, en considérant les années climatiques (du 1^{er} septembre au 31 août), (annexe).

Les précipitations annuelles (figure 20) varient de l'amont à l'aval avec une moyenne de précipitation est de 284.40 mm à la station d'El Haçaïba, 336,81mm à Sidi Ali Benyoub et de 322.8 mm à la station de Sidi Bel Abbés.

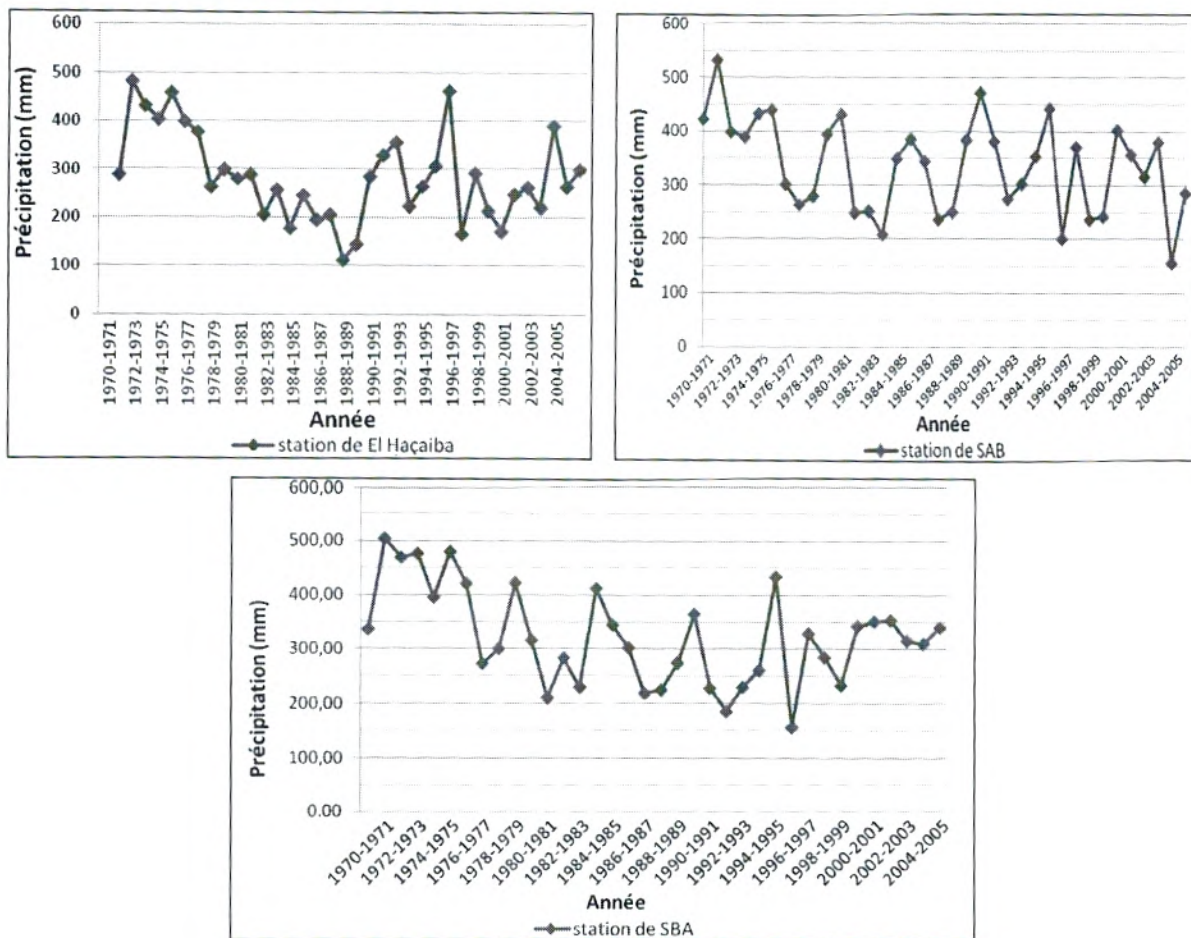


Figure 20 : Variations annuelles des précipitations

III.2.2- Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité :

Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui a un rôle essentiel et décisif sur l'écoulement fluvial et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer des variables réduites.

-Test de khi 2

Test erreurs =5%	Khi 2 calculé	Khi 2 théorique	
		Loi normal	Loi log-normal
Station d'El Haçaïba	2.09	7.81	5.99
Station Sidi Ali Benyoub	1.75		
Station Sidi Bel Abbés	1.44		

Selon les résultats de calcul on doit remarquer que la loi normal et log-normal s'ajustent bien pour les séries des trois stations.

Test graphique :

Le test graphique montre que la distribution de Rayleigh s'ajuste mieux que les autres types de distributions et cette distribution est applicable pour les séries de données des trois stations. (figure 21)

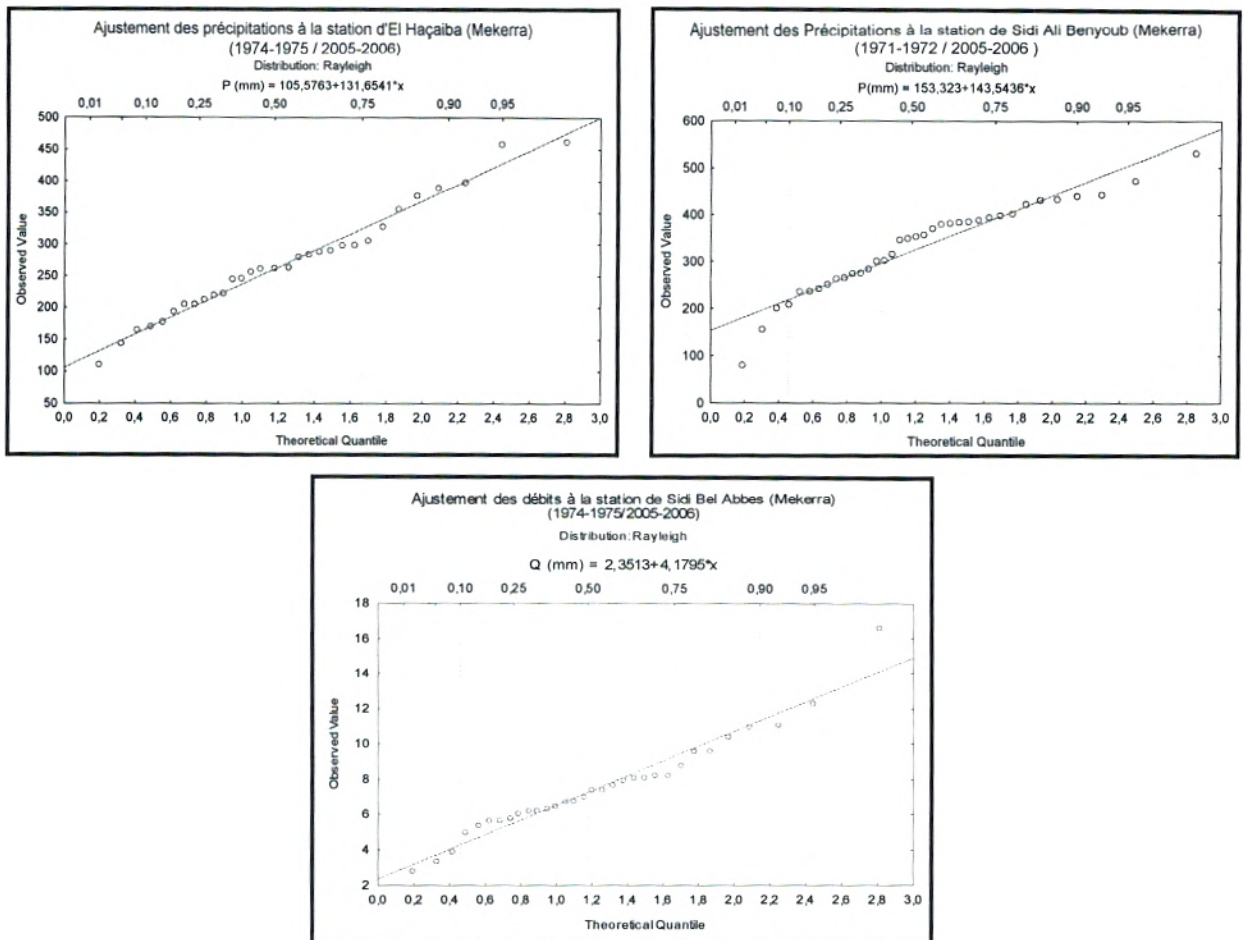


Figure 21 : Ajustement des précipitations annuelles à la loi de distribution de Rayleigh

III.2.3-Variations mensuelles des précipitations :

D'après la figure 22, les variations mensuelles des précipitations montrent que la période allant du mois de septembre jusqu'à mai est plus humide que les mois de juin, juillet et aout.

Ces variations mensuelles des précipitations varient de l'amont vers l'aval, en effet plus on se dirige vers l'aval du bassin de Mekerra plus les précipitations mensuelles augmentent.

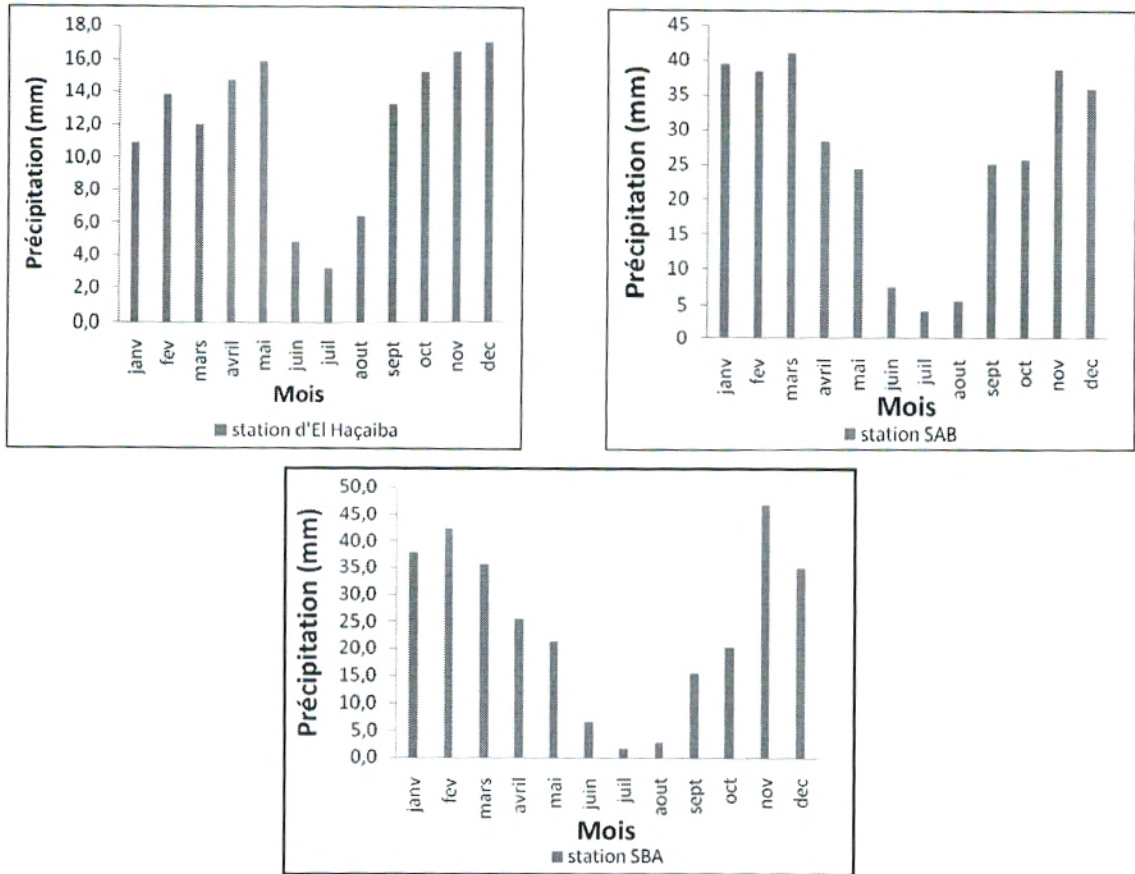


Figure 22 : Variations mensuelles des précipitations

III.2. 4-Variations saisonnières des précipitations :

L'hiver est la saison la plus humide tout le long du bassin versant avec une sécheresse en période d'été. (Figure 23). Toutefois, nous remarquons pour les trois stations présente une période relativement regroupant les saisons d'automne, hiver et printemps et une saison sèche représenté par l'été.

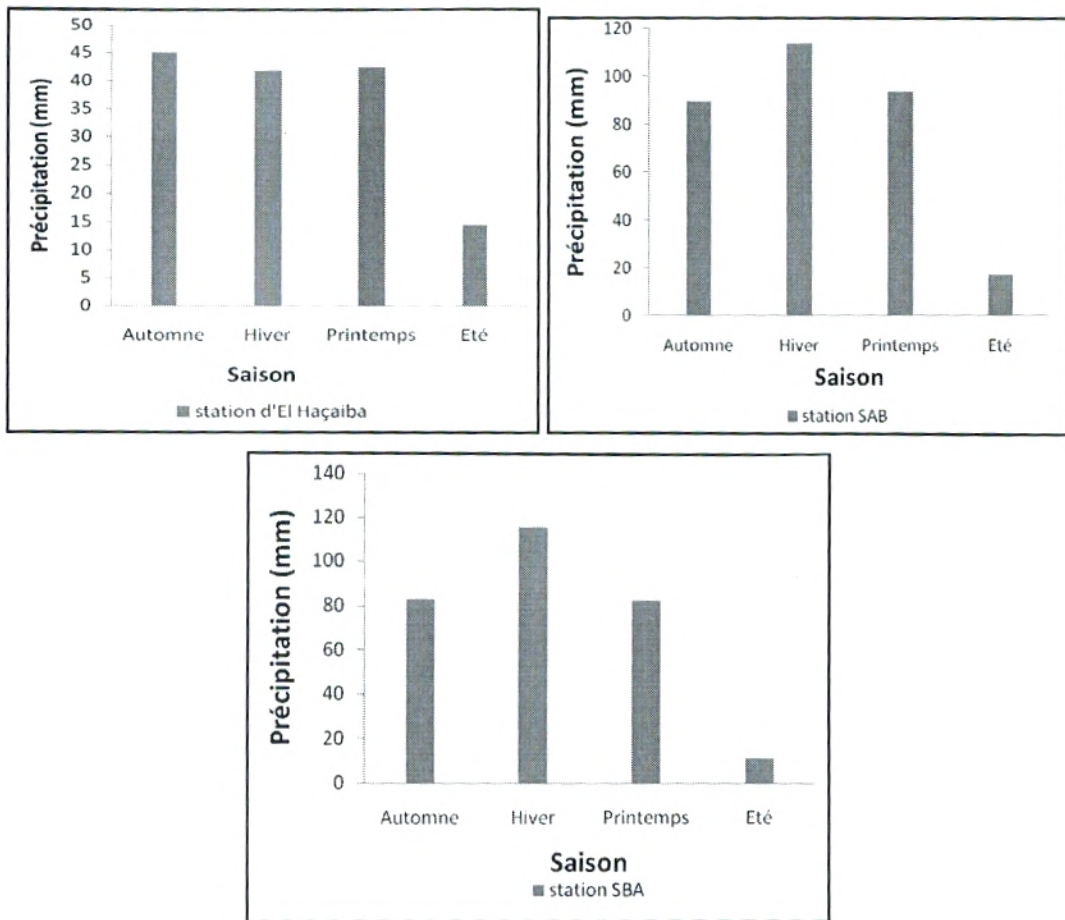


Figure 23: Variations saisonnières des précipitations

III.3-Etude des écoulements :

La variable étudiée est la lame d'eau écoulee enregistrée au niveau des différentes stations.

Les données hydrométriques proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques qui gère huit stations sur le bassin de la Macta, dont trois sur celui de l'oued Mekerra. (Figure 12).

Tableau 12 : Caractéristiques des stations hydrométriques

Code	Nom de la	Coordonnées Lambert	
		X	Y
110201	Sidi Ali Benyoub (SAB)	186,55	192,20
110101	El Haçaïba	183,7	161,35
110305	Sidi Bel Abbés (SBA)	199,07	219,75

III.3.1-Variations annuelles des écoulements :

Selon les données obtenues, l'étude d'écoulement du bassin est basée sur les données de trois stations disposées de l'amont vers l'aval : El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub, et Sidi Bel Abbés, en considérant les années hydrologiques (du 1^{er} septembre au 31 août), (annexe).

Les variations annuelles des lames d'eau écoulées (figure 24) varient de l'amont à l'aval avec une moyenne de 4,58 mm à la station d'El Haçaïba, 8,77 mm à Sidi Ali Benyoub et 7,56 mm à la station de Sidi Bel Abbas.

Cela explique que les données hydrométriques varient d'une station à l'autre selon la superficie du sous bassin et de l'intensité des précipitations. A El Haçaïba la surface est de 955 km² ; elle est de 1980 km² à Sidi Ali Benyoub et 3000 km² à Sidi Bel Abbas.

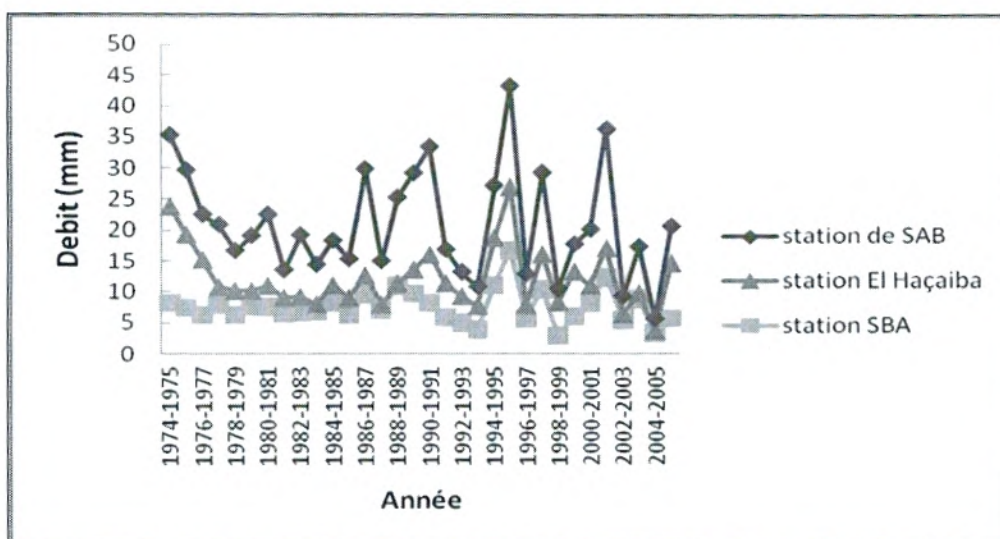


Figure24 : Variations annuelles des débits

III.3.2- Ajustement des débits annuels à une loi de probabilité :

Selon les données, on va essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des lames écoulées annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement.

Test de khi 2

Test erreurs =5%	Khi 2 calculé	Khi 2 théorique	
		Loi normal	Loi log-normal
Station El Haçaïba	0.69	9.49	7.81
Station Sidi Ali Benyoub	2.05	9.49	7.81
Station Sidi Bel Abbés	2.13	9.49	7.81

Test graphique

Le test graphique montre que la distribution Gamma s'ajuste mieux que les autres types de distributions, cette distribution est valable pour les séries de données des trois stations.(figure 25)

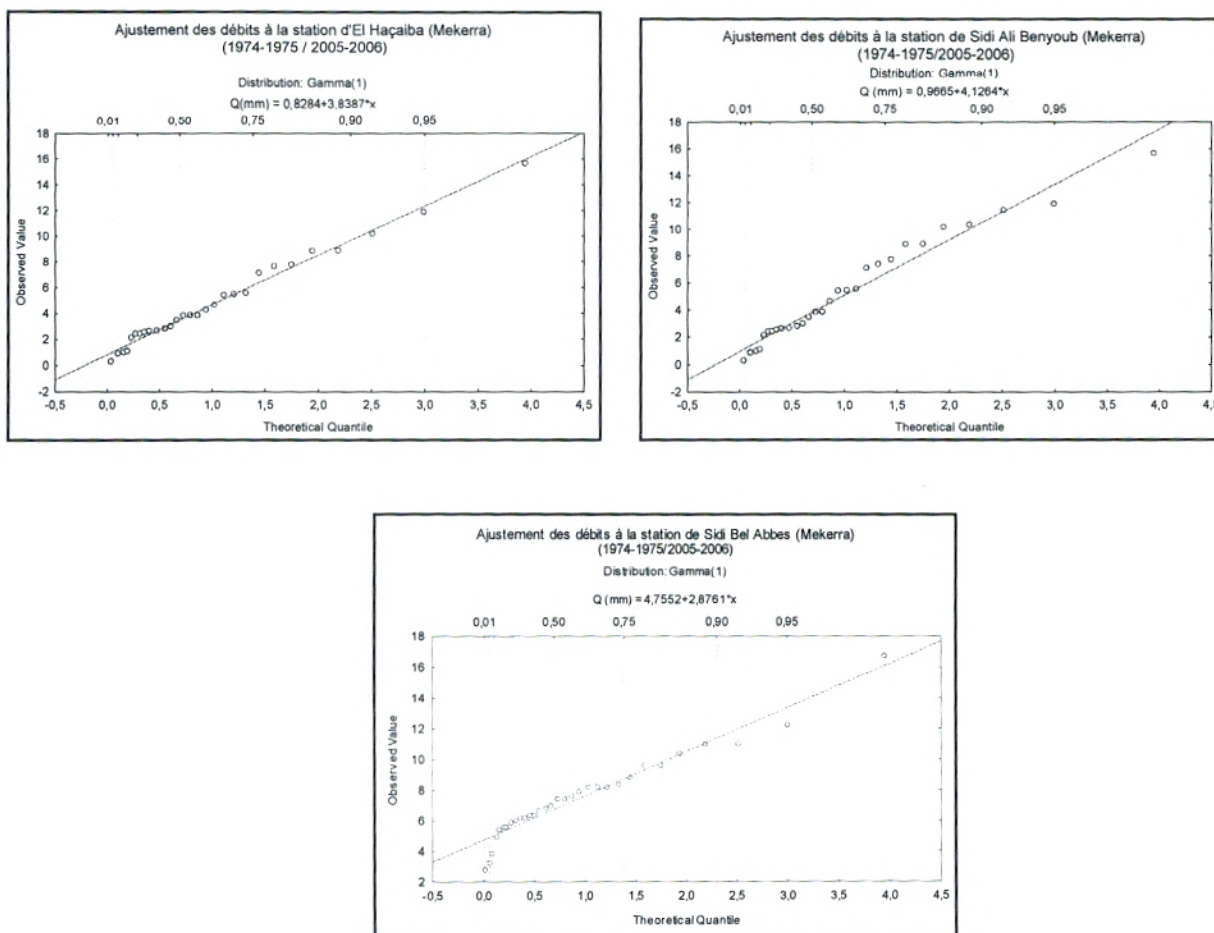


Figure25 : Ajustement des lames d'eau écoulées annuelles à une loi normal

III.3. 3-Variations mensuelles des lames d'eau écoulées :

Les mêmes variations des débits (lames d'eau) moyens mensuelles s'observent au niveau des stations d'El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes avec un maximum au mois d'octobre et secondairement en septembre (figure 26).

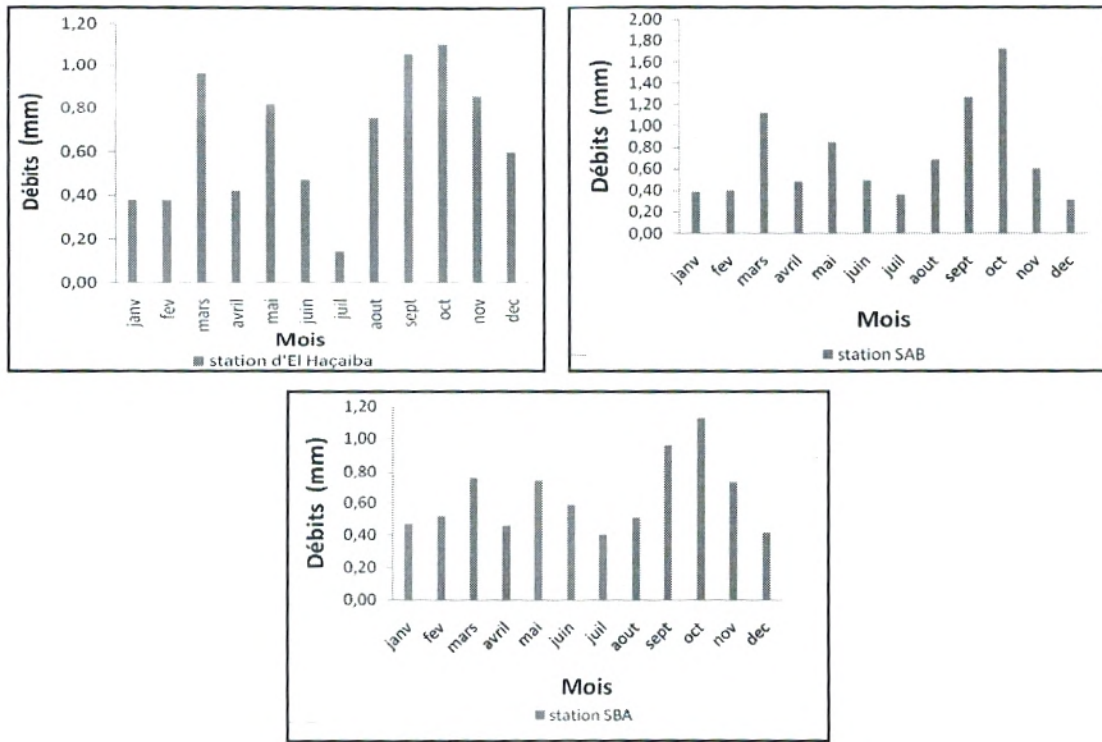


Figure 26: Variations mensuelles des lames d'eau écoulée

III.3.4-Variations saisonnières de débit :

Dans les trois stations c'est l'automne et au printemps que s'effectuent l'essentiel des écoulements (plus de 70% du total annuel). (Figure 27). Le maximum de la lame d'eau écoulée est enregistré en automne, cela explique la présence des pluies orageuses durant cette saison.

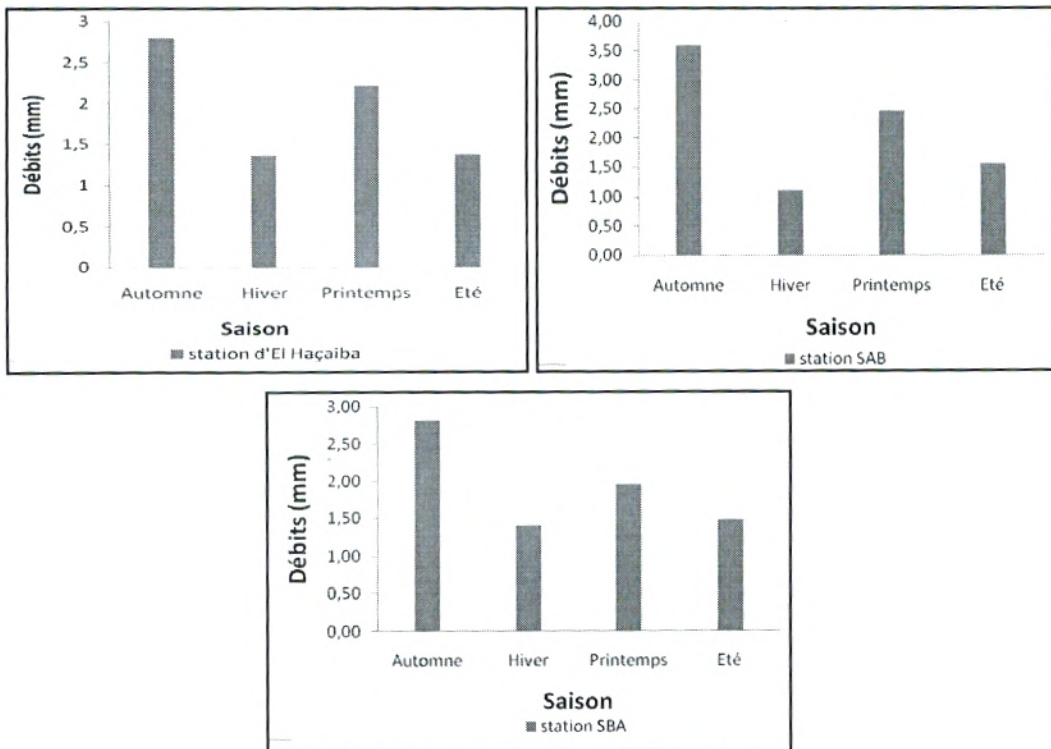


Figure27 : Variations saisonnières des lames d'eau écoulée

III.4-Evapotranspiration :

L'évapotranspiration potentielle est un des termes majeurs du bilan hydrologique en relation directe avec le climat caractéristique.

III.4.1-Evapotranspiration réelle ETR :

C'est la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur d'eau par une surface ou un couvert végétal, exprimée généralement en mm/jour.

L'ETR dépend :

- de la culture considérée,
- du stade phénologique de cette culture,
- du contenu en eau du sol,
- des conditions météorologiques observées.

III.4.2- Evapotranspiration potentielle ETP :

C'est une valeur de l'évapotranspiration maximale de référence pouvant représenter la demande climatique. On la définit comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, contenu et homogène dont l'alimentation en eau n'est pas limitant et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

L'ETP trouve une large utilisation dans plusieurs domaines de l'agriculture et de l'hydrologie tels que la modélisation hydrologique.

L'Evapotranspiration Potentielle (ETP) est une variable climatique d'entrée qu'exploitent la grande majorité des modèles pluie-débit fonctionnant en continu. Intuitivement, il est naturel de vouloir prendre en compte l'évapotranspiration, qui représente une perte en tout début du cycle de l'eau, et qui conditionne l'évolution dans le temps de l'état d'humidité du bassin, et donc de sa réponse à la pluie. Mais, au contraire de la pluie, l'ETP n'est pas directement mesurable et sa détermination passe elle-même par un modèle.

De nombreux auteurs ont cherché à établir des expressions reliant l'ETP aux éléments du climat. Certaines formules résultent d'ajustement statistiques (Thorntwaite, Blaney-Cridde, Turc, Espinar, Riou,...), d'autres résultent d'un raisonnement physique basé sur le bilan énergétique sous certaines hypothèses (Penman, Bouchet, Brochet-Gerbier, Penman-Monteith).

III.4.3- La formule de Turc (1955)

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

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 : I_{gA} 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 on a utilisé le programme élaboré par (Benadda, 2000).

III.4.4-La formule de Thornthwaite (1948; 1955)

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle de Thornthwaite, valable pour le mois m, est donnée par la formule suivante en m.j-l :

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

où

ETP : Evapotranspiration potentielle (cm)

t : température moyenne mensuelle en °C

I : est l'indice thermique annuel ; il est égal à la somme des 12 indices thermiques mensuels

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.714}$$

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

Sur le plan de l'évapotranspiration, on s'intéressera à l'évapotranspiration calculé par l'application des formules de Turc et Thornthwaite. Ces calculs sont réalisés par l'utilisation d'une série de températures moyennes annuelles et mensuelles.

CHAPITRE IV

MODELISATION PLUIE - DEBIT

IV.1-Modélisation par corrélation :

IV.1.1- Corrélation annuelle :

Avant l'application du modèle Génie Rural annuelle et mensuelle nous avons essayé une corrélation simple entre les précipitations et les lames d'eau écoulées pour une série de données de (1968-1969/1993-1994) et ce pour les trois stations du bassin de la Mekerra.

Le tableau13 montre les résultats du coefficient de détermination et la modèle qui relie les paramètres pluies – débits.

Tableau13 : Représentation les différentes types de régression du trois stations

Type de régression	Station de Haçaïba	Station de Sidi Ali Benyoub	Station de Sidi Bel Abbes
Linéaire	$Q=0,01 P -0,22$ $R^2=0,24$	$Q=0,036P -2,42$ $R^2=0,50$	$Q=0,036P-2,90$ $R^2=0,60$
Exponentielle	$Q=0,47e^{0,005P}$ $R^2=0,33$	$Q=2,57e^{0,0037P}$ $R^2=0,43$	$Q=2,38e^{0,0038P}$ $R^2=0,56$
Logarithmique	$Q= 2,79 \ln(P) - 12,86$ $R^2=0,20$	$Q= 11,63 \ln(P) - 57,53$ $R^2=0,45$	$Q=11,02 \ln(P) -54,52$ $R^2=0,53$
Polynomial	$Q=4.10^{-5}P^2-0,0174P+3,72$ $R^2=0,29$	$Q=0,0001P^2-0,0891P+18,59$ $R^2=0,59$	$Q=0,0002P^2 -0,083P+16,19$ $R^2=0,71$
Puissance	$Q=0,0003P^{1,5565}$ $R^2=0,36$	$Q=0,0092P^{1,1863}$ $R^2=0,39$	$Q=0,0095P^{1,1731}$ $R^2=0,51$

Pour les trois stations la modélisation par corrélation des données annuelles donne des coefficients de corrélation moyens quelques soit le type de relation choisi. En effet, nous obtenons pour les stations Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes des valeurs comprises entre 0,60 et 0,80, pour El Haçaïba les valeurs sont faibles, il faut voir là l'effet du pas de temps pris pour cette corrélation. En effet, la région stepmique de Haçaïba est caractérisée par un climat semi-aride à aride avec des pluies très irrégulières et orageuses qui provoquent des écoulements brefs et temporaires après les averses. Aussi, en raisonnant annuellement les débits (sorties) peuvent ne pas correspondre aux précipitations (entrées) du système.

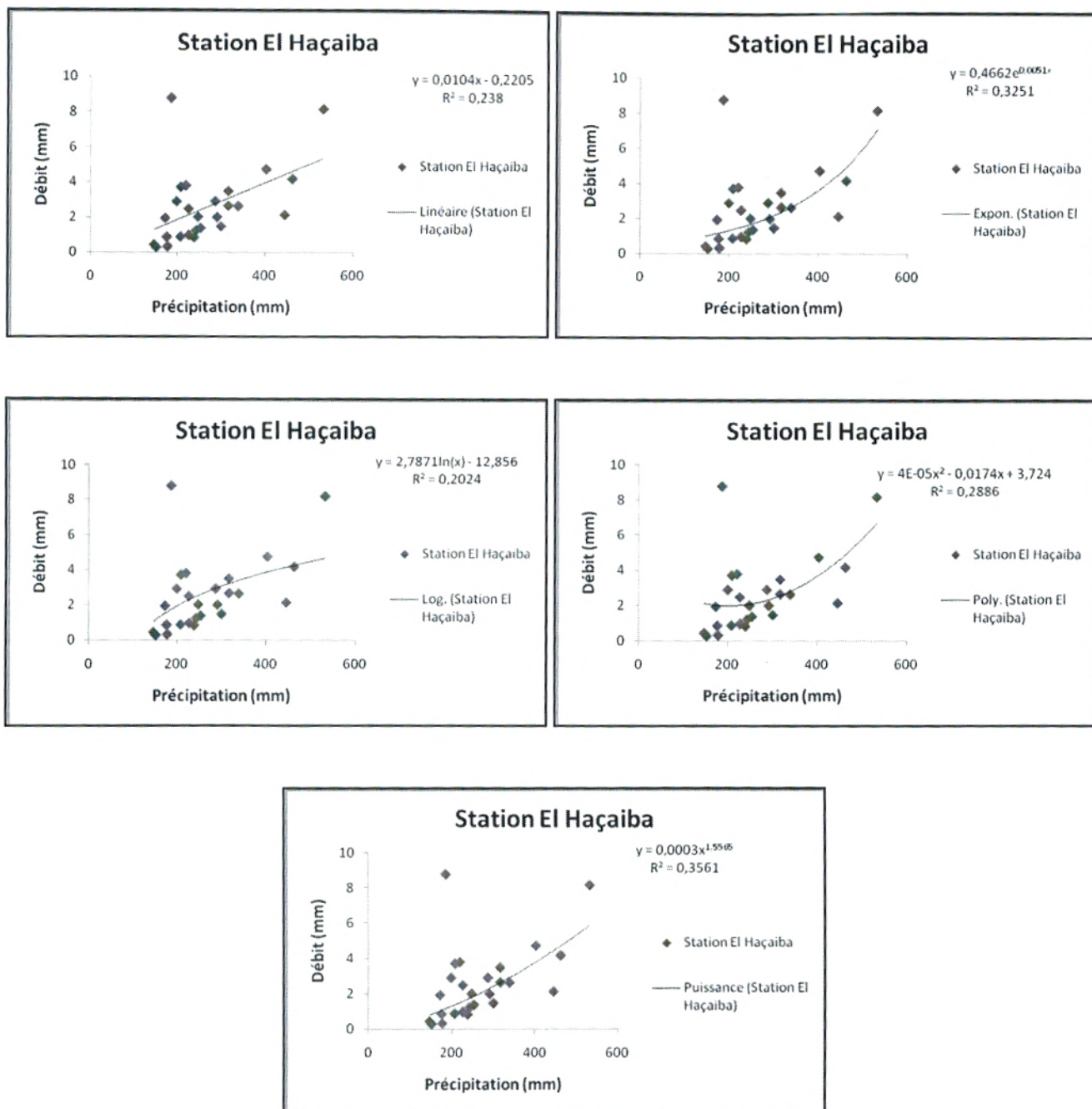


Figure 28: Corrélation pluie –débit de la station d’El Haçaïba

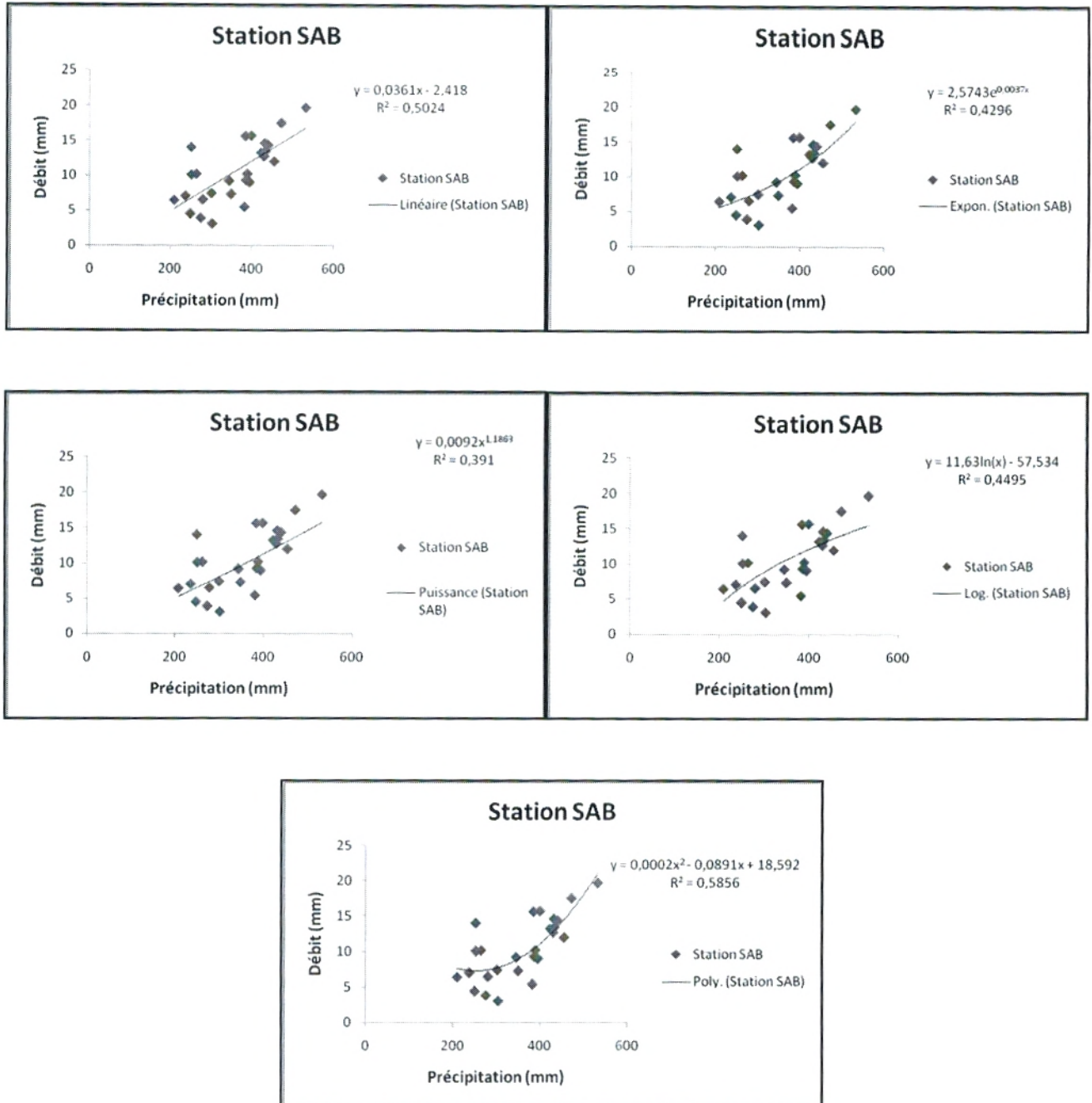


Figure 29: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Ali Benyoub

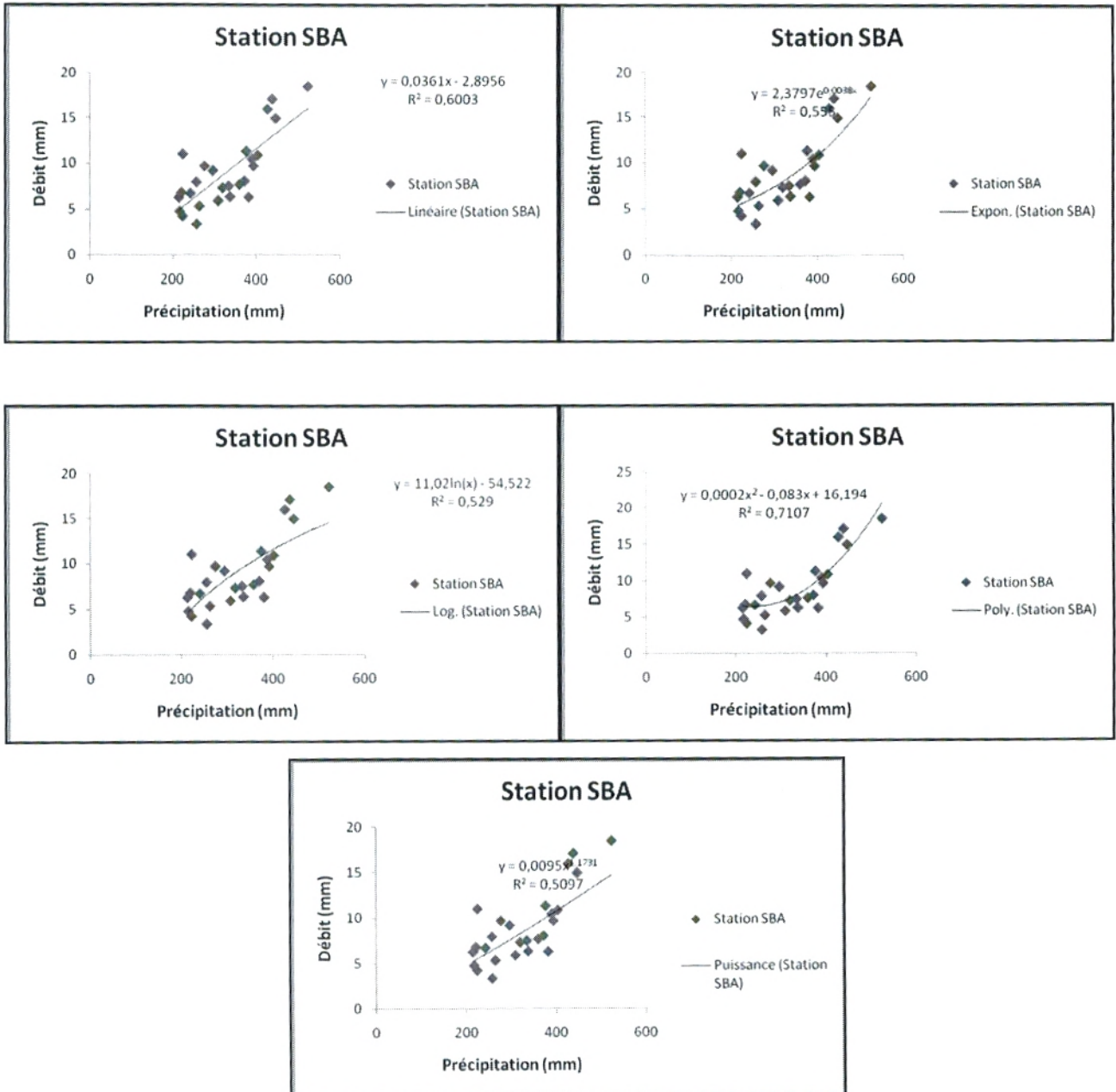


Figure 30: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Bel Abbas

IV.1.2- Corrélation mensuelle :

Nous avons utilisé, des séries de données mensuelles de janvier 1990 jusqu'à décembre 2001 pour les trois stations, El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes.

Tableau14 : Représentation les différentes types de régression du trois stations

Type de régression	Station de Haçaïba	Station de Sidi Ali Benyoub	Station de Sidi Bel Abbes
Linéaire	$Q=0,02 P -0,12$ $R^2=0,27$	$Q=0,022P+,-0,08$ $R^2=0,23$	$Q=0,019 P+0,34$ $R^2=0,14$
Logarithmique	$Q= 0,22 \ln(P) - 0,03$ $R^2=0,05$	$Q= 0,24 \ln(P) + 0,13$ $R^2=0,05$	$Q=0,186 \ln(P) + 0,36$ $R^2=0,045$
Exponentielle	$Q=0,09e^{0,09P}$ $R^2=0,22$	$Q=0,23e^{0,015P}$ $R^2=0,22$	$Q=0,32e^{0,011P}$ $R^2=0,061$
Polynomial	$Q=0,0003P^2-0,02P+0,49$ $R^2=0,45$	$Q=0,0003P^2+0,017P+0,07$ $R^2=0,38$	$Q=0,0005 P^2 -0,0225P+0,82$ $R^2=0,25$
Puissance	$Q=0,075P^{0,299}$ $R^2=0,096$	$Q=0,18P^{0,27}$ $R^2=0,13$	$Q=0,32P^{0,123}$ $R^2=0,025$

Pour les trois stations la modélisation par corrélation des données mensuelles donne des coefficients faibles quelques soit le type de relation choisis (Tableau 14). (Figure 31, 32, 33).

En effet, nous obtenons pour les stations El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes des valeurs du coefficient de corrélation comprises entre 0,30 et 0,40.

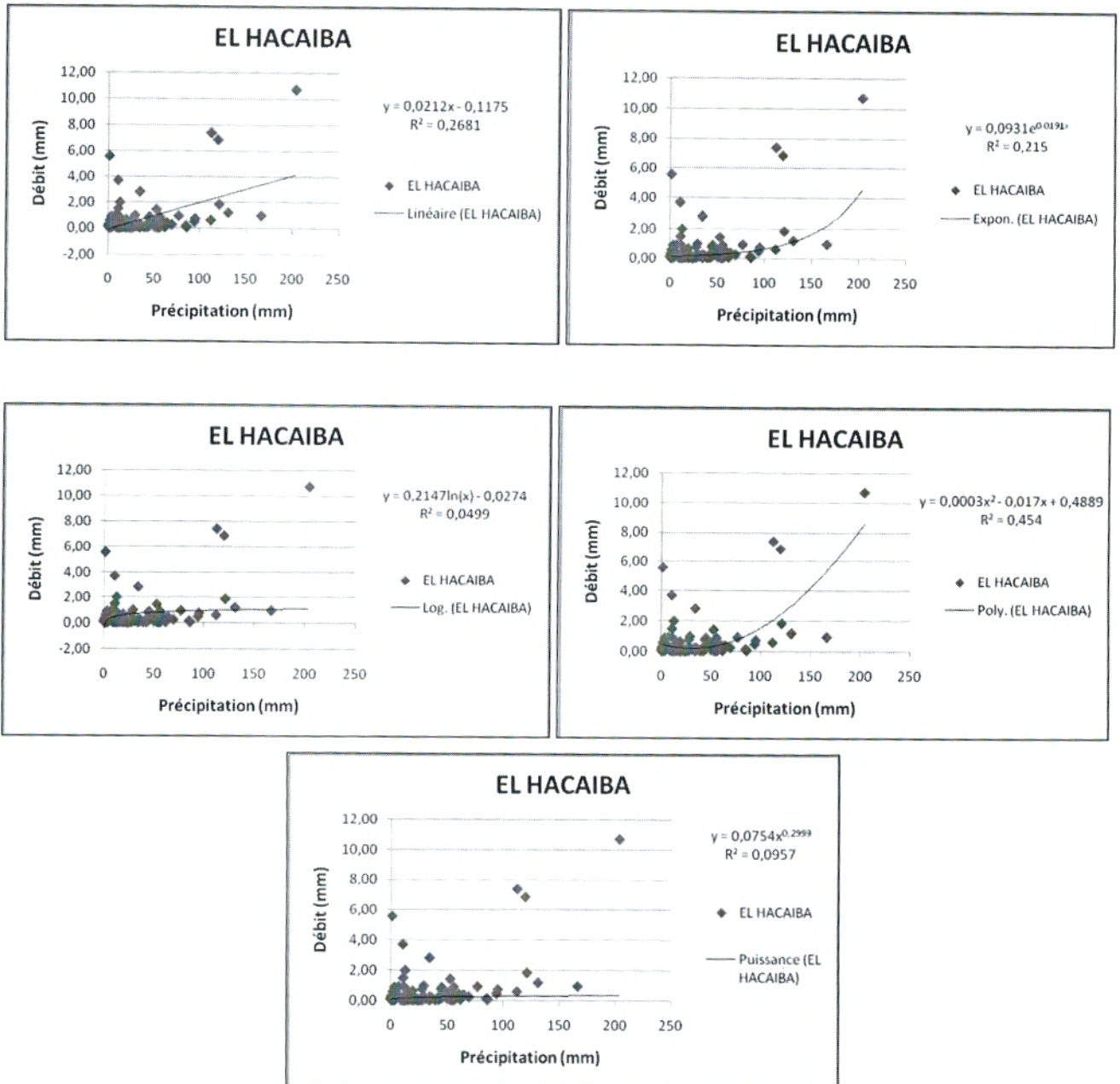


Figure 31: Corrélation pluie –débit de la station d’El Haçaïba

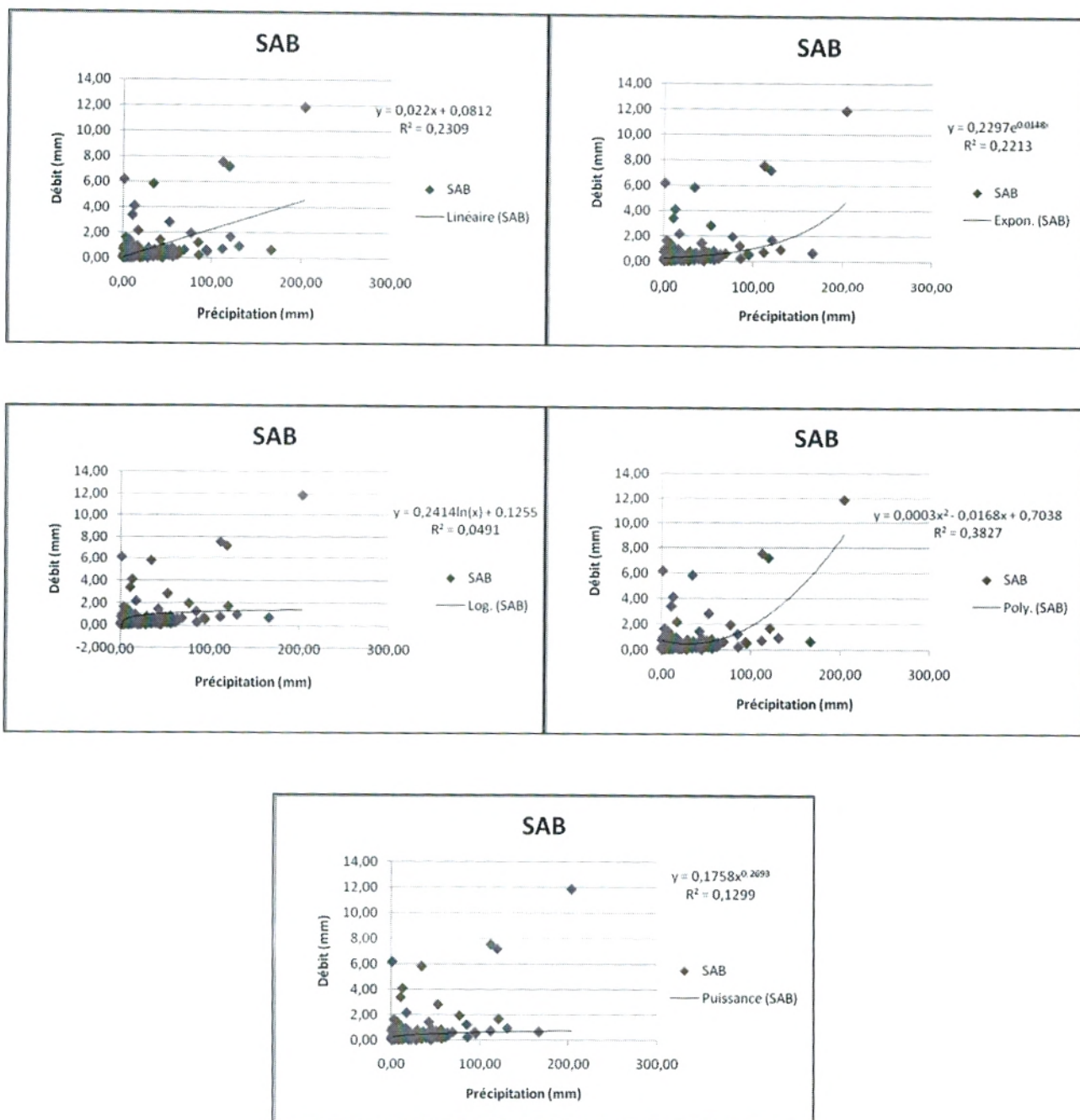


Figure 32: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Ali Benyoub

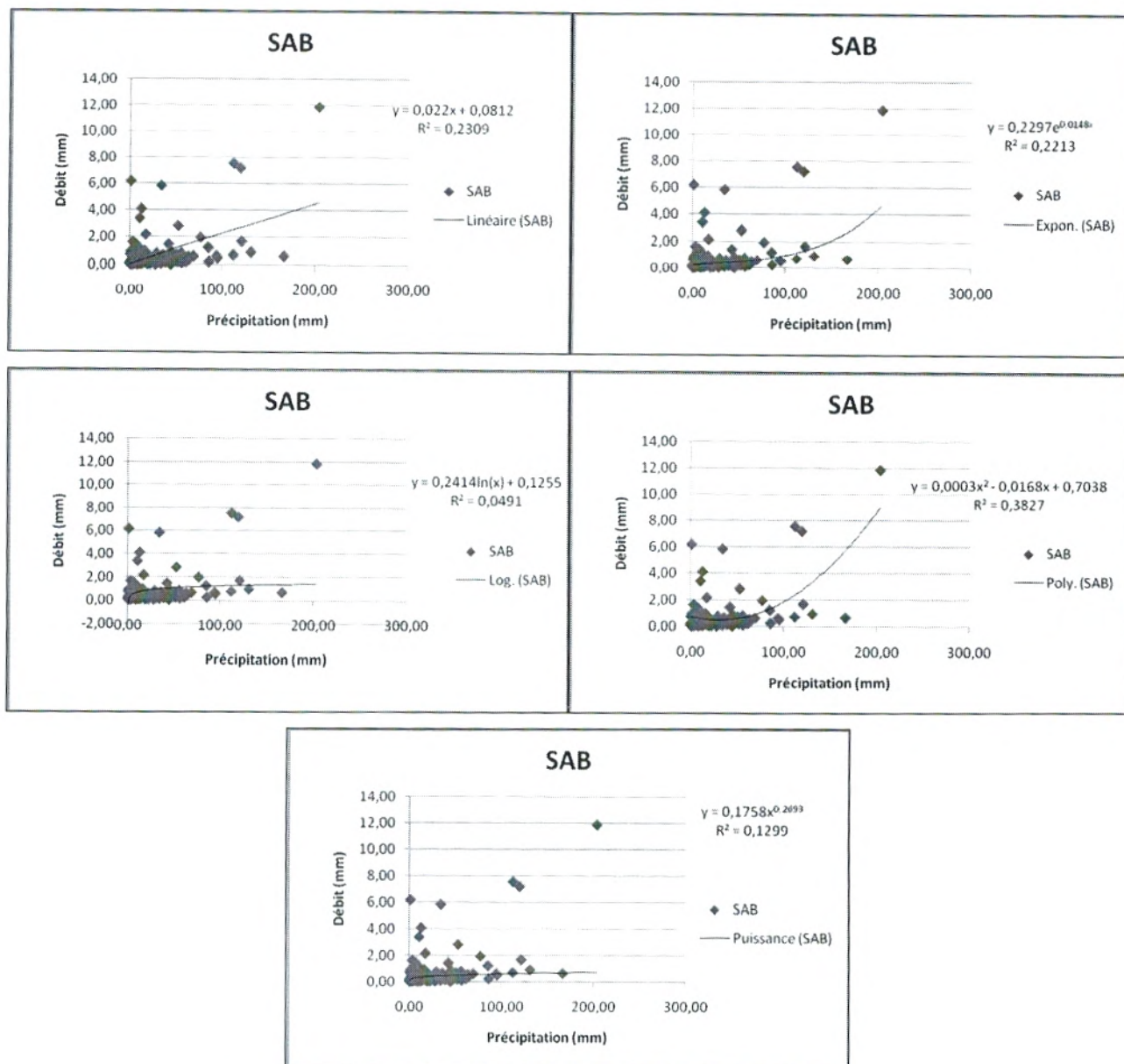


Figure 33: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Bel Abbas

Les modèles corrélatives semblent mal appropriés pour la modélisation pluie-débit du fait que ces modèles ne tiennent pas compte des paramètres qui régissent l'écoulement en particulier dépendance chronologique des débits successifs avec les pluies de la période k et $k-1$; de même qu'il ne prend pas en compte les phénomènes d'échanges avec l'atmosphère ou les bassins voisins.

Ces pour ces raisons que nous avons choisi pour la modélisation pluie –débit un modèle à réservoir (GR) qui tient compte aussi bien du pas de temps choisi ainsi que d'autres paramètres d'échange entre le bassin et l'atmosphère d'une part et entre les bassins voisins entre eux d'autre part.

IV.2-Modélisation de la relation pluie-débit par l'utilisation du modèle GR :

Les modèles hydrologiques pluie-débit se révèlent généralement des outils difficiles à utiliser, tant pour un hydrologue non spécialiste de la modélisation que pour un non informaticien. Ils demandent en effet, très souvent, des manipulations de fichiers longues et fastidieuses ainsi que la connaissance approfondie du programme et de son langage de programmation.

En outre, les résultats obtenus sont rarement exploitables directement, et il faut fréquemment avoir recours à l'aide externe de tableurs graphes ou de logiciels de traitements statistiques.

Or, les modèles hydrologiques sont 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.

La question qui se pose concrètement est de savoir si, oui ou non, l'amélioration de la prise en compte de la donnée de l'évapotranspiration dans la modélisation de la relation pluie-débit met en évidence une différence notable au niveau de la fonction critère, donc, ici, du Nash.

IV.2-1 Modélisation de la relation pluie-débit par le modèle annuel GR1A :

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global, a 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.

Trois données d'entrée alimentent la modélisation, les données motrices du cycle de l'eau (précipitation et évapotranspiration) et les observations hydrométriques de référence (données de débit).

Pour cela nous avons utilisé les données de pluies (mm) et débits (mm) relatives aux périodes (1968-1969/1993-1994) et mesurées aux niveaux des stations El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes (annexe II).

Pour l'évapotranspiration, nous avons essayé d'entrer une évapotranspiration calculée par la méthode de Turc et celle calculée par la méthode de Thornthwaite (tableau 1 ; annexe II).

-Calage du modèle :

Nous avons donc cherché à caler le paramètre X_1 du modèle, en ayant comme point de départ, une valeur fixée à 0.2, et en modifiant ce paramètre, pour les trois sous bassins, jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash avec une valeur égale ou supérieur à 70% et un coefficient de corrélation plus acceptable.

Ces calculs sont fait pour trois stations du bassin versant de la Mekerra, de l'amont vers l'aval : station El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 15.

Tableau 5 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A

Données annuelles	ETP (Turc)				ETP (Thornthwaite)			
		Nash	Bilan	Coefficient de corrélation		Nash	Bilan	Coefficient de corrélation
El Haçaïba	$X_1=2,33$	80%	94%	0,92	$X_1=1,84$	79,3%	86,2%	0,90
Sidi Ali Benyoub	$X_1=1,72$	75,5 %	96,1%	0,87	$X_1=1,34$	70,1%	93,5%	0,84
Sidi Bel Abbes	$X_1=1,67$	74,7%	90,5%	0,92	$X_1=1,26$	74,4%	91,6%	0,90

D'après ces résultats et la superposition des deux graphes, des débits simulés et calculés pour les stations d'El Haçaïba (figure 34-35), Sidi Ali Benyoub (figure 36-37) et Sidi Bel Abbes (figure 38-39), nous pouvons dire que les modèles sont calés, toutefois l'évapotranspiration résultant de la formule de Turc donnent de meilleurs résultats que celle de Thornthwaite.

Selon le coefficient de correction de l'évapotranspiration X_1 , nous remarquons que ce paramètre diminue de l'amont vers l'aval tout au long du bassin de l'oued Mekerra c'est-à-dire plus en allant vers la station d'El Haçaïba plus le taux de l'évapotranspiration augmente, avec une valeur supérieure à 1. Le paramètre X_1 traduit les échanges avec des nappes profondes d'où une infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout le long de l'oued Mekerra.

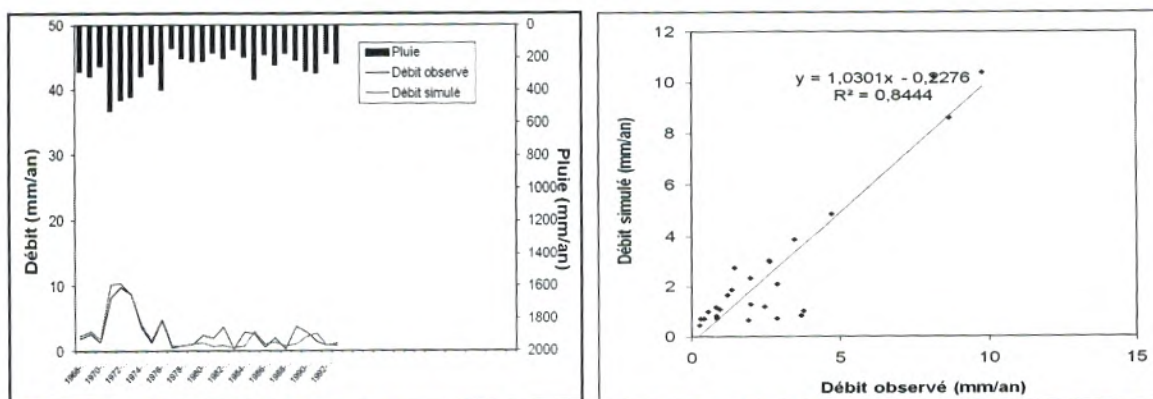


Figure 34: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba du modèle GR1A (Turc)

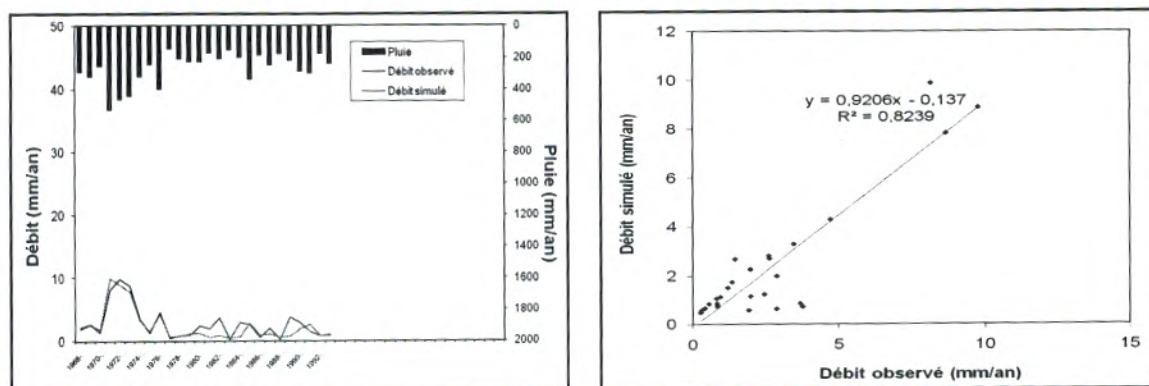


Figure 35: résultats obtenus à la station d'El Haçaïba du modèle GR1A (Thornthwaite)

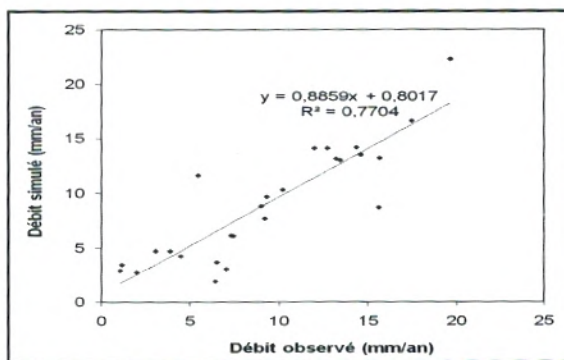
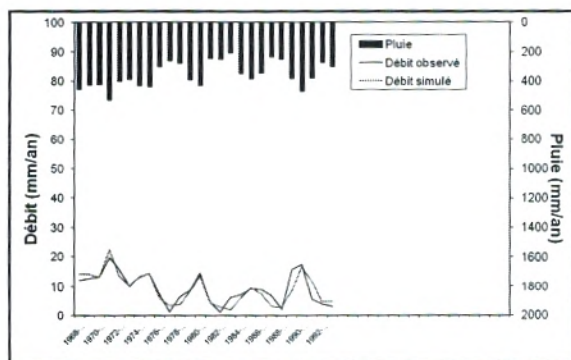


Figure 36: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR1A (Turc)

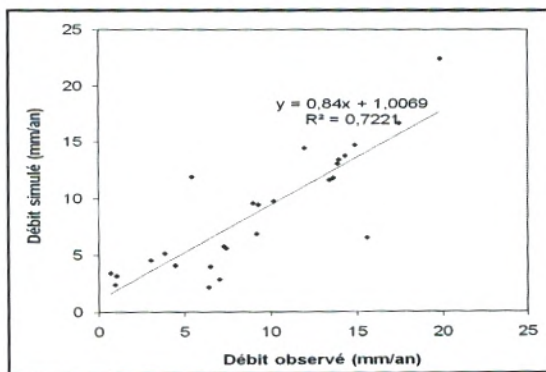
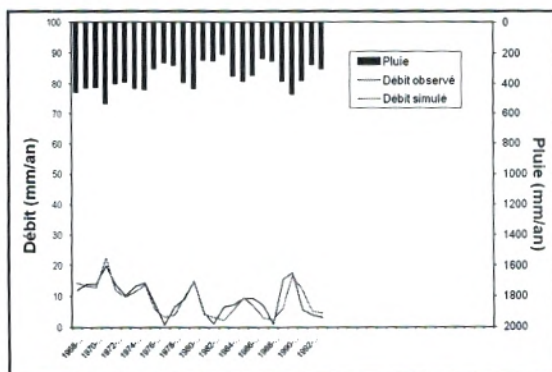


Figure 37: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR1A (Thornthwaite)

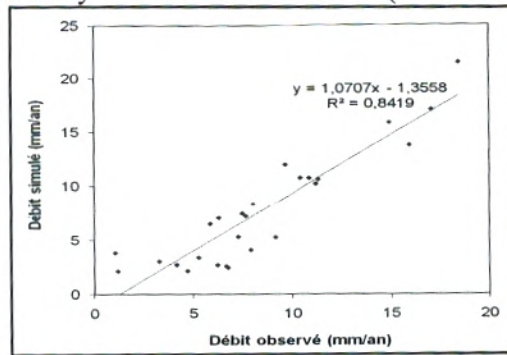
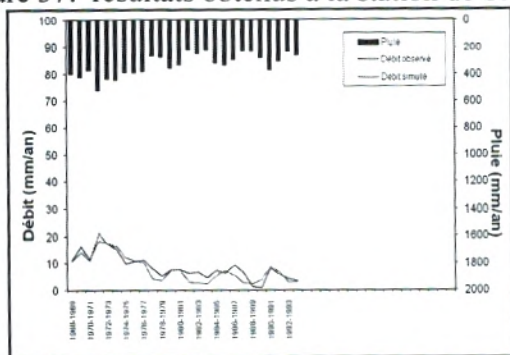


Figure 38: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR1A (Turc)

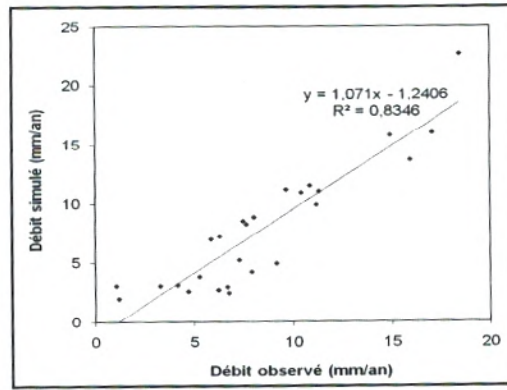
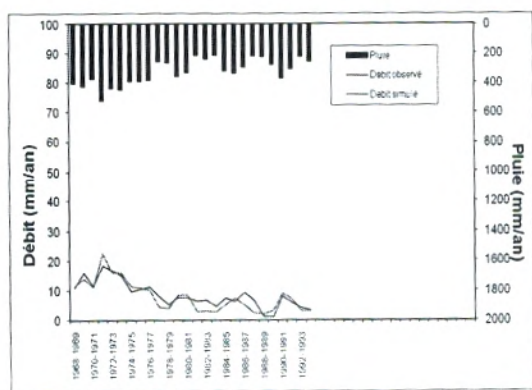


Figure 39: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR1A (Thornthwaite)

-Validation du modèle:

Pour cela nous utilisons une série de 12 ans des données de pluie et d'évapotranspirations qui n'ont pas été utilisées lors du calage des relatives à la période (1995-1996 / 2005-2006) (annexe III).

Le tableau 16 donne les variations du coefficient de corrélation Q simulé - Q observé avec l'utilisation les deux types de données de l'évapotranspiration Turc et Thornthwaite.

Tableau : 16 les variations de coefficient de la corrélation

Données annuelles	Coefficient de corrélation	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)
El Haçaïba	0,84	0,82
Sidi Ali Benyoub	0,82	0,79
Sidi Bel Abbes	0,88	0,84

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observé et débit simulé (figures 40-41 42-43-44-45), la modélisation pluie débit élaboré par l'utilisation de GR1A sur les données de trois stations El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes (annexe III) donne des résultats très acceptables.

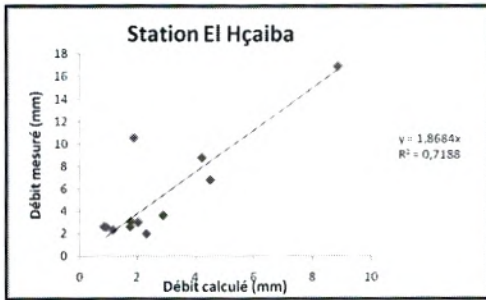


Figure 40: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Turc)

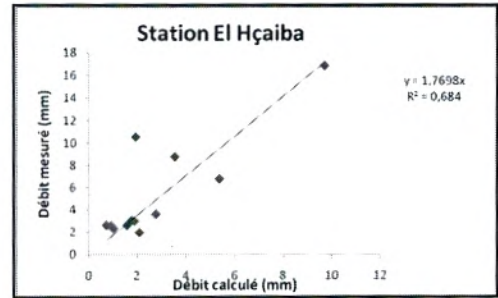


Figure 41: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Thornthwaite)

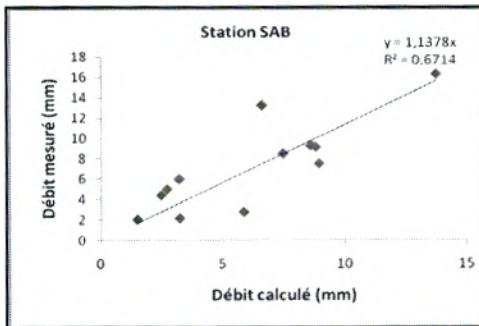


Figure 42: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Turc)

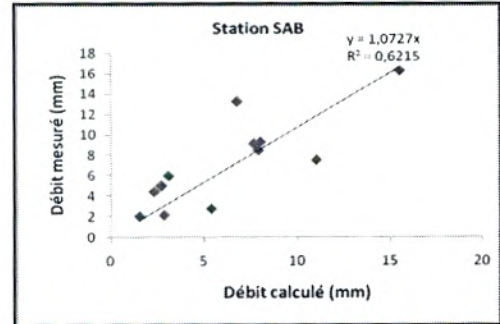


Figure 43: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Thornthwaite)

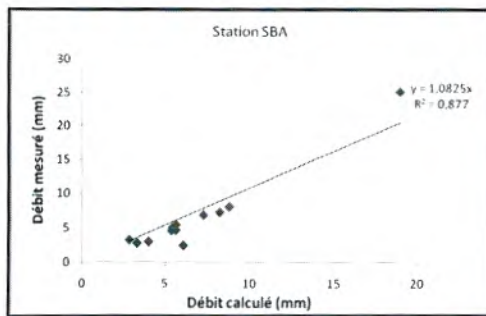


Figure 44: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbès (Turc)

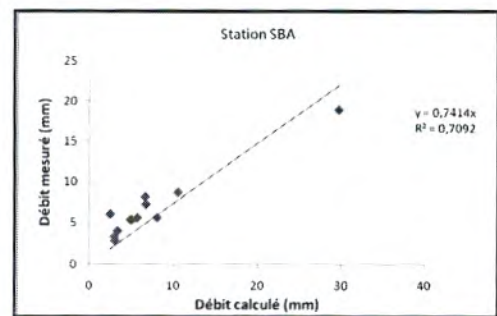


Figure 45: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbès (Thornthwaite)

IV. 3.2- Modélisation de la relation pluie-débit par le modèle mensuel GR2M :

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

Le modèle GR2M s'est distingué comme le modèle fournissant globalement les meilleurs résultats de modélisation. Quatre données d'entrée alimentent la modélisation, les données du terrain (capacité en eau du sol), les données motrices du cycle de l'eau (précipitation et évapotranspiration) et les observations hydrométriques de référence (données de débit).

Pour cela nous avons utilisé les données de pluies (mm) et débits (mm) relatives aux périodes (1968-1969/1993-1994) et mesurés aux niveaux des stations El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès (annexe II).

Pour l'évapotranspiration, nous avons testé une évapotranspiration calculée par la méthode de Turc et celle calculée par la méthode de Thornthwaite (tableau 1 ; annexe II).

-Calage du modèle :

Les deux entrées de pluie et d'évapotranspiration sont modulées de la même manière par l'application de x_1 à ces deux valeurs de façon à les ajuster.

Nous avons donc cherché à caler les deux paramètres x_1 et x_2 du modèle, en ayant comme point de départ, une valeur fixée à 0.2, et en modifiant ces deux paramètres, et cela pour les trois sous bassins.

Ces calculs sont exécutés pour trois stations du bassin versant de Mekerra, de l'amont vers l'aval : station El Haçaïba, station Sidi Ali Benyoub et la station de Sidi Bel Abbès. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 17.

Les cellules variables sont X_1 et X_2 et la cellule à optimiser est le critère de Nash pour une période de janvier 1990 à décembre 2001 jusqu'à l'obtention d'une valeur égale ou supérieur à 80%.

D'après les résultats (Tableau 17) et la coïncidence des deux courbes, des débits simulés et calculés pour les stations d'El Haçaïba (figure 46-47), Sidi Ali Benyoub (figure 48-49) et Sidi Bel Abbès (figure 50-51), nous pouvons dire que les modèles sont calés, toutefois l'évapotranspiration résultant de la formule de Turc donnent de meilleurs résultats que celle de Thornthwaite.

Selon le graphe de l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production pour les trois stations; nous pouvons déduire qu'une partie importante reste sous forme d'une perte et qui fait retarder la réponse au niveau des stations hydrométriques.

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

La variation du réservoir de production reste comprise entre 50 et 250 mm pour les trois stations, alors que le niveau de routage reste faible inférieur à 10. L'allure semblable des comportements de ces réservoirs s'explique par le fait que les trois stations appartiennent au même bassin de Mekerra.

Tableau17 : Représentation les résultats obtenus par l'utilisation de GR2M

Paramètres		Station El Haçaïba	Station de Sidi Ali Benyoub	Station Sidi Bel Abbas
ETP (Turec)	X ₁	727,78	943,88	422,84
	X ₂	0,67	0,75	0,81
	Nash	86	90,3	80
	Bilan	99,8	95,3	82
	R	0,90	0,89	0,73
ETP (Thornthwaite)	X ₁	685,4	812,41	432,68
	X ₂	0,69	0,80	0,82
	Nash	87,7	91,1	80,3 %
	Bilan	99,4	99,5	82,1
	R	0,89	0,87	0,71

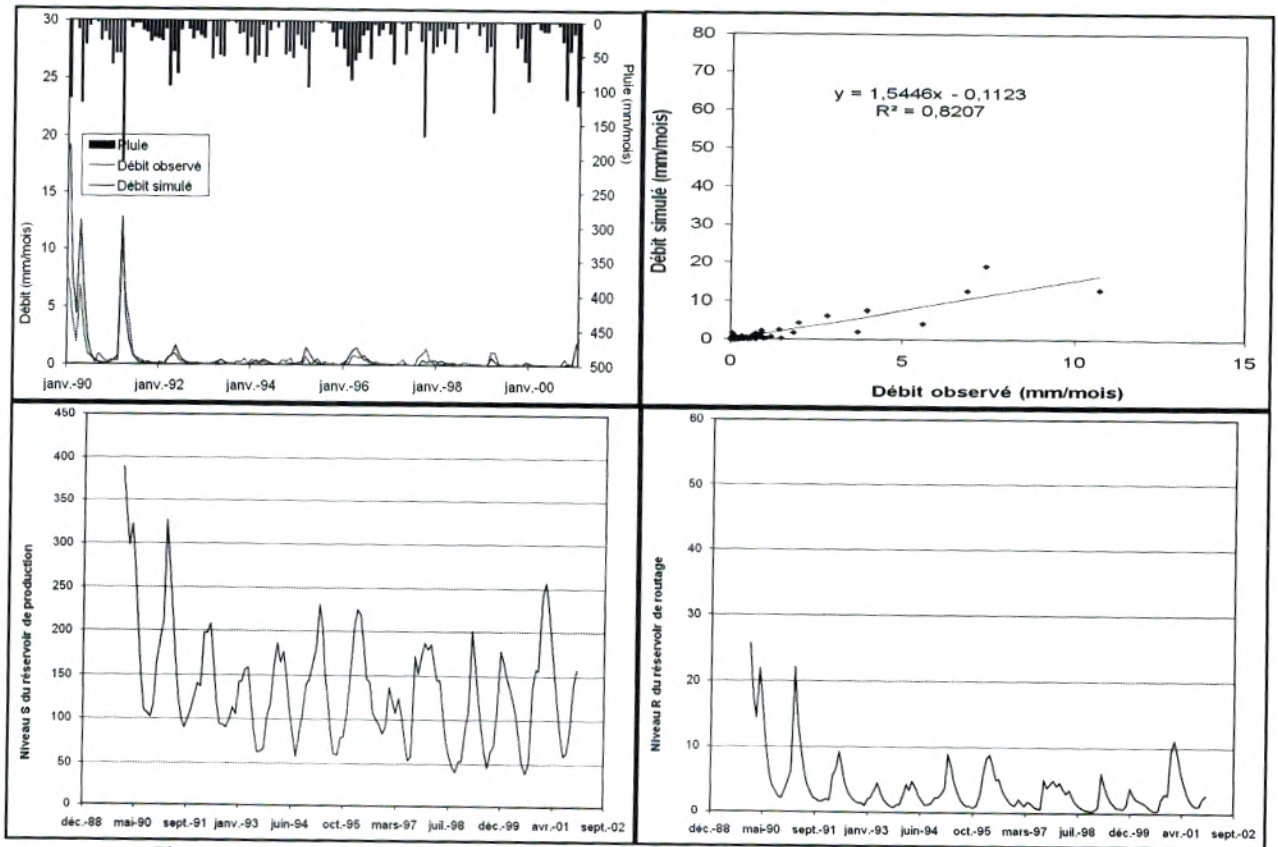


Figure 46: résultats obtenus à la station d'El Haçaïba du modèle GR2M (Turc)

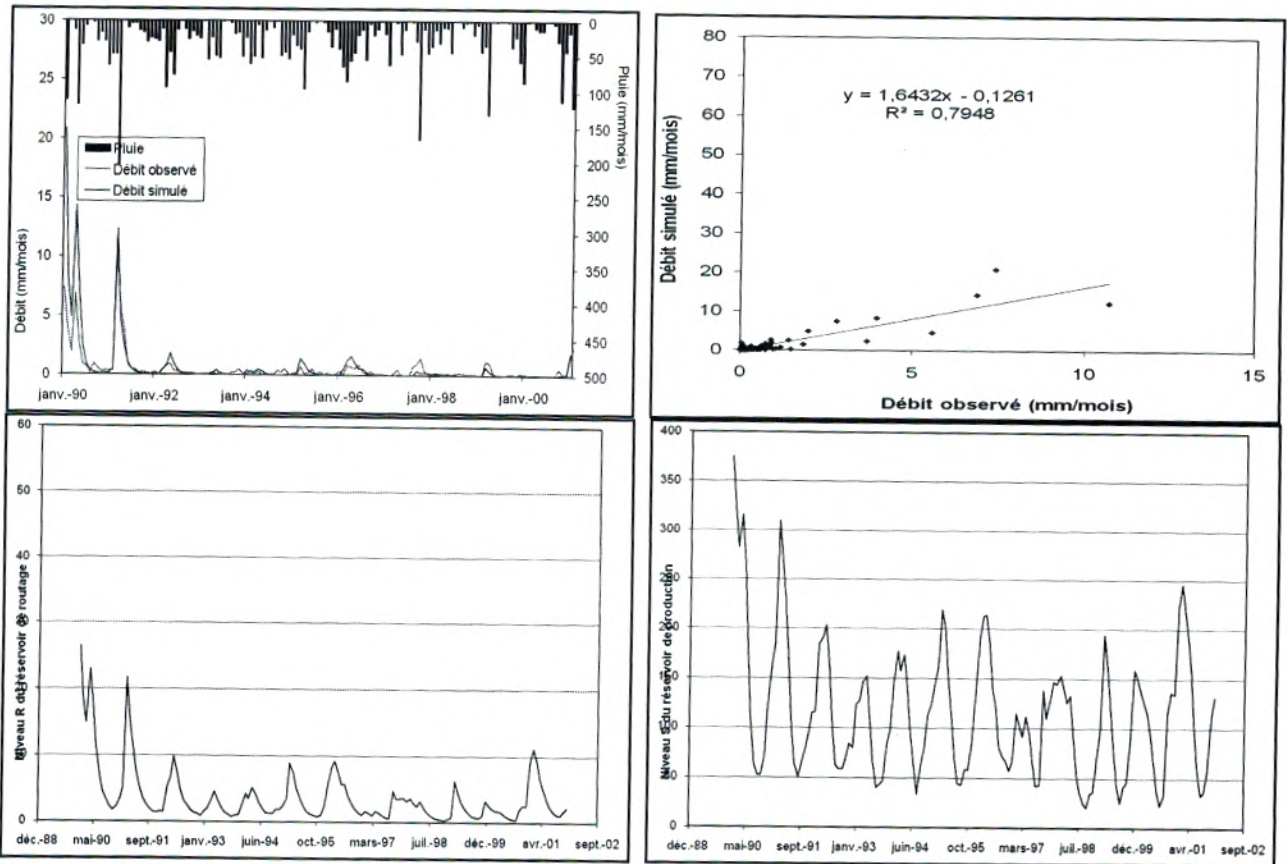


Figure 47: résultats obtenus à la station d'El Haçaïba du modèle GR2M (Thornthwaite)

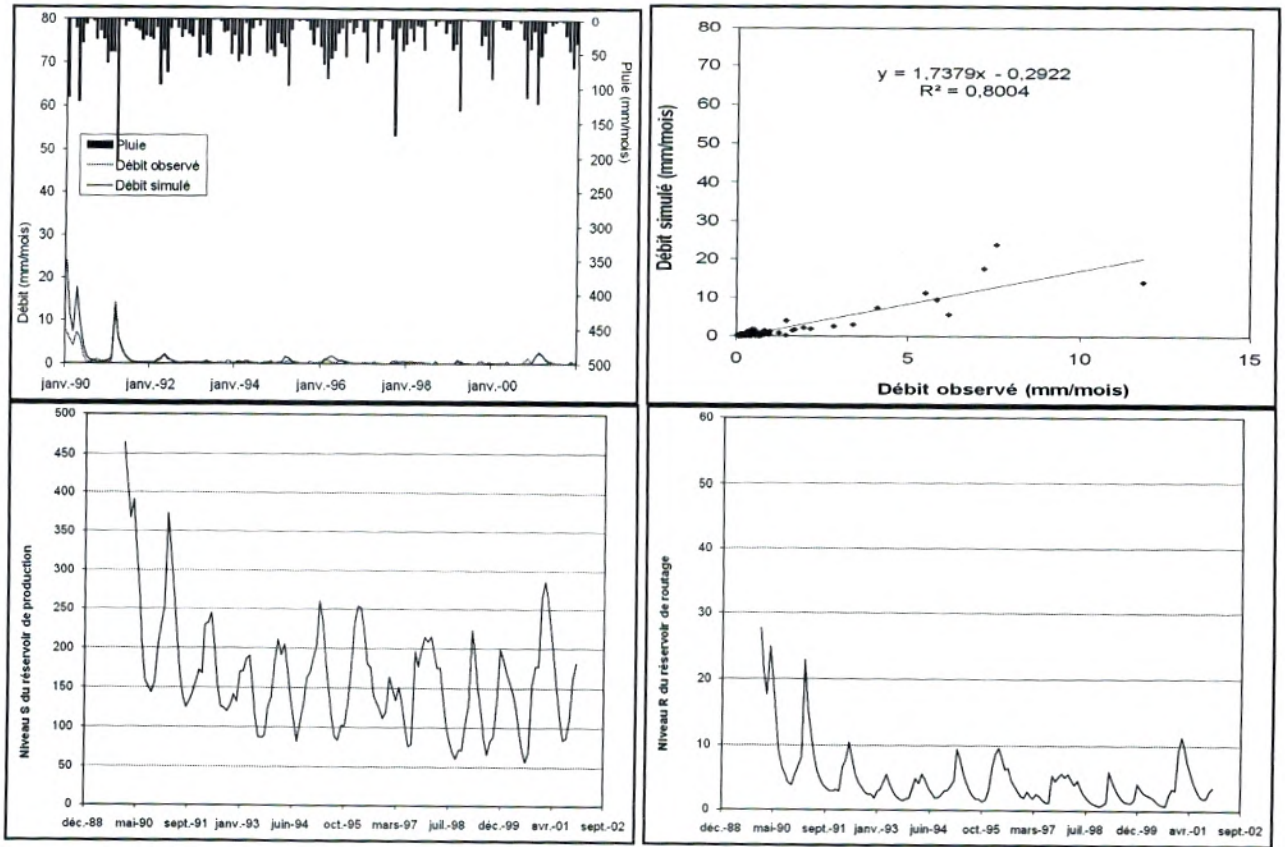


Figure 48: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR2M (Turc)

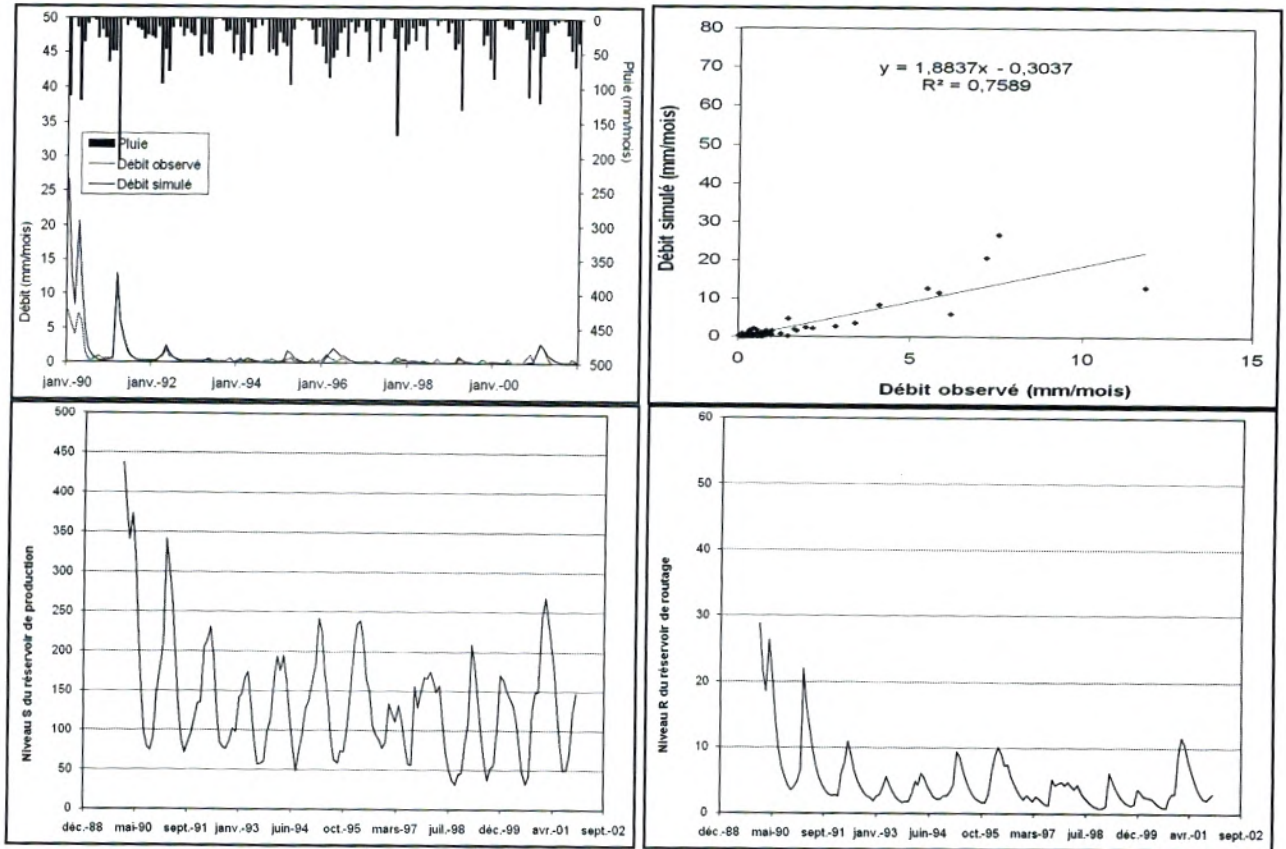


Figure 49: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR2M (Thorntwaite)

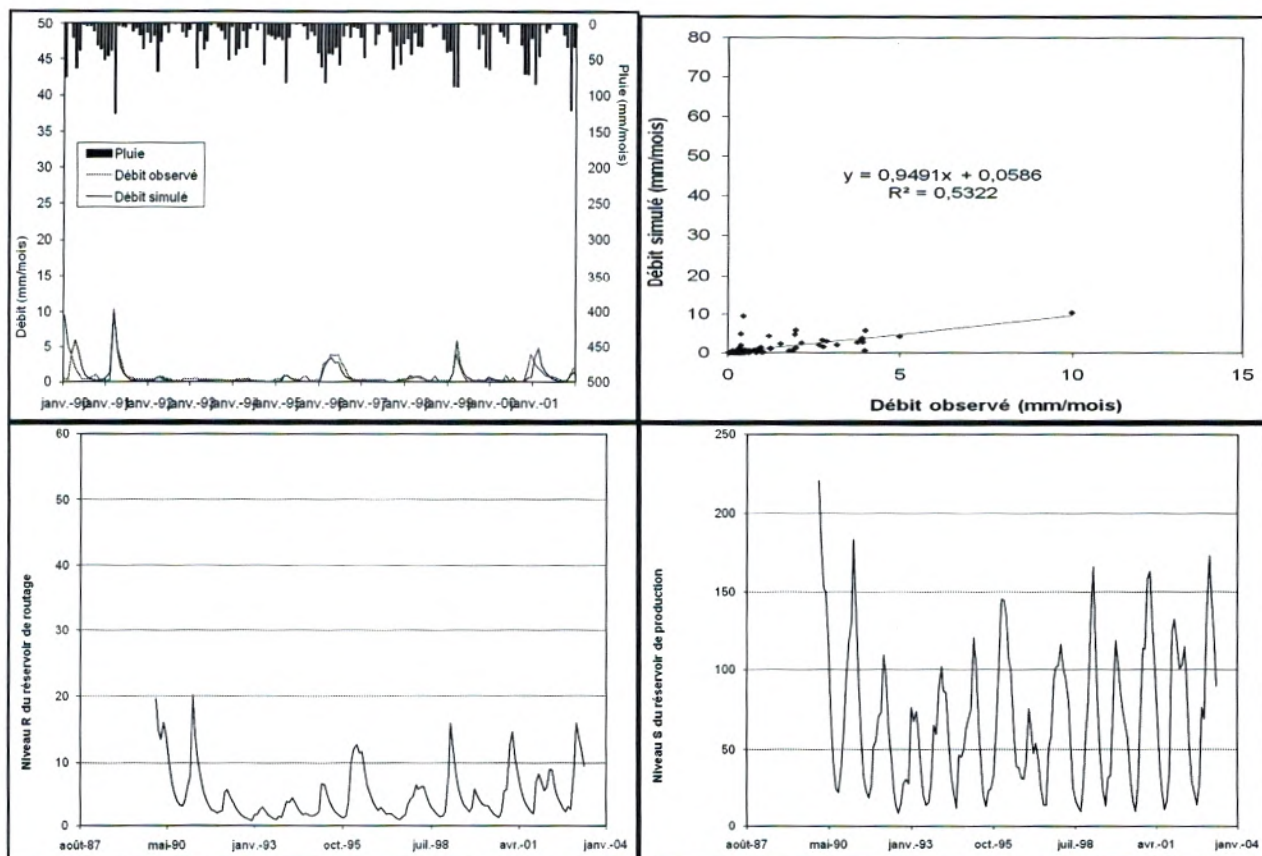


Figure 50: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR2M (Turc)

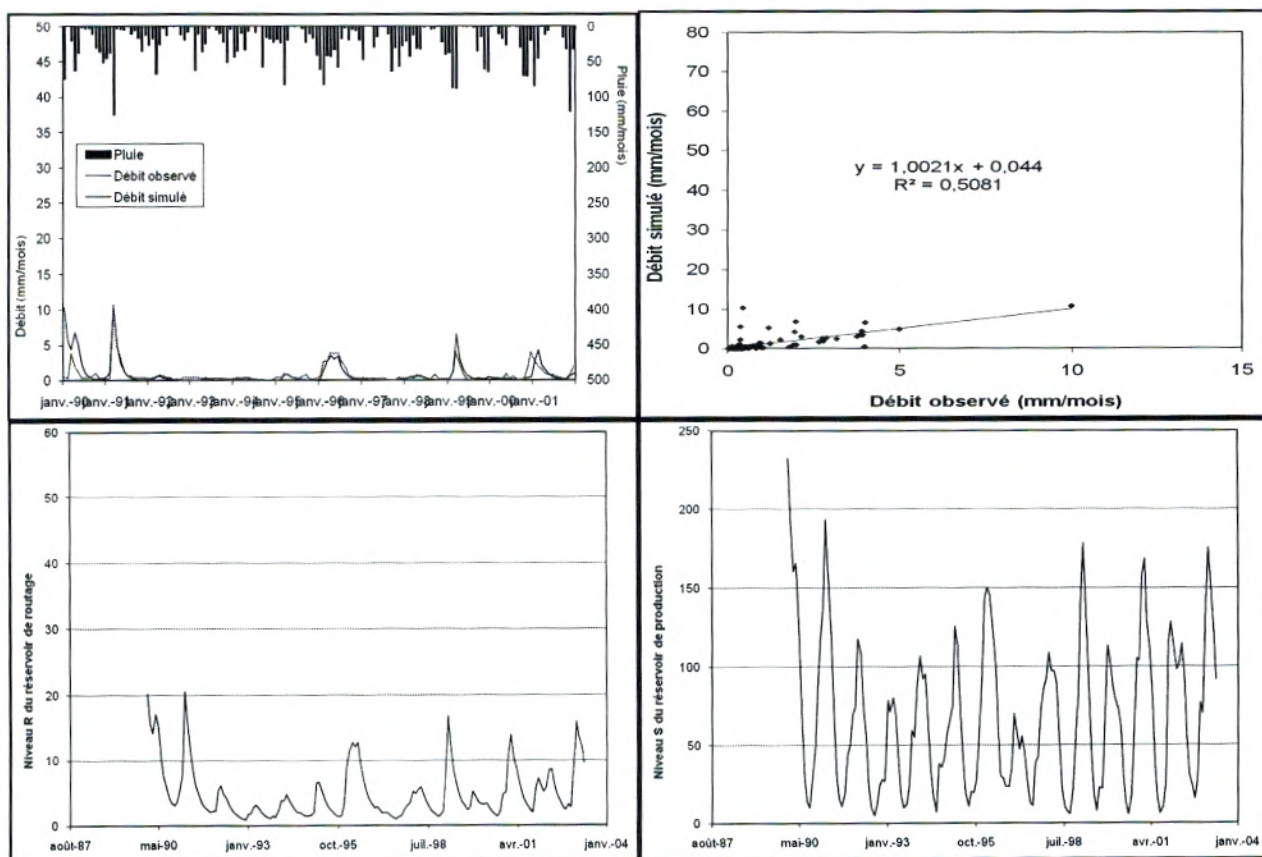


Figure 51: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR2M (Thorntwaite)

-Validation du modèle:

Pour cela on utilise de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (janvier 2002/ décembre 2004) qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

Le tableau 18 montre les variations du coefficient de corrélation avec l'utilisation des deux types de données l'évapotranspiration Turc et Thornthwaite.

Tableau : 18 les variations de coefficient de la corrélation

Données annuelles	Coefficient de corrélation	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)
El Haçaïba	0,59	0,55
Sidi Ali Benyoub	0,65	0,62
Sidi Bel Abbes	0,66	0,63

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit mesuré et débit calculé (figures 52-53- 54-55-56-57), la modélisation pluie débit élaboré par l'utilisation de GR2M sur les données de trois stations El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes donne des résultats très acceptables.

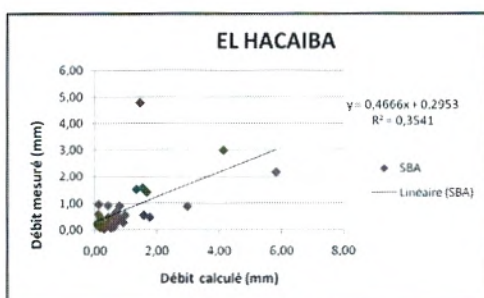


Figure: 52 résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Turc)

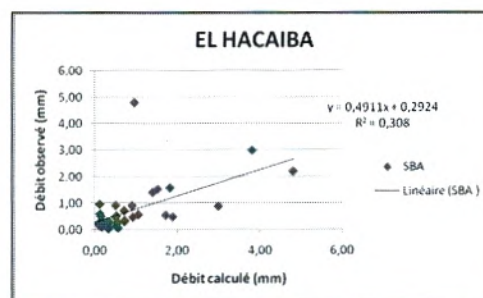


Figure: 53 résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Thornthwaite)

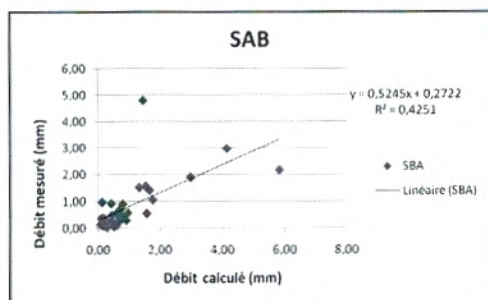


Figure: 54 résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Turc)

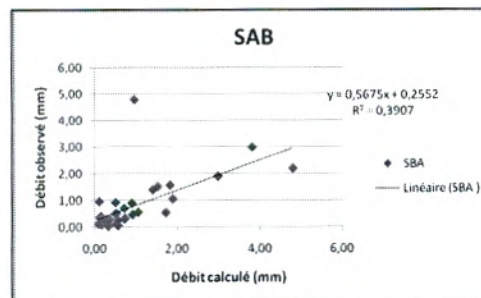


Figure: 55 résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Thornthwaite)

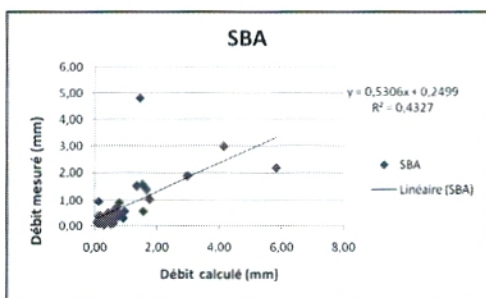


Figure: 56 résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes (Turc)

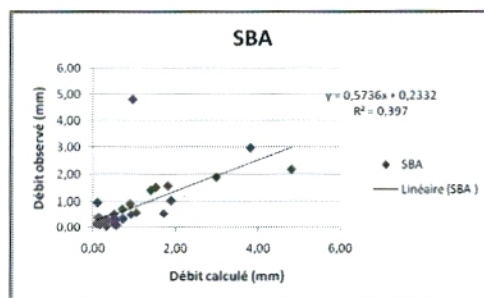


Figure: 57 résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes (Thorntwaite)

CONCLUSION GENERALE

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire où a l'une des différentes facettes du risque hydrologique.

Dans le but de ce travail est l'application du modèle GR Génie Rural suivant les deux pas du temps Annuel et mensuel qui permet d'approcher la modélisation hydrologique à l'aide d'un modèle conceptuel de type global.

Pour mieux étudier l'oued Mekerra nous avons subdivisé le bassin versant de Mekerra en trois sous bassins, El Haçaïba avec une superficie de 955 km², Sidi Ali Benyoub dont une superficie de 1980 km² et le sous bassin de Sidi Bel Abbes avec une surface atteindre les 3000 km².

Dans ce travail, nous avons procédé à l'analyse détaillée des paramètres suivants :

L'analyse des conditions climatiques met en évidence une variation des précipitations qui se traduit par une diminution de la pluviométrie du Nord au Sud et ce sous l'influence des monts des Tessala qui se mettent en travers le vent humide venant du Nord, et par une irrégularité des précipitations dans le temps où on peut distinguer une période humide courte et de longues périodes sèches. La diminution des précipitations touche presque tous les mois de septembre à juin. Elle a bien sûr des répercussions sur les lames d'eau écoulées mensuelles. On notera cependant que les écoulements de la fin de l'été et de l'automne sont peu ou pas diminués, ce qui peut résulter de la violence de certains épisodes de crue. Le régime thermique est caractérisé par des amplitudes annuelles assez fortes qui permettent d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration.

Ensuite nous avons tenté une modélisation pluie-lame d'eau écoulée par l'approche corrélatrice, toutefois les résultats obtenus n'étaient pas concluants. Ceci justifiait l'utilisation d'un autre modèle qui est le celui du Génie Rural (GR1A pour le pas annuel et le GR2M pour le pas mensuel) de type globale. Ce modèle dont les paramètres d'entrée sont les précipitations et l'ETP (calculée par deux méthodes différentes en l'occurrence celles de Turc et celle de Thornthwaite) et le paramètre de sortie est constitué par les lames d'eau écoulée. L'application du modèle GR pour les trois bassins étudiés s'avère très intéressante et donne des résultats très appréciables à savoir :

Avec le modèle GR1A pour les trois stations, Selon le coefficient de correction de l'évapotranspiration X_1 , nous remarquons que ce paramètres diminue de l'amont vers l'aval tout au long du bassin de l'oued Mekerra c'est-à-dire plus en allant vers la station d'El Haçaïba plus le taux de l'évapotranspiration augmente ce qui s'explique par la variation du climat de semi aride vers l'aride.

Avec une valeur supérieure à 1, le paramètre X_1 traduit aussi un échange avec des nappes profondes d'où une infiltration souterraine vers l'alimentation des nappes tout le long de l'oued Mekerra.

Selon les paramètres X_1 et X_2 du modèle GR2M, plus nous allons vers l'embouchure du bassin versant de Mekerra plus le taux d'échange augmente qui due a la nature géologique du bassin versant.

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation du modèle Génie Rural GR1A et GR2M indiquent d'une part que les paramètres du sol (humidité) et l'évapotranspiration jouent un rôle essentiel dans la réponse aux niveaux des stations hydrométriques. D'autre part selon la différenciation de la superficie des sous bassin du sud vers le nord de la Mekerra les lames d'eaux écoulées sont modérées au niveau de chaque sous bassin.

La phase de validation dans laquelle, nous avons introduit de nouvelles données qui n'ont pas été utilisées pour le calage a donné de très bons résultats confirmant le bon calage de nos modèles respectifs sur les trois bassins et l'excellente performance quant à l'utilisation du modèle GR pour des bassins à climat semi-aride méditerranéens.

Ce modeste travail représente un premier essai d'utilisation du modèle GR pour trois sous bassin de la Mekerra qui a donné des résultats forts intéressants. Il serait alors souhaitable de continuer l'application sur d'autre sous bassin de la Macta et de l'Algérie avec l'utilisation du modèle GR4J au pas du temps journaliers et même au pas du temps horaire GR4H pour le traitement des événements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BANTON O., LAROCQUE M., SURATEAU F., VILLENEUVE J.P. (1993)-Agriflux : Logiciel d'évaluation des pertes environnementales de contaminants agricoles-*Manuel d'usager. Scientific Report, (R-380.), INRS-Eau, Ste-Foy, QC, Canada.*

BENADDA L. (2000)-Etude d'un projet de mise en valeur par d'irrigation du perimetre d'El-Fhoul à partir d'oued Sikkak-*Mem, Ing, Univ,Tlemcen: 196p.*

BENEST M. (1985) - Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord - Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire- *Thèse, Doctorat, Lab., Géol. Univ, Lyon. Fasc. 1., 367 p.*

BOIS Ph., OBLED Ch. ZIN I. (2007)- Introduction au traitement de données en hydrologie-*E.N.S. d'Hydraulique et Mécanique, ENSHMG, Institut National Polytechnique de Grenoble : 265p.*

BOUANANI A. (2004) -Hydrologie, transport solide et modélisation :Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie)- *Thèse de Doctorat ,Univ, Abou Bekr Belkaid Tlemcen(Algérie) :250 p.*

BOUDHRAA H. (2007)-Modélisation Pluie-Débit à base géomorphologique en milieu semi-aride rural Tunisien : Association d'approches directe et inverse- *Thèse de Doctorat, Univ, 7novembre Carthage (Tunisie) :227 p.*

BOURQUI M. (2008) -Impact de la variabilité spatiale des pluies sur les performances des modèles hydrologiques- *Thèse de Doctorat, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et bioprocédés, Antony : 333p.*

CASTAINGS W. (2007)- Analyse de sensibilité et estimation de paramètres pour la modélisation hydrologique: Potentiel et limitations des méthodes variationnelles- *Lab Jean Kuntzmann, Dép Modèles et Algorithmes Déterministes, Équipe Modélisation, Observations, Identification pour les Sci de l'Environnement (INRIA-CNRS-UJF-INPG), Grenoble:70p.*

EDIJATNO. (1991) –Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier - *Thèse de Doctorat .Univ, Louis Pasteur De Strasbourg, Institut de Mécanique des Fluides : 253p.*

GAUME E. (2002)-Hydrologie de versant et de bassins versants et modélisation pluie-débit-Cours DEA en Sciences et Techniques de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées(France).

GNOUMA R. (2006)-Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron- *Thèse de Doctorat, l'Unité de Recherche en Hydrologie –Hydraulique Cemagref, de Lyon : 329p.*

GUARDIA P. (1975) - Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord occidentale- *Thèse .Doct. Nice. 256 p.*

HALLOUCHE B. (2007) -Cartographie des zones inondables de la plaine de Sidi Bel Abbes par l'approche hydrogéomorphologique- *Mém. Magister .Univ, Sidi Bel Abbes (Algérie):153p.*

HAU M. (2008) -Modélisation hydrologique des sous-bassins versants de la Garonne a l'aide d'un modèle pluie-débit global- *Cemagref. Ecole Polytechnique Universitaire de Montpellier Département Sciences et Technologies de l'Eau.:46p.*

- HAZIZA E.** (2003)-Modélisation mensuelle Pluie-Débit/ Apports de spatialisation-cas des données de sols- *Thèse de Doctorat .Univ, Université Montpellier II Faculté Des Sciences Et Techniques Du Languedoc: 253p.*
- HENINE H.**-Interfaçage entre un modèle hydrologique /modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG- *Mém. Magister. Algérie : 114p.*
- KARAMBIRI H.** (1999) -Etude de la distribution statistique des pluies annuelles- DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie *Univ Pierre et Marie Curie, Univ Paris-Sud,Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts : 37p.*
- KHALDI A.** (2005) -Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterraines dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien 'Mont de Tlemcen-Saida'- *Thèse de Doctorat, Univ, Oran (Algérie) :239 p.*
- LABORDE J-P.** (2000)-Eléments d'hydrologie de surface- *Univ de Nice - Sophia Antipolis ,Centre National de la Recherche Scientifique :204p.*
- LAROCQUE M., BANTON O., LAFRANCE P.** (1998)- Simulation par le modèle Agriflux du devenir de l'atrazine et du dééthylatazine dans un sol du Québec sous maïs sucré-*Revue des sciences de l'eau, 11 191-208.*
- MADANI CHERIF H.** (2005) -Contribution à l'étude des débits liquides et solides des cours d'eau de l'Algérie septentrionale: Procédés et qualité des mesures -*Mém. Magister .Univ, Oran (Algérie):188p.*
- 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 Sciences de la Terre et Environnement:303 p.*
- MAKHLOUF Z., MICHEL C.** (1992)-Relation entre les paramètres d'un modèle globale Pluie-Débit et les caractéristiques physiques d'un bassin versant Breton-*Cemagref. VII^e journées hydrologiques ; Orstom, 17 p*
- 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 : 214p.*
- MATHEVET T.** (2005)-Quels modèles Pluie-Débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants -*Thèse de Doctorat, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, centre de Paris : 463p.*
- MEDDI H., MEDDI M.** (2007) - Variabilité spatiale et temporelle des précipitation du nord -ouest de l'Algérie -*Univ .Khémis Miliana (Algérie).Géographia Technical. n° 2, 7p.*
- MEDDI M., TALIA A. MARTIN C.** (2009)- Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Mactaa (nord ouest de l'Algérie)- *Géographie Physique et Environnement III 61-84p.*
- MERABET A.** (2008)-Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations - *Mém. Magister .Univ, Sidi Bel Abbés (Algérie):181p.*

- 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, 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, Cemagref. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts: 323p.*
- LOUDIN 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 : 495p.*
- PERRIN C.** (2000)-Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative-*Thèse de Doctorat, Cemagref. Antony, Institut National Polytechnique de Grenoble:530p*
- PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., MICHEL C.** (2007)-Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-*Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés :16 p.*
- RESCAN M.** (2005)- Prévission des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale jusqu'en 2099 par application des sorties du modèle d'évolution du climat HadCM3 au modèle hydrologique GR2M- *DEA Sciences de l'eau dans l'environnement continental, Univ Montpellier II : 103p.*
- 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.*
- SAINTYVES B.** (2008) -*Test d'un modèle de prévision des crues sur les bassins de l'Yonne et du Loing- Cemagref, Antony l'Unité de Recherche Hydro systèmes et Bioprocédés .Univ Paris -Sud U.F.R des Sciences d'Orsay. Master 1 physique appliquée, parcours environnement: 109p.*
- SIGHOMNOU D.** (2004)-Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau- *Thèse de Doctorat, Sciences de l'Eau, Univ Yaounde : 291p.*
- STAUB P-F.** (2008)-Prévission d'etiaje par modélisation hydrologique: mise au point d'une méthode d'évaluation - *Rapport de Stage rédigé en vue de l'obtention du Master 2 PROFESSIONNEL « Géo-Hydrosystèmes Continentaux en Europe » SPECIALITE « Transferts » Unité Hydrosystèmes et Bioprocédés, Centre Cemagref d'Antony:92p.*
- TANGARA M.** (2005)- Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global-*Cemagref. Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris Ecole doctorale : Sciences de la Vie et de la Terre, Laboratoire : Hydrologie et Environnement : 374 p.*
- TOUZI M., LABORDE J-P.** (2004)-Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du Nord-*Rev.Sci.Eau 17/4(2004) 503-516p.*

ANNEXES

ANNEXE : 1- Modèle GR

1-Historique du GR :

On doit représenter un historique des travaux ayant permis le développement progressif des modèles GR. Nous distinguerons les travaux relatifs aux modèles pluie débit simples, ceux réalisés en privilégiant la prise en compte de l'humidité du sol sur le bassin versant et enfin, les travaux orientés vers la modélisation de flux de matières.

Au début des années 80, le Cemagref d'Antony a engagé une réflexion sur la modélisation pluie-débit à partir du modèle CREC, un modèle à neuf paramètres développé au Laboratoire d'Hydrologie de l'Université de Montpellier (Cormary et Guilbot, 1973).

Partant de cette structure, des simplifications ont été faites, dans le but d'obtenir un modèle à peu de paramètres, sans amoindrir les performances du modèle initial en terme de simulation des débits. Une structure simple à deux réservoirs a ainsi été proposée, avec un seul paramètre correspondant à une capacité maximale identique de ces deux réservoirs dans le cas du bassin versant de l'Orgeval (Michel, 1983).

De façon plus générale, ce premier modèle était un modèle à deux paramètres, GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir.

Utilisé par Loumagne (1988) et Devred (1989), ce modèle a ensuite été repris par Edijatno (1987, 1991) qui a, par une démarche résolument empirique, amélioré sa structure en modifiant notamment la fonction de production et en ajoutant un troisième paramètre, constante de temps d'un hydrogramme unitaire.

Le nouveau modèle journalier GR3 (Edijatno et Michel, 1989) fut testé sur un échantillon de 110 bassins versants français et donna des résultats satisfaisants en comparaison avec quelques modèles plus complexes. Des relations entre descripteurs climatiques du bassin et valeurs des paramètres du modèle ont été ébauchées.

Dans une perspective de constante amélioration de cette structure, Nascimento (1991, 1995) a isolé des bassins intermittents pour lesquels le modèle avait du mal à fournir des résultats corrects, et a introduit dans le modèle un quatrième paramètre gouvernant des échanges 'souterrains' pour répondre aux exigences de bonne reproduction des débits.

Le nouveau modèle GR4 a fourni sur un échantillon de 120 bassins de meilleures performances que la version antérieure à trois paramètres.

Parallèlement aux travaux de Nascimento (1995), Makhoulf (1994) a mené des recherches sur l'explication des paramètres du modèle GR4J sur des bassins de Moselle et de Bretagne. Il a également donné quelques voies pour le traitement de la neige sur les bassins de la Moselle et travaillé sur un modèle mensuel à deux paramètres GR2M (Makhoulf et Michel, 1994).

Auparavant, Kabouya (1990) avait également mis au point un mois mensuel GR3M, à trois paramètres, pour l'évaluation de la ressource en eau en Algérie septentrionale (Kabouya et Michel, 1991).

Plus récemment, Edijatno *et al.* (1999) ont proposé une nouvelle version à trois paramètres du modèle journalier. Cette version, dans laquelle la capacité du réservoir de production est fixe, est très similaire à la version proposée par Nascimento (1995) avec des fonctions de production et d'échange légèrement modifiées.

Enfin, Perrin (2000) a rajouté un quatrième paramètre au modèle journalier à la suite d'un travail comparatif avec d'autres modèles (Perrin *et al.* 2001) .

Un autre volet de la recherche sur la modélisation pluie-débit porte sur le problème plus spécifique de la prévision de crue. Yang (1993), utilisant le modèle GR3 d'Edijatno (1991) au pas de temps horaire, a mis au point une méthode de prévision des crues avec mise à jour des paramètres du modèle. Parallèlement aux travaux réalisés au Cemagref d'Antony, l'équipe du Cemagref d'Aix-en-Provence s'est intéressée à la prévision des crues et a couplé un générateur stochastique de pluies (Cernesson *et al.*, 1996) à une version horaire de GR3 au sein du modèle SHYPRE (Cernesson et Lavabre, 1994).

Des travaux ont également été menés sur le modèle mensuel (Lavabre *et al.*, 1993; Makhoulf *et al.*, 1995) qui est à la base du logiciel LOIEAU pour l'estimation de variables réglementaires sur les débits (Lavabre *et al.*, 1997).

Enfin, nous pouvons citer ici les travaux de Bentura (1996) portant sur la propagation des crues (Bentura et Michel, 1997). Cette recherche n'est pas directement liée au développement des modèles GR mais elle a permis de montrer que le routage utilisé dans GR3 permettait d'approcher de façon assez bonne les résultats de propagation obtenus à partir des équations de Barré-Saint-Venant. Cette méthode a par exemple été appliquée par Lees et Sincock (2002).

Parmi les travaux ayant appliqué ces modèles GR, nous pouvons tout d'abord citer ceux réalisés par l'IRD (ex-ORSTOM) en Afrique. Servat et Dezetter (1991, 1992) ont appliqué le modèle GR3 d'Edijatno sur des bassins de Côte-d'Ivoire en les comparant aux modèles CREC et MODGLO. Paturel *et al.* (1995), Ouedraogo *et al.* (1998) ont testé le modèle mensuel également sur des bassins ivoiriens.

Le modèle GR3 a également été utilisé par Yang *et al.* (1991) dans le cas de la gestion d'un réservoir. Yang et Parent (1996) ont par ailleurs testé une méthode d'analyse de fiabilité sur le modèle GR3 et Kuczera et Parent (1998) ont appliqué une procédure 'Chaîne de Markov' Monte-Carlo pour l'estimation de l'incertitude sur les paramètres du modèle GR4.

Les travaux dans ce domaine ont été réalisés au Cemagref d'Antony en collaboration avec le Centre d'Etudes Terrestres et Planétaires (CETP) de Vélizy. Les bassins versants de l'Orgeval et du Naizin ont été des supports d'observation privilégiés dans le développement des modèles.

Partant de la structure simple à deux paramètres proposée par Michel (1983), les recherches de Loumagne (1988) ont porté sur l'utilisation de données d'humidité du sol pour la modélisation pluie-débit. En se basant sur des observations révélant l'importance de l'état hydrique superficiel du bassin dans la production des débits, le but de ce travail était de substituer au réservoir de production les données

d'humidité. Cette approche a fourni des résultats prometteurs et elle a donc été approfondie, tout d'abord par Chkir (1996), qui a proposé le modèle GRHUM issu de la modification du modèle GR4: le réservoir de production a été modifié pour obtenir un réservoir bicouche avec utilisation du schéma de Deardoff, la couche supérieure étant destinée à pouvoir simuler l'état d'humidité de surface du bassin versant. Ce modèle peut être utilisé soit en simulation, soit en assimilation avec utilisation de données de terrain par le modèle.

Cette méthodologie a été ensuite reprise par Cognard-Plancq (1996) en collaboration avec le CETP avec l'utilisation de données de télédétection qui, après traitement, permettent d'obtenir un indice global d'humidité du bassin pouvant être utilisé par le modèle (Loumagne *et al.*, 1996).

Actuellement, ces travaux sont poursuivis (Quesney, 1999), notamment avec l'utilisation du modèle GRHUM dans un cadre de la prévision de crue et des méthodes d'assimilation des données telles que la méthode développée par Yang (1993). Le projet européen AIMWATER, (1998 – 2001) au Cemagref d'Antony, s'inscrit également dans cette démarche (Loumagne *et al.*, 2001).

Andréassian (2002) a appliqué le modèle GR4J dans le cadre de la mise au point de tests de mise en évidence d'impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologiques des bassins versants.

2-Applications des modèles GR :

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 ;

- 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).

ANNEXE : II Hydrologie

Tableau: 1 Données hydro climatiques annuelles du Mekerra

Année	station El Haçaïba		station S A B		station S B A		Evapotranspiration (mm)	
	P (mm)	Q (mm)	P (mm)	Q (mm)	P (mm)	Q (mm)	Turc	Thornthwaite
1968-1969	291,35	1,98	454,7	11,96	403,2	962,90	962,9	1229,99
1969-1970	316,90	2,64	429,8	12,69	427,0	964,36	964,36	1280,33
1970-1971	253,55	1,36	422,6	13,19	376,1	962,98	962,98	1250,59
1971-1972	532,25	8,15	532,3	19,65	523,6	968,36	968,36	1246,96
1972-1973	462,55	4,15	398,9	15,65	438,2	962,78	962,78	1320,59
1973-1974	445,00	2,12	389,1	10,19	446,6	968,18	968,18	1286,93
1974-1975	316,65	3,47	433,1	13,42	393,3	969,36	969,36	1329,99
1975-1976	243,10	1,21	439,8	14,33	389,7	974,18	974,18	1280,33
1976-1977	402,60	4,72	301,2	7,42	381,8	971,81	971,81	1310,33
1977-1978	146,85	0,42	263,8	10,15	256,8	973,74	973,74	1270,74
1978-1979	207,70	0,86	279,6	6,50	263,9	968,81	968,81	1208,81
1979-1980	227,05	0,95	394,3	8,99	359,5	970,78	970,78	1201,45
1980-1981	226,60	2,46	431,5	14,58	334,1	949,13	949,13	1174,84
1981-1982	172,55	1,92	249,1	4,47	214,6	935,91	935,91	1243,04
1982-1983	208,55	3,69	252	10,06	242,0	947,06	947,06	1177,42
1983-1984	151,85	0,27	208,9	6,41	216,6	947,14	947,14	1145,9
1984-1985	199,25	2,88	349,2	7,29	319,5	935,52	935,52	1250,59
1985-1986	339,10	2,62	385,9	9,30	337,1	952,29	952,29	1246,96
1986-1987	186,25	8,76	344,6	9,19	296,0	964,63	964,63	1320,59
1987-1988	248,05	1,99	236,8	7,03	220,7	965,47	965,47	1286,93
1988-1989	177,80	0,31	251,1	13,98	224,2	957,55	957,55	1329,99
1989-1990	220,05	3,77	384,5	15,60	276,2	923,56	923,56	1380,33
1990-1991	287,25	2,89	472	17,46	371,7	946,77	946,77	1223,07
1991-1992	300,30	1,45	381,9	5,44	308,8	939,01	939,01	1197,88
1992-1993	176,25	0,84	274,7	3,87	223,5	944,91	944,91	1169,85
1993-1994	239,00	0,82	303,1	3,06	257,3	953,52	953,52	1262,19
1994-1995	268,85	10,55	353,8	8,47	245,7	940,33	940,33	1178,96
1995-1996	492,55	16,87	444	16,30	583,7	949,36	949,36	1148,68
1996-1997	263,00	3,61	200,9	5,01	241,8	953,30	953,3	1236,57
1997-1998	263,30	3,06	371	13,24	306,1	970,06	970,06	1238,25
1998-1999	189,15	2,61	236,6	2,14	247,6	959,09	959,09	1323,06
1999-2000	279,50	2,62	242,4	4,41	234,3	965,27	965,27	1292,36
2000-2001	371,00	8,76	403,1	9,12	367,1	969,20	969,2	1343,21
2001-2002	266,15	1,99	357	9,28	324,3	962,46	962,46	1287,84
2002-2003	219,70	2,31	316,2	2,76	296,6	974,28	974,28	1315,27
2003-2004	389,40	6,77	380,1	7,50	361,7	948,06	948,06	1096,85
2004-2005	162,50	2,58	156,2	2,03	209,7	926,09	926,09	1186,62
2005-2006	298,30	2,99	285,3	5,97	308,0	943,92	943,92	1243,92

Tableau: 2 Données hydrométriques et pluviométrique mensuelles du Mekerra

mois		sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	Juil	aout
SBA (1980 -2005)	P (mm)	15,5	20,2	46,8	35,1	36,6	41,4	36,6	25,7	21,2	6,7	1,8	2,9
	Q (mm)	0,96	1,13	0,73	0,41	0,47	0,52	0,75	0,46	0,74	0,58	0,40	0,50
SAB (1980 -2005)	P (mm)	25,08	25,74	38,70	35,82	39,64	37,47	42,22	28,72	24,34	7,82	4,05	6,03
	Q (mm)	1,27	1,72	0,60	0,32	0,38	0,40	1,12	0,49	0,84	0,50	0,37	0,69
El Haçaïba (1990 -2005)	P (mm)	14,2	18,9	41,2	30,9	34,6	29,3	31,2	21,4	23,2	8,9	1,3	1,2
	Q (mm)	0,21	0,24	0,29	0,16	0,08	0,18	0,96	0,04	0,11	0,01	0,00	0,02

Tableau: 3 Données hydrométriques et pluviométriques saisonnières du Mekerra

Saison		Automne	Hiver	Printemps	Eté
SBA (1980 -2005)	P (mm)	82,5	113,1	83,6	11,4
	Q (mm)	2,82	1,40	1,95	1,49
SAB (1980 -2005)	P (mm)	89,5	112,9	95,3	17,9
	Q (mm)	3,59	1,10	2,45	1,55
El Haçaïba (1990 -2005)	P (mm)	74,3	94,8	75,8	11,4
	Q (mm)	0,74	0,42	1,12	0,03

ANNEXE III : Modélisation Pluie- Débit (GR)

Tableau: 1 Données du modèle GR1A de la station d' El Haçaïba

Année	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thorntwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
1968-1969	291,35	1,98	962,9	2,31	1229,99	2,27
1969-1970	316,90	2,64	964,36	2,96	1280,33	2,69
1970-1971	253,55	1,36	962,98	1,85	1250,59	1,76
1971-1972	532,25	8,15	968,36	10,24	1246,96	9,89
1972-1973	462,55	9,77	962,78	10,40	1320,59	8,89
1973-1974	445,00	8,66	968,18	8,62	1286,93	7,83
1974-1975	316,65	3,47	969,36	3,85	1329,99	3,28
1975-1976	243,10	1,21	974,18	1,64	1280,33	1,52
1976-1977	402,60	4,72	971,81	4,86	1310,33	4,29
1977-1978	146,85	0,42	973,74	0,71	1270,74	0,67
1978-1979	207,70	0,86	968,81	0,73	1208,81	0,75
1979-1980	227,05	0,95	970,78	1,08	1201,45	1,13
1980-1981	226,60	2,46	949,13	1,18	1174,84	1,24
1981-1982	172,55	1,92	935,91	0,64	1243,04	0,58
1982-1983	208,55	3,69	947,06	0,83	1177,42	0,86
1983-1984	151,85	0,27	947,14	0,44	1145,9	0,48
1984-1985	199,25	2,88	935,52	0,72	1250,59	0,64
1985-1986	339,10	2,62	952,29	3,01	1246,96	2,81
1986-1987	186,25	0,56	964,63	0,99	1320,59	0,84
1987-1988	248,05	1,99	965,47	1,28	1286,93	1,16
1988-1989	177,80	0,31	957,55	0,70	1329,99	0,58
1989-1990	220,05	3,77	923,56	1,02	1380,33	0,73
1990-1991	287,25	2,89	946,77	2,09	1223,07	2,00
1991-1992	300,30	1,45	939,01	2,72	1197,88	2,68
1992-1993	176,25	0,84	944,91	0,82	1169,85	0,86
1993-1994	239,00	0,82	953,52	1,17	1262,19	1,07
1994-1995	268,85	10,55	940,33	1,87	1178,96	1,91
1995-1996	492,55	16,87	949,36	8,88	1148,68	9,68
1996-1997	263,00	3,61	953,3	2,89	1236,57	2,75
1997-1998	263,30	3,06	970,06	1,77	1238,25	1,74
1998-1999	189,15	2,61	959,09	0,84	1323,06	0,71
1999-2000	279,50	2,62	965,27	1,75	1292,36	1,56
2000-2001	371,00	8,76	969,2	4,23	1343,21	3,53
2001-2002	266,15	1,99	962,46	2,32	1287,84	2,07
2002-2003	219,70	2,31	974,28	1,16	1315,27	1,02
2003-2004	389,40	6,77	948,06	4,50	1096,85	5,36
2004-2005	162,50	2,58	926,09	0,92	1186,62	0,90
2005-2006	298,30	2,99	943,92	2,03	1243,92	1,87

Tableau: 2 Données du modèle GR1A de la station du Sidi Ali Benyoub

Année	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
1968-1969	454,7	11,96	962,90	14,13	1229,99	14,41
1969-1970	429,8	12,69	964,36	14,13	1280,33	13,38
1970-1971	422,6	13,19	962,98	13,18	1250,59	13,02
1971-1972	532,3	19,65	968,36	22,31	1246,96	22,40
1972-1973	398,9	15,65	962,78	13,25	1320,59	11,79
1973-1974	389,1	10,19	968,18	10,30	1286,93	9,73
1974-1975	433,1	13,42	969,36	13,05	1329,99	11,60
1975-1976	439,8	14,33	974,18	14,21	1280,33	13,73
1976-1977	301,2	7,42	971,81	6,11	1310,33	5,61
1977-1978	263,8	1,15	973,74	3,47	1270,74	3,39
1978-1979	279,6	6,50	968,81	3,71	1208,81	3,96
1979-1980	394,3	8,99	970,78	8,81	1201,45	9,55
1980-1981	431,5	14,58	949,13	13,56	1174,84	14,68
1981-1982	249,1	4,47	935,91	4,30	1243,04	4,06
1982-1983	252	1,06	947,06	2,93	1177,42	3,15
1983-1984	208,9	6,41	947,14	1,90	1145,9	2,16
1984-1985	349,2	7,29	935,52	6,16	1250,59	5,75
1985-1986	385,9	9,30	952,29	9,68	1246,96	9,41
1986-1987	344,6	9,19	964,63	7,67	1320,59	6,84
1987-1988	236,8	7,03	965,47	3,03	1286,93	2,85
1988-1989	251,1	1,98	957,55	2,76	1329,99	2,39
1989-1990	384,5	15,60	923,56	8,69	1380,33	6,53
1990-1991	472	17,46	946,77	16,66	1223,07	16,63
1991-1992	381,9	5,44	939,01	11,62	1197,88	11,88
1992-1993	274,7	3,87	944,91	4,74	1169,85	5,14
1993-1994	303,1	3,06	953,52	4,75	1262,19	4,52
1994-1995	353,8	8,47	940,33	7,47	1178,96	7,90
1995-1996	444	16,30	949,36	13,73	1148,68	15,52
1996-1997	200,9	5,01	953,30	2,73	1236,57	2,70
1997-1998	371	13,24	970,06	6,60	1238,25	6,75
1998-1999	236,6	2,14	959,09	3,25	1323,06	2,85
1999-2000	242,4	4,41	965,27	2,49	1292,36	2,32
2000-2001	403,1	9,12	969,20	8,79	1343,21	7,65
2001-2002	357	9,28	962,46	8,59	1287,84	8,01
2002-2003	316,2	2,76	974,28	5,87	1315,27	5,38
2003-2004	380,1	7,50	948,06	8,94	1096,85	11,02
2004-2005	156,2	2,03	926,09	1,51	1186,62	1,53
2005-2006	285,3	5,97	943,92	3,22	1243,92	3,09

Tableau: 3 Données du modèle GR1A de la station du Sidi Bel Abbès

Année	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
1968-1969	403,2	10,84	962,9	10,73	1229,99	11,48
1969-1970	427,0	15,92	964,36	13,76	1280,33	13,67
1970-1971	376,1	11,30	962,98	10,62	1250,59	11,01
1971-1972	523,6	18,44	968,36	21,50	1246,96	22,62
1972-1973	438,2	17,05	962,78	17,10	1320,59	15,98
1973-1974	446,6	14,91	968,18	15,88	1286,93	15,74
1974-1975	393,3	9,65	969,36	11,95	1329,99	11,15
1975-1976	389,7	10,40	974,18	10,73	1280,33	10,87
1976-1977	381,8	11,18	971,81	10,22	1310,33	9,86
1977-1978	256,8	7,90	973,74	4,09	1270,74	4,20
1978-1979	263,9	5,27	968,81	3,37	1208,81	3,78
1979-1980	359,5	7,64	970,78	7,23	1201,45	8,22
1980-1981	334,1	7,47	949,13	7,47	1174,84	8,50
1981-1982	214,6	6,22	935,91	2,69	1243,04	2,67
1982-1983	242,0	6,67	947,06	2,59	1177,42	2,93
1983-1984	216,6	4,71	947,14	2,13	1145,9	2,55
1984-1985	319,5	7,27	935,52	5,29	1250,59	5,19
1985-1986	337,1	6,29	952,29	7,08	1246,96	7,22
1986-1987	296,0	9,15	964,63	5,26	1320,59	4,92
1987-1988	220,7	6,75	965,47	2,46	1286,93	2,42
1988-1989	224,2	1,19	957,55	2,14	1329,99	1,95
1989-1990	276,2	1,05	923,56	3,84	1380,33	3,03
1990-1991	371,7	8,02	946,77	8,41	1223,07	8,81
1991-1992	308,8	5,86	939,01	6,50	1197,88	6,98
1992-1993	223,5	4,16	944,91	2,72	1169,85	3,10
1993-1994	257,3	3,29	953,52	3,03	1262,19	3,03
1994-1995	245,7	4,02	940,33	3,02	1178,96	3,36
1995-1996	583,7	18,96	949,36	25,17	1148,68	29,73
1996-1997	241,8	5,65	953,3	5,45	1236,57	5,66
1997-1998	306,1	5,38	970,06	4,67	1238,25	5,01
1998-1999	247,6	2,86	959,09	3,31	1323,06	3,05
1999-2000	234,3	6,09	965,27	2,51	1292,36	2,45
2000-2001	367,1	8,23	969,2	7,25	1343,21	6,63
2001-2002	324,3	7,28	962,46	6,88	1287,84	6,73
2002-2003	296,6	5,42	974,28	5,05	1315,27	4,86
2003-2004	361,7	8,79	948,06	8,13	1096,85	10,52
2004-2005	209,7	3,32	926,09	2,79	1186,62	2,97
2005-2006	308,0	5,66	943,92	4,68	1243,92	4,71

Tableau: 4 Données du modèle GR2M de la station d' El Haçaïba

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc	Débit simulé	ETP Thornthwaite	Débit simulé
janv-90	112,40	7,41	36,46	19,15	26,22	20,85
févr-90	0,00	3,98	49,09	7,59	49,90	8,34
mars-90	12,90	1,99	62,97	4,46	63,66	4,90
avr-90	119,60	6,88	78,06	12,57	62,09	14,32
mai-90	34,40	2,82	107,94	6,32	103,80	7,45
juin-90	7,20	0,91	124,47	2,28	163,76	2,60
juil-90	0,00	0,69	136,65	0,81	198,12	0,92
août-90	2,70	0,17	128,45	0,32	206,40	0,37
sept-90	29,30	0,97	103,15	0,19	201,67	0,18
oct-90	16,50	0,54	71,84	0,10	98,74	0,09
nov-90	29,40	0,24	46,57	0,08	55,53	0,05
déc-90	63,70	0,35	34,36	0,21	27,94	0,09
janv-91	48,00	0,35	34,48	0,40	25,20	0,20
févr-91	47,90	0,32	38,96	0,75	27,31	0,46
mars-91	203,70	10,73	57,44	12,86	49,85	12,33
avr-91	1,20	5,59	72,26	4,32	51,14	4,68
mai-91	10,70	3,70	99,40	2,00	77,75	2,43
juin-91	3,40	0,87	120,59	0,81	139,72	1,02
juil-91	4,10	0,54	137,22	0,34	195,09	0,43
août-91	14,10	0,39	130,52	0,17	214,72	0,21
sept-91	17,10	0,16	99,43	0,09	163,84	0,10
oct-91	30,00	0,20	67,97	0,06	82,00	0,06
nov-91	24,10	0,09	44,37	0,05	50,78	0,04
déc-91	26,70	0,07	34,31	0,05	31,41	0,03
janv-92	29,30	0,20	33,62	0,07	23,52	0,04
févr-92	12,50	0,02	42,28	0,06	34,13	0,04
mars-92	94,30	0,47	53,47	0,57	39,88	0,47
avr-92	45,40	0,87	77,89	0,81	64,74	0,80
mai-92	77,20	0,92	105,87	1,65	96,91	1,89
juin-92	12,80	0,34	112,06	0,80	102,63	0,97
juil-92	0,70	0,28	137,22	0,32	192,23	0,39
août-92	11,80	0,10	130,52	0,15	211,48	0,19
sept-92	26,40	0,11	97,60	0,09	148,91	0,10
oct-92	15,10	0,12	68,56	0,05	83,82	0,05
nov-92	21,50	0,09	45,92	0,04	56,24	0,03
déc-92	25,30	0,01	36,02	0,04	35,90	0,02
janv-93	1,00	0,04	32,51	0,02	22,32	0,01
févr-93	54,90	0,02	39,22	0,07	28,58	0,05
mars-93	23,50	0,01	58,22	0,09	52,70	0,06
avr-93	50,10	0,14	78,73	0,21	68,15	0,18
mai-93	52,70	0,05	105,72	0,37	97,23	0,37
juin-93	1,00	0,03	118,73	0,16	129,74	0,17
juil-93	0,00	0,01	135,09	0,07	178,25	0,08
août-93	3,20	0,02	128,58	0,03	195,90	0,04
sept-93	18,60	0,22	91,57	0,02	114,88	0,02
oct-93	16,80	0,22	68,54	0,01	84,69	0,01
nov-93	50,90	0,50	45,39	0,02	55,22	0,02
déc-93	23,40	0,04	34,82	0,03	33,51	0,02
janv-94	60,60	0,41	34,91	0,13	24,97	0,10
févr-94	50,40	0,22	41,03	0,34	30,31	0,32
mars-94	5,80	0,18	60,41	0,21	57,15	0,21
avr-94	52,40	0,30	78,42	0,42	65,35	0,48

mai-94	13,40	0,04	109,53	0,26	110,66	0,31
juin-94	0,70	0,04	120,50	0,11	138,67	0,14
juil-94	9,70	0,04	138,87	0,06	207,65	0,07
août-94	0,40	0,08	129,53	0,02	207,74	0,03
sept-94	48,50	0,40	92,33	0,03	118,49	0,02
oct-94	44,20	0,30	70,65	0,04	93,28	0,03
nov-94	53,10	0,59	46,59	0,09	57,94	0,06
déc-94	19,70	0,01	33,59	0,09	28,43	0,06
janv-95	34,30	0,04	35,06	0,15	26,29	0,10
févr-95	39,30	0,04	45,10	0,28	41,17	0,22
mars-95	95,30	0,73	56,19	1,53	46,28	1,49
avr-95	15,30	0,11	75,32	0,95	57,98	1,04
mai-95	0,00	0,25	108,55	0,40	106,62	0,46
juin-95	1,90	0,58	117,80	0,17	125,15	0,21
juil-95	0,00	0,04	133,51	0,07	169,19	0,09
août-95	2,20	0,30	125,64	0,03	176,27	0,04
sept-95	14,80	0,05	91,76	0,02	115,17	0,02
oct-95	36,40	0,18	73,23	0,02	107,31	0,02
nov-95	11,00	0,04	47,69	0,01	63,63	0,01
déc-95	39,60	0,04	39,39	0,02	46,79	0,01
janv-96	65,00	0,36	41,85	0,11	44,52	0,08
févr-96	85,40	0,13	44,25	0,71	40,00	0,59
mars-96	56,10	0,87	55,51	1,30	45,70	1,25
avr-96	44,80	0,75	77,00	1,51	63,51	1,64
mai-96	19,40	0,63	100,54	0,91	81,34	1,10
juin-96	11,80	0,88	121,16	0,46	141,40	0,58
juil-96	54,00	0,30	133,42	0,49	168,90	0,58
août-96	4,20	0,11	123,55	0,21	163,57	0,25
sept-96	19,80	0,31	92,83	0,12	121,53	0,13
oct-96	11,60	0,11	67,53	0,06	80,54	0,07
nov-96	0,40	0,11	46,13	0,03	58,23	0,03
déc-96	17,80	0,09	38,91	0,02	46,19	0,02
janv-97	62,00	0,05	39,88	0,07	36,36	0,05
févr-97	0,00	0,02	45,42	0,04	40,75	0,03
mars-97	2,00	0,17	57,89	0,02	49,52	0,01
avr-97	46,90	0,51	81,93	0,06	76,22	0,04
mai-97	11,90	0,02	107,04	0,04	100,98	0,03
juin-97	0,00	0,00	119,91	0,02	136,01	0,02
juil-97	0,60	0,00	130,58	0,01	155,31	0,01
août-97	27,90	0,74	125,25	0,01	177,00	0,01
sept-97	166,70	0,95	97,53	0,47	150,32	0,38
oct-97	11,10	1,48	74,25	0,27	113,67	0,21
nov-97	44,70	0,39	47,84	0,36	63,26	0,22
déc-97	35,30	0,18	37,65	0,43	39,55	0,24
janv-98	12,40	0,11	39,14	0,31	34,91	0,17
févr-98	31,20	0,11	47,63	0,38	47,89	0,22
mars-98	8,50	0,11	58,48	0,24	51,72	0,14
avr-98	9,00	0,05	77,96	0,15	64,43	0,10
mai-98	44,10	0,14	103,32	0,22	88,46	0,17
juin-98	0,00	0,04	122,68	0,10	150,26	0,08
juil-98	0,00	0,15	136,32	0,04	189,45	0,04
août-98	8,00	0,24	127,26	0,02	190,35	0,02
sept-98	2,20	0,15	97,34	0,01	148,84	0,01
oct-98	1,30	0,11	68,43	0,00	83,07	0,00
nov-98	19,10	0,11	45,10	0,00	52,43	0,00

déc-98	4,90	0,11	32,35	0,00	25,89	0,00
janv-99	42,80	0,04	37,81	0,00	30,31	0,00
févr-99	34,40	0,04	39,48	0,01	26,25	0,01
mars-99	131,10	1,19	58,19	0,66	49,68	0,71
avr-99	0,00	1,05	79,15	0,31	66,93	0,36
mai-99	0,20	0,12	112,50	0,14	124,58	0,17
juin-99	0,00	0,05	123,42	0,06	156,45	0,07
juil-99	0,00	0,05	136,47	0,03	194,50	0,03
août-99	0,60	0,04	128,84	0,01	206,84	0,02
sept-99	36,40	0,11	97,01	0,01	148,32	0,01
oct-99	22,20	0,12	74,72	0,01	117,31	0,01
nov-99	56,80	0,05	42,53	0,03	42,26	0,01
déc-99	86,10	0,05	35,76	0,26	33,11	0,18
janv-00	1,20	0,04	33,06	0,15	21,02	0,11
févr-00	0,00	0,04	44,98	0,08	39,22	0,06
mars-00	9,40	0,05	59,18	0,06	52,91	0,05
avr-00	12,90	0,05	78,91	0,05	66,45	0,04
mai-00	13,40	0,05	109,88	0,03	112,52	0,04
juin-00	0,00	0,05	123,64	0,01	156,90	0,02
juil-00	0,00	0,05	137,16	0,01	197,85	0,01
août-00	4,00	0,05	128,46	0,00	202,06	0,00
sept-00	28,20	0,05	96,40	0,00	143,51	0,00
oct-00	112,30	0,59	68,59	0,08	83,34	0,06
nov-00	42,50	0,05	45,00	0,16	51,22	0,11
déc-00	15,70	0,05	39,05	0,13	43,95	0,10
janv-01	121,30	1,85	39,11	1,70	32,55	1,50
févr-01	52,90	1,43	43,41	2,49	33,75	2,51
mars-01	17,40	0,05	63,80	1,61	67,09	1,72
avr-01	1,40	0,05	77,89	0,73	61,95	0,83
mai-01	7,00	0,29	104,35	0,37	90,19	0,45
juin-01	2,90	0,19	125,74	0,16	170,22	0,21
juil-01	0,00	0,05	136,52	0,07	194,53	0,09
août-01	1,50	0,05	129,33	0,03	210,86	0,04
sept-01	22,70	0,05	97,81	0,02	153,26	0,02
oct-01	45,20	0,15	76,75	0,02	130,64	0,02
nov-01	69,60	0,24	44,53	0,09	47,91	0,05
déc-01	34,20	0,22	34,66	0,13	29,20	0,08

Tableau: 5 Données du modèle GR2M de la station du Sidi Ali Benyoub

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc	Débit simulé	ETP Thornthwaite	Débit simulé
janv-90	112,40	0,55	36,46	22,42	26,22	26,68
févr-90	0,00	0,50	49,09	11,70	49,90	12,75
mars-90	12,90	8,11	62,97	7,99	63,66	8,38
avr-90	119,60	1,00	78,06	18,94	62,09	20,72
mai-90	34,40	0,38	107,94	10,42	103,80	11,60
juin-90	7,20	0,47	124,47	4,47	163,76	4,71
juil-90	0,00	0,43	136,65	1,94	198,12	1,98
août-90	2,70	0,37	128,45	0,95	206,40	0,96
sept-90	29,30	0,80	103,15	0,66	201,67	0,57
oct-90	16,50	0,97	71,84	0,42	98,74	0,33
nov-90	29,40	0,52	46,57	0,35	55,53	0,22
déc-90	63,70	0,58	34,36	0,61	27,94	0,28
janv-91	48,00	0,54	34,48	0,94	25,20	0,43
févr-91	47,90	0,54	38,96	1,45	27,31	0,78
mars-91	203,70	10,86	57,44	14,94	49,85	13,00
avr-91	1,20	6,19	72,26	6,18	51,14	6,04
mai-91	10,70	3,41	99,40	3,39	77,75	3,64
juin-91	3,40	1,71	120,59	1,69	139,72	1,85
juil-91	4,10	0,86	137,22	0,87	195,09	0,96
août-91	14,10	0,49	130,52	0,52	214,72	0,55
sept-91	17,10	0,29	99,43	0,33	163,84	0,33
oct-91	30,00	0,33	67,97	0,26	82,00	0,22
nov-91	24,10	0,35	44,37	0,21	50,78	0,15
déc-91	26,70	0,30	34,31	0,20	31,41	0,13
janv-92	29,30	0,34	33,62	0,23	23,52	0,13
févr-92	12,50	0,32	42,28	0,19	34,13	0,11
mars-92	94,30	0,66	53,47	0,94	39,88	0,68
avr-92	45,40	0,89	77,89	1,29	64,74	1,11
mai-92	77,20	1,98	105,87	2,40	96,91	2,45
juin-92	12,80	0,99	112,06	1,40	102,63	1,52
juil-92	0,70	0,44	137,22	0,70	192,23	0,77
août-92	11,80	0,21	130,52	0,41	211,48	0,45
sept-92	26,40	0,72	97,60	0,29	148,91	0,29
oct-92	15,10	0,25	68,56	0,19	83,82	0,18
nov-92	21,50	0,35	45,92	0,14	56,24	0,12
déc-92	25,30	0,29	36,02	0,13	35,90	0,10
janv-93	1,00	0,30	32,51	0,08	22,32	0,06
févr-93	54,90	0,31	39,22	0,19	28,58	0,12
mars-93	23,50	0,29	58,22	0,21	52,70	0,14
avr-93	50,10	0,30	78,73	0,39	68,15	0,31
mai-93	52,70	0,38	105,72	0,63	97,23	0,57
juin-93	1,00	0,22	118,73	0,35	129,74	0,33
juil-93	0,00	0,20	135,09	0,19	178,25	0,19
août-93	3,20	0,26	128,58	0,11	195,90	0,11
sept-93	18,60	0,31	91,57	0,07	114,88	0,07
oct-93	16,80	0,21	68,54	0,05	84,69	0,05
nov-93	50,90	0,72	45,39	0,07	55,22	0,06
déc-93	23,40	0,24	34,82	0,08	33,51	0,06
janv-94	60,60	0,30	34,91	0,23	24,97	0,17
févr-94	50,40	0,27	41,03	0,49	30,31	0,43
mars-94	5,80	0,24	60,41	0,36	57,15	0,33
avr-94	52,40	0,23	78,42	0,65	65,35	0,68

mai-94	13,40	0,19	109,53	0,47	110,66	0,52
juin-94	0,70	0,15	120,50	0,26	138,67	0,30
juil-94	9,70	0,09	138,87	0,16	207,65	0,19
août-94	0,40	0,11	129,53	0,09	207,74	0,11
sept-94	48,50	0,39	92,33	0,09	118,49	0,09
oct-94	44,20	0,41	70,65	0,11	93,28	0,09
nov-94	53,10	0,62	46,59	0,20	57,94	0,13
déc-94	19,70	0,23	33,59	0,19	28,43	0,13
janv-95	34,30	0,21	35,06	0,28	26,29	0,19
févr-95	39,30	0,19	45,10	0,45	41,17	0,34
mars-95	95,30	0,54	56,19	1,86	46,28	1,75
avr-95	15,30	0,80	75,32	1,37	57,98	1,42
mai-95	0,00	0,27	108,55	0,73	106,62	0,80
juin-95	1,90	0,33	117,80	0,40	125,15	0,46
juil-95	0,00	0,11	133,51	0,22	169,19	0,25
août-95	2,20	0,14	125,64	0,12	176,27	0,15
sept-95	14,80	0,16	91,76	0,08	115,17	0,09
oct-95	36,40	0,66	73,23	0,07	107,31	0,07
nov-95	11,00	0,17	47,69	0,05	63,63	0,05
déc-95	39,60	0,37	39,39	0,07	46,79	0,05
janv-96	65,00	0,47	41,85	0,20	44,52	0,15
févr-96	85,40	1,25	44,25	0,89	40,00	0,73
mars-96	56,10	0,83	55,51	1,61	45,70	1,51
avr-96	44,80	0,47	77,00	1,97	63,51	2,07
mai-96	19,40	0,34	100,54	1,41	81,34	1,60
juin-96	11,80	0,68	121,16	0,86	141,40	1,01
juil-96	54,00	0,67	133,42	0,93	168,90	1,05
août-96	4,20	0,15	123,55	0,50	163,57	0,57
sept-96	19,80	0,08	92,83	0,33	121,53	0,35
oct-96	11,60	0,17	67,53	0,21	80,54	0,22
nov-96	0,40	0,19	46,13	0,12	58,23	0,13
déc-96	17,80	0,21	38,91	0,09	46,19	0,09
janv-97	62,00	0,28	39,88	0,19	36,36	0,14
févr-97	0,00	0,19	45,42	0,12	40,75	0,09
mars-97	2,00	0,18	57,89	0,08	49,52	0,06
avr-97	46,90	0,44	81,93	0,14	76,22	0,11
mai-97	11,90	0,11	107,04	0,11	100,98	0,09
juin-97	0,00	0,07	119,91	0,06	136,01	0,06
juil-97	0,60	0,08	130,58	0,04	155,31	0,03
août-97	27,90	0,10	125,25	0,03	177,00	0,03
sept-97	166,70	0,84	97,53	0,59	150,32	0,48
oct-97	11,10	1,84	74,25	0,42	113,67	0,33
nov-97	44,70	0,30	47,84	0,56	63,26	0,37
déc-97	35,30	0,24	37,65	0,68	39,55	0,42
janv-98	12,40	0,19	39,14	0,55	34,91	0,34
févr-98	31,20	0,20	47,63	0,66	47,89	0,41
mars-98	8,50	0,14	58,48	0,48	51,72	0,31
avr-98	9,00	0,11	77,96	0,34	64,43	0,24
mai-98	44,10	0,13	103,32	0,46	88,46	0,35
juin-98	0,00	0,09	122,68	0,25	150,26	0,20
juil-98	0,00	0,09	136,32	0,14	189,45	0,12
août-98	8,00	0,09	127,26	0,09	190,35	0,07
sept-98	2,20	0,68	97,34	0,05	148,84	0,04
oct-98	1,30	0,09	68,43	0,03	83,07	0,03
nov-98	19,10	0,10	45,10	0,02	52,43	0,02

déc-98	4,90	0,12	32,35	0,01	25,89	0,01
janv-99	42,80	0,16	37,81	0,02	30,31	0,01
févr-99	34,40	0,13	39,48	0,03	26,25	0,02
mars-99	131,10	0,40	58,19	0,72	49,68	0,71
avr-99	0,00	0,12	79,15	0,43	66,93	0,46
mai-99	0,20	0,09	112,50	0,25	124,58	0,27
juin-99	0,00	0,09	123,42	0,14	156,45	0,16
juil-99	0,00	0,08	136,47	0,08	194,50	0,09
août-99	0,60	0,08	128,84	0,05	206,84	0,06
sept-99	36,40	0,43	97,01	0,04	148,32	0,04
oct-99	22,20	0,57	74,72	0,03	117,31	0,03
nov-99	56,80	0,14	42,53	0,06	42,26	0,04
déc-99	86,10	0,26	35,76	0,34	33,11	0,24
janv-00	1,20	0,22	33,06	0,24	21,02	0,18
févr-00	0,00	0,20	44,98	0,16	39,22	0,12
mars-00	9,40	0,12	59,18	0,13	52,91	0,11
avr-00	12,90	0,11	78,91	0,11	66,45	0,10
mai-00	13,40	0,66	109,88	0,09	112,52	0,08
juin-00	0,00	0,06	123,64	0,05	156,90	0,05
juil-00	0,00	0,54	137,16	0,03	197,85	0,03
août-00	4,00	0,09	128,46	0,02	202,06	0,02
sept-00	28,20	0,05	96,40	0,02	143,51	0,01
oct-00	112,30	0,75	68,59	0,12	83,34	0,09
nov-00	42,50	1,46	45,00	0,22	51,22	0,16
déc-00	15,70	0,45	39,05	0,21	43,95	0,16
janv-01	121,30	1,71	39,11	1,79	32,55	1,58
févr-01	52,90	2,84	43,41	2,76	33,75	2,78
mars-01	17,40	2,18	63,80	2,10	67,09	2,21
avr-01	1,40	0,95	77,89	1,18	61,95	1,30
mai-01	7,00	0,13	104,35	0,72	90,19	0,83
juin-01	2,90	0,08	125,74	0,40	170,22	0,47
juil-01	0,00	0,04	136,52	0,22	194,53	0,26
août-01	1,50	0,07	129,33	0,12	210,86	0,15
sept-01	22,70	0,09	97,81	0,08	153,26	0,10
oct-01	45,20	0,05	76,75	0,09	130,64	0,08
nov-01	69,60	0,65	44,53	0,19	47,91	0,12
déc-01	34,20	0,31	34,66	0,26	29,20	0,16

Tableau: 6 Données du modèle GR2M de la station du Sidi Bel Abbès

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc	Débit simulé	ETP Thornthwaite	Débit simulé
janv-90	75,4	0,44	36,65	9,44	26,22	10,35
févr-90	0	0,37	49,09	4,96	49,90	5,58
mars-90	20,2	3,90	62,97	3,93	63,66	4,44
avr-90	62,4	1,98	78,06	5,91	62,09	6,80
mai-90	38,3	1,19	107,94	4,43	103,80	5,28
juin-90	2,2	0,37	124,47	1,95	163,76	2,27
juil-90	3,4	0,36	136,65	0,97	198,12	1,12
août-90	4,1	0,40	128,45	0,52	206,40	0,60
sept-90	11,4	0,79	103,15	0,30	201,67	0,34
oct-90	30,6	1,04	71,84	0,20	98,74	0,21
nov-90	36,9	0,27	46,57	0,18	55,53	0,16
déc-90	51,2	0,43	34,36	0,33	27,94	0,25
janv-91	45,6	0,24	34,48	0,74	25,20	0,57
févr-91	38,5	0,32	38,96	1,28	27,31	1,13
mars-91	125,7	9,99	57,44	10,32	49,85	10,74
avr-91	3,7	4,99	72,26	4,35	51,14	4,91
mai-91	4,7	3,17	99,40	2,07	77,75	2,47
juin-91	5,4	1,24	120,59	1,07	139,72	1,29
juil-91	0,4	0,64	137,22	0,56	195,09	0,68
août-91	10,8	0,67	130,52	0,33	214,72	0,39
sept-91	6,8	0,42	99,43	0,19	163,84	0,23
oct-91	17,2	0,39	67,97	0,12	82,00	0,14
nov-91	36,0	0,43	44,37	0,10	50,78	0,11
déc-91	13,5	0,38	34,31	0,08	31,41	0,08
janv-92	26,8	0,34	33,62	0,09	23,52	0,08
févr-92	17,8	0,41	42,28	0,10	34,13	0,09
mars-92	68,0	0,52	53,47	0,55	39,88	0,55
avr-92	25,8	0,73	77,89	0,63	64,74	0,71
mai-92	3,1	0,63	105,87	0,38	96,91	0,43
juin-92	12,9	0,46	112,06	0,25	102,63	0,30
juil-92	0,0	0,40	137,22	0,15	192,23	0,18
août-92	1,2	0,10	130,52	0,09	211,48	0,11
sept-92	0,0	0,15	97,60	0,06	148,91	0,07
oct-92	12,3	0,14	68,56	0,04	83,82	0,04
nov-92	19,7	0,44	45,92	0,03	56,24	0,03
déc-92	8,5	0,39	36,02	0,02	35,90	0,02
janv-93	1,3	0,38	32,51	0,01	22,32	0,01
févr-93	63,2	0,49	39,22	0,06	28,58	0,06
mars-93	11,4	0,39	58,22	0,06	52,70	0,06
avr-93	36,6	0,32	78,73	0,13	68,15	0,14
mai-93	25,0	0,35	105,72	0,15	97,23	0,18
juin-93	2,5	0,32	118,73	0,10	129,74	0,11
juil-93	0,0	0,31	135,09	0,06	178,25	0,07
août-93	5,3	0,34	128,58	0,04	195,90	0,05
sept-93	10,3	0,31	91,57	0,02	114,88	0,03
oct-93	22,9	0,33	68,54	0,02	84,69	0,02
nov-93	51,7	0,19	45,39	0,04	55,22	0,04
déc-93	4,6	0,23	34,82	0,03	33,51	0,03
janv-94	44,3	0,29	34,91	0,12	24,97	0,10

févr-94	35,5	0,38	41,03	0,29	30,31	0,26
mars-94	10,7	0,27	60,41	0,25	57,15	0,25
avr-94	34,1	0,32	78,42	0,37	65,35	0,40
mai-94	7,7	0,46	109,53	0,25	110,66	0,28
juin-94	0,0	0,20	120,50	0,15	138,67	0,17
juil-94	9,1	0,18	138,87	0,10	207,65	0,11
août-94	0,0	0,15	129,53	0,06	207,74	0,07
sept-94	57,8	0,01	92,33	0,07	118,49	0,07
oct-94	15,6	0,02	70,65	0,05	93,28	0,05
nov-94	17,6	0,01	46,59	0,05	57,94	0,04
déc-94	22,2	0,15	33,59	0,05	28,43	0,04
janv-95	18,5	0,44	35,06	0,06	26,29	0,04
févr-95	23,8	0,42	45,10	0,09	41,17	0,07
mars-95	82,4	0,91	56,19	0,88	46,28	0,80
avr-95	20,0	0,85	75,32	0,83	57,98	0,84
mai-95	0,0	0,44	108,55	0,46	106,62	0,47
juin-95	0,2	0,35	117,80	0,26	125,15	0,28
juil-95	0,0	0,31	133,51	0,15	169,19	0,16
août-95	3,7	0,61	125,64	0,09	176,27	0,10
sept-95	22,8	0,83	91,76	0,06	115,17	0,07
oct-95	11,0	0,24	73,23	0,04	107,31	0,04
nov-95	16,9	0,24	47,69	0,03	63,63	0,03
déc-95	41,4	0,29	39,39	0,05	46,79	0,04
janv-96	60,9	0,64	41,85	0,27	44,52	0,20
févr-96	82,7	2,65	44,25	2,06	40,00	1,65
mars-96	42,6	2,87	55,51	3,03	45,70	2,72
avr-96	42,7	3,88	77,00	3,44	63,51	3,48
mai-96	33,5	3,76	100,54	2,73	81,34	3,05
juin-96	57,7	3,92	121,16	2,83	141,40	3,44
juil-96	18,0	2,77	133,42	1,57	168,90	1,84
août-96	3,1	1,91	123,55	0,80	163,57	0,93
sept-96	19,6	0,80	92,83	0,47	121,53	0,53
oct-96	4,7	0,51	67,53	0,27	80,54	0,31
nov-96	6,7	0,34	46,13	0,16	58,23	0,18
déc-96	19,9	0,29	38,91	0,11	46,19	0,12
janv-97	47,6	0,37	39,88	0,16	36,36	0,14
févr-97	0,0	0,29	45,42	0,10	40,75	0,09
mars-97	0,0	0,31	57,89	0,06	49,52	0,06
avr-97	29,9	0,32	81,93	0,07	76,22	0,07
mai-97	15,1	0,29	107,04	0,06	100,98	0,06
juin-97	1,0	0,28	119,91	0,04	136,01	0,04
juil-97	0,7	0,26	130,58	0,02	155,31	0,02
août-97	11,5	0,01	125,25	0,02	177,00	0,02
sept-97	64,0	0,04	97,53	0,04	150,32	0,03
oct-97	30,9	0,07	74,25	0,06	113,67	0,04
nov-97	57,6	0,37	47,84	0,22	63,26	0,11
déc-97	28,0	0,29	37,65	0,34	39,55	0,17
janv-98	21,4	0,26	39,14	0,41	34,91	0,21
févr-98	42,7	0,47	47,63	0,83	47,89	0,50
mars-98	12,8	0,60	58,48	0,67	51,72	0,43
avr-98	31,5	0,79	77,96	0,75	64,43	0,56
mai-98	33,0	0,52	103,32	0,75	88,46	0,65

juin-98	2,1	0,46	122,68	0,42	150,26	0,38
juil-98	0,0	0,21	136,32	0,24	189,45	0,22
août-98	4,8	0,20	127,26	0,15	190,35	0,14
sept-98	3,8	0,82	97,34	0,09	148,84	0,08
oct-98	0,8	0,18	68,43	0,05	83,07	0,05
nov-98	22,4	0,22	45,10	0,04	52,43	0,04
déc-98	40,7	0,18	32,35	0,05	25,89	0,04
janv-99	38,7	0,22	37,81	0,10	30,31	0,09
févr-99	87,7	1,23	39,48	1,27	26,25	1,28
mars-99	88,6	3,99	58,19	5,85	49,68	6,55
avr-99	0,0	2,14	79,15	2,59	66,93	3,01
mai-99	0,2	0,91	112,50	1,24	124,58	1,44
juin-99	0,5	0,12	123,42	0,65	156,45	0,75
juil-99	0,0	0,12	136,47	0,36	194,50	0,42
août-99	1,9	0,11	128,84	0,21	206,84	0,24
sept-99	36,0	0,33	97,01	0,14	148,32	0,16
oct-99	15,0	0,32	74,72	0,09	117,31	0,10
nov-99	60,9	0,24	42,53	0,16	42,26	0,13
déc-99	65,1	0,39	35,76	0,69	33,11	0,50
janv-00	0,1	0,25	33,06	0,44	21,02	0,34
févr-00	0,0	0,26	44,98	0,28	39,22	0,22
mars-00	11,1	0,26	59,18	0,22	52,91	0,19
avr-00	18,0	0,23	78,91	0,19	66,45	0,18
mai-00	27,0	0,98	109,88	0,19	112,52	0,20
juin-00	0,2	0,15	123,64	0,12	156,90	0,12
juil-00	0,0	0,59	137,16	0,07	197,85	0,08
août-00	1,0	0,13	128,46	0,04	202,06	0,05
sept-00	30,1	0,15	96,40	0,03	143,51	0,03
oct-00	70,7	0,07	68,59	0,10	83,34	0,08
nov-00	71,2	1,78	45,00	0,59	51,22	0,41
déc-00	21,0	3,97	39,05	0,67	43,95	0,47
janv-01	84,5	2,74	39,11	3,41	32,55	2,61
févr-01	45,6	1,95	43,41	4,80	33,75	4,26
mars-01	1,3	1,53	63,80	2,35	67,09	2,20
avr-01	11,9	0,96	77,89	1,44	61,95	1,43
mai-01	6,3	0,74	104,35	0,81	90,19	0,84
juin-01	0,0	0,77	125,74	0,44	170,22	0,46
juil-01	0,0	0,53	136,52	0,25	194,53	0,27
août-01	0,0	0,37	129,33	0,15	210,86	0,16
sept-01	15,5	0,22	97,81	0,09	153,26	0,10
oct-01	33,2	0,17	76,75	0,07	130,64	0,07
nov-01	120,8	0,90	44,53	0,93	47,91	0,64
déc-01	32,4	1,99	34,66	1,35	29,20	0,98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Modélisation utilisée au sein du modèle hydrodynamique de MIKE SHE.....	22
Tableau 2 : Caractéristiques du module HYDRIFLUX.....	27
Tableau 3: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants	33
Tableau 4: Répartition hypsométrique du bassin versant de l’oued Mekerra.....	40
Tableau 5: Classification des reliefs d’après l’ORSTOM	42
Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles et annuelles à la station de Sidi Bel Abbés.....	44
Tableau 7: Evaporation moyennes mensuelles et annuelles à la station de Sidi Bel Abbés.....	45
Tableau 8: Répartition Mensuelle de l’évapotranspiration potentielle (Région de Sidi Bel Abbés)	45
Tableau 9 : Paramètres climatiques enregistrés à la station de Sidi Bel Abbés.....	45
Tableau 10: Caractéristiques du réseau hydrographique (Source : ABH).....	45
Tableau 11 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	58
Tableau 12 : Caractéristiques des stations hydrométriques.....	63
Tableau13 : Représentation les différentes types de régression du trois stations.....	70
Tableau14 : Représentation les différentes types de régression du trois stations.....	74
Tableau15 : Représentation les résultats obtenus par l’utilisation de GR1A.....	79
Tableau 16 : les variations de coefficient de la corrélation.....	81
Tableau 17: Représentation les résultats obtenus par l’utilisation de GR2M.....	83
Tableau 18 : les variations de coefficient de la corrélation.....	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Le cycle hydrologique.....	13
Figure 2 : Frontières d'un bassin versant	14
Figure 3: Les variables d'un modèle hydrologique	17
Figure 4: Schéma d'un modèle hydrologique.....	17
Figure 5 : Fonction de production du modèle CEQUEAU.....	24
Figure 6: Fonction de transfert du modèle CEQUEAU.....	24
Figure 7 : Index topographique en fonction de l'aire drainante et de la pente locale du bassin.....	25
Figure 8 : Schématisation de la formation du ruissellement dans TOPMODEL.....	26
Figure 9 : Organisation modulaire d'AGRIFLUX.....	27
Figure 10 : Cycle de l'eau utilisé dans HYDRIFLUX	28
Figure 11 : Schéma de la structure du modèle GR2M.....	32
Figure 12 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mactaa.....	37
Figure 13: Situation du bassin versant de l'oued Mekerra dans le bassin de la Mactaa.....	38
Figure 14: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Mekerra.....	40
Figure 15 : Bassin versant de l'oued Mekerra	43
Figure 16: Répartition mensuelle des températures moyennes mensuelles du bassin de l'oued Mekerra.	44
Figure 17: Carte géologique de l'Atlas tellien.....	48
Figure 18: Carte tectonique de la région d'Oran.....	53
Figure 19: Localisation des stations hydro climatologiques.....	59
Figure 20 : Variations annuelles des précipitations.....	60
Figure 21 : Ajustement des précipitations annuelles à Rayleigh.....	61
Figure 22 : Variations mensuelles des précipitations.....	62
Figure 23: Variations saisonnières des précipitations.....	63
Figure 24 : Variations annuelles des débits.....	64
Figure 25: Ajustement des lames d'eau écoulées annuels à une loi normal.....	65
Figure 26: Variations mensuelles des lames d'eau écoulée.....	66
Figure 27: Variations saisonnières des lames d'eau écoulée.....	66
Figure28: Corrélation pluie –débit de la station d' El Haçaïba.....	71
Figure 29: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Ali Benyoub.....	72
Figure 30: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Bel Abbes.....	73
Figure 31: Corrélation pluie –débit de la station de El Haçaïba.....	75
Figure 32: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Ali Benyoub.....	76
Figure 33: Corrélation pluie –débit de la station de Sidi Bel Abbes.....	77

Figure 34: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba du modèle GR1A (Turc)	79
Figure 35: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba du modèle GR1A (Thorntwaite)	79
Figure 36: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR1A (Turc)	80
Figure 37: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR1A (Thorntwaite).....	80
Figure 38: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR1A (Turc).....	80
Figure 39: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR1A (Thorntwaite).....	80
Figure 40: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Turc)	81
Figure 41: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Thorntwaite).....	81
Figure 42: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Turc)	81
Figure 43: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Thorntwaite)	81
Figure 44: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes (Turc)	82
Figure 45: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes (Thorntwaite)	82
Figure 46: résultats obtenus à la station d'El Haçaïba du modèle GR2M (Turc)	84
Figure 47: résultats obtenus à la station d'El Haçaïba du modèle GR2M (Thorntwaite)	84
Figure 48: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR2M (Turc)	85
Figure 49: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub du modèle GR2M (Thorntwaite)	85
Figure 50: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR2M (Turc)	86
Figure 51: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes du modèle GR2M (Thorntwaite)	86
Figure 52: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Turc)	87
Figure 53: résultats obtenus à la station d' El Haçaïba (Thorntwaite)	87
Figure 54: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Turc).....	87
Figure 55: résultats obtenus à la station de Sidi Ali Benyoub (Thorntwaite)	87
Figure 56: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes (Turc)	88
Figure 57: résultats obtenus à la station de Sidi Bel Abbes (Thorntwaite)	88

ملخص

دراسة العلاقة بين المطر و التدفق، السنوية و الشهرية الممتدة على مدى 25 سنة، على مستوى الثلاث محطات: الحسيبة ، سيدي علي بن يوب و سيدي بلعباس. هذه المحطات موزعة من أعلى إلى أسفل حوض "مكرة" و الذي مساحته 4102 كلم² النتائج المحصل عليها من دراسة تحول المطر إلى التدفق باستعمال نموذج GR1A و GR2A تظهر أن النموذجين ذات الخزانين أثبتنا النجاعة من النموذج نوع "العلبة السوداء".
و بالفعل ، النموذج GR يأخذ بعين الاعتبار التسلسل الزمني للظواهر من جهة و ضغوط العوامل المناخية (التبخّر) و كذا العوامل "الفيزيوهيدروجيولوجيا" للحوض من جهة أخرى (رطوبة التربة و التبادلات الخارجية) .

الكلمات المفتاحية : المطر ، التدفق ، الحسيبة ، سيدي علي بن يوب ، سيدس بلعباس ، واد مكرة ، GR1A و GR2A السنوية و الشهرية

RESUME

L'étude de la relation pluie - débit à l'échelle annuelle et mensuelle au niveau du bassin de la Mekerra est basée sur une série de données, relative à une période de 25 ans et mesurées aux trois stations : El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes.

Ces stations sont réparties de l'amont à l'aval du bassin versant de la Mekerra dont la superficie est de 4102 km².

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation du modèle du Génie Rural GR1A et GR2M indiquent que les modèles « à réservoirs » sont plus satisfaisants qu'un modèle de type « boîte noire ». 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 :

Pluie - Débit, El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub, Sidi Bel Abbes, bassin versant, Mekerra, GR1A, GR2M.

ABSTRACT

The rainfall-discharge relationship on an annual and monthly scale was based on climate data series for a period of 25 years corresponding of three stations: El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub and Sidi Bel Abbes. These stations are situated in the basin for Mekerra river in which the area is 4102 km².

The result obtained for simulating the transformation of rainfall into runoff by using the model of « Genie Rural » GR1A and GR2M indicates that storage-type models are far better than a simple 'black box' model in which the geological aspect and temporal chronology and effect soil moisture and the evapotranspiration parameters are taken in the account.

Key Words:

Rainfall-discharge, El Haçaïba, Sidi Ali Benyoub, Sidi Bel Abbes, basin, Mekerra, GR1A, GR2M.

