

**UNIVERSITE Saad DAHLAB - BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département des Sciences de l'Eau et Environnement**

# **MEMOIRE DE MASTER**

**Filière: Hydraulique**

**Spécialité : Sciences de l'Eau**

**Thème:**

**Application des modèles "Pluie-Débit"  
pour la prévision des crues (Cas d'Oued El Harrach)**

**Présenté par :**

**CHEBBAH Sarra**

**Devant les jury composé de:**

<b>M. KHOULI M.R.</b>	<b>MAA .U. de Blida 1</b>	<b>Président</b>
<b>M. MESSAOUD N.</b>	<b>MCA .U. de Blida 1</b>	<b>Examineur</b>
<b>M.BESSENASSE M.</b>	<b>Professeur .U. de Blida 1</b>	<b>Examineur</b>
<b>M.GUENDDOUZ H.</b>	<b>Professeur .U. de Blida 1</b>	<b>Promoteur</b>

**Promotion 2014 / 2015**

# Remerciement

Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr. GUENDDOUZ, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant mon préparation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent à Mr. CHEBBAH l'ancien directeur de l'ANRH et tout son personnel pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements.

Je remercie aussi Mr. BOUABDELLAH pour son aide et leur encouragement.

Je suis conscientes de l'honneur que ma fait

Mes remerciements s'adressent également à tous mes professeurs pour leurs générosités et leurs patiences.

Mes profonds remerciements vont également à toutes personnes qui ont m'aider et soutenue de près ou de loin.

## **Dédicace**

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde en pleine santé, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur; maman je t'adore.

A mes sœurs et mon petit frère, tous mes vœux de réussite et de bonheur.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour.

### Introduction générale

L'eau est l'une des éléments essentiels du développement durable car elle est indispensable pour assurer la vie des êtres vivants, la santé et le progrès socio-économique de nos sociétés, et cela dans le respect de l'environnement.

Il est nécessaire pour les pays aux potentialités hydriques limités de maîtriser ces ressources en eau pour leur bon développement social et économique. En ce sens, on ne peut parler de planification et de gestion de l'eau sans une évaluation correcte et suffisante de la ressource.

Les cours d'eau constituent l'une des principales sources d'eau douce exploitable pour répondre à nos différents besoins font l'objet de mesures d'observations en vue de préciser leur régime hydrologique.

L'objectif de ce travail de recherche consiste à appliquer les modèles pluie-débit pour les besoins de la prévision des crues. La connaissance des différents termes agissent sur l'équation global du bilan hydrologique est nécessaire.

L'écoulement est un facteur très important dans un bassin versant, malheureusement la maîtrise n'est pas toujours facile. Souvent nous sommes confrontés à des difficultés ou des contraintes de terrain (mesures et qualité), ainsi la qualité des données hydrométriques observées (non continues, entachées d'erreurs de mesure, absence de mesure...etc.) font que la détermination des débits d'écoulement soient très difficile à réaliser, voir impossible. Dans ce cas, seule la disponibilité des données pluviométriques permet la reconstitution des débits.

Dans la pratique quotidienne du travail de l'hydrologue, la prévision des débits de crues reste un axe de recherche important pour la protection des populations et des biens contre les inondations.

En effet, elle permet de répondre aux demandes de dimensionnement d'aménagements spécifiques (comme par exemple les ouvrages de protection; les évacuateurs de crue des barrages).

Un modèle hydrologique peut être utilisé pour de nombreuses applications, par exemple la prévision et la prédétermination des crues, reconstitution des débits non mesurés à partir de la pluie, la gestion des ressources, étude du changement climatique...etc.

Il existe aujourd'hui un très grand nombre de modèles pluie-débit à différents pas de temps, qui assurent la transformation des pluies en débits par le biais de différentes fonctions de production.

Notre travail a été mené sur le bassin versant d'El-Harrach, Il fait appelle à une modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Pour cela, nous avons testé deux modèles conceptuels à pas de temps annuel (GR1A) et mensuel (GR2M), a fin de voir l'adaptation de chaque modèle aux caractéristiques hydro climatiques du bassin d'El-Harrach.

Pour ce faire, nous divisons notre travail en quatre chapitres principaux :

**Le chapitre I** : aura pour objet principal d'impliquer le lecteur de ce document dans le sujet, à travers une synthèse bibliographique, sur les différentes modèles et leur classification et aussi sur le bilan d'eau et ses principales composantes.

**Le chapitre II** : exposera dans les détails toute la zone d'étude et ses caractéristiques géomorphologiques et hydroclimatiques.

**Le chapitre III** : établir une méthodologie de modélisation pour la prévision des débits écoulés.

**Le chapitre IV** : Discussion et l'analyse des résultats.

Et en fin une conclusion générale qui présente une synthèse des résultats obtenus dans ce mémoire.

## ***RESUME***

Chaque bassin versant a une fonction de collecteur ; il recueille les pluies et les transforme en écoulement à l'exutoire cette transformation est fonction des conditions climatiques et des caractéristiques physiques du bassin versant.

La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique.

A cet effet, nous avons opté dans cette étude pour le modèle hydrologique global GR, élaboré par le Cemagref, comportant peu de paramètres et pouvant rendre compte du comportement hydrologique de notre bassin.

Notre étude a été menée sur le bassin versant d'Oued El Harrach, qui est un oued majeur dans la Mitidja. Nous avons procédé dans un premier temps à une caractérisation de quelques facteurs en particulier physiques, géologiques et climatiques régissant l'écoulement, en traitant les principaux paramètres climatiques qui constituent les entrées du modèle hydrologique GR. Ensuite, une modélisation hydrologique pluie – débit a permis de réaliser le calage et validation des modèles hydrologiques aux pas annuel et mensuel, par la formule de l'évapotranspiration (ETP) Thornthwaite.

Les résultats de simulation obtenus par l'application des modèles (GR1A et GR2M) sur le bassin versant d'Oued El Harrach sont satisfaisants, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues ainsi que les valeurs de détermination pour les différents pas de temps envisagés sont supérieures à 70% en calage comme en validation, ce qui traduit la performance et la robustesse des modèles GR sur le bassin versant d'Oued El Harrach.

***Mots clés :*** Bassin versant, Oued El Harrach, modèle hydrologique, GR1A, GR2M.

## المخلص

كل حوض مائي لديه خاصية تجميع المياه ، يجمع المطر و يحوله الى تدفق عند المخرج ، هذا التحول يعتمد على الظروف المناخية و الخصائص الفيزيائية للحوض المائي.

المحاكاة الهيدرولوجية للحوض المائي ، وصفت بأنها تحول المطر الى تدفق من خلال استخدام نموذج هيدرولوجي.

لهذا الغرض اخترنا في الدراسة نموذج هيدرولوجي شامل للهندسة الريفية، الذي صمم من طرف Cemagref، مع عدد قليل من المعلومات يمكنه حساب سلوك الاحواض الهيدرولوجية.

وقد أجريت دراستنا هذه حول الحوض المائي لواد الحراش، وهو نهر كبير في متيجة. أجرينا الخطوة الاولى بوصف بعض العوامل الفيزيائية، الجيولوجية و المناخية خاصة التي تتحكم في التدفق ، ثم عالجتنا العوامل المناخية الرئيسية التي تشكل مدخل النموذج الهيدرولوجي GR.

بعد ذلك قمنا بالتمذجة الهيدرولوجية " مطر - تدفق " التي حققت معايرة و فاعلية النماذج الهيدرولوجية للخطوات السنوية و الشهرية.

نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق نماذج GR1A و GR2M على الحوض المائي لواد الحراش مرضية، وقيم ناش المحصل عليها و قيم تقرير للخطوات الزمنية المدروسة تفوق 70% في المعايرة و الفاعلية ، الأمر الذي يعكس فاعلية و متانة نماذج GR على الحوض المائي لواد الحراش.

**الكلمات المفتاحية :** الحوض المائي ، النموذج مطر – تدفق ، واد الحراش، GR 1A ، GR2M.

## LISTE DES FIGURES

Figure 01 : schéma du cycle de l'eau (Laborde J.P.2003) .....	05
Figure 02: Schéma représentant un bassin versant avec son entrée (pluie), son état hydrique et ses sorties (évapotranspiration et débit).....	08
Figure 03: Réponse hydrologique du bassin versant. ....	09
Figure 04: Influence de la forme de bassin versant sur l'hydrogramme de crue.....	10
Figure 05: Les différentes méthodes/échéances de prévision des crues (L.Moulin,2007).....	13
Figure 06: Représentation schématique de TOPMODEL (S1, S2, S3: niveaux dans les réservoirs; m: un des paramètres du modèle) (d'après Beven et Kirkby, 1979) .....	23
Figure 07: Evolution des travaux des modèles 'GR' .....	26
Figure 08: Situation de bassin versant d'El Harrach par apport aux grands bassins d'Algérie .....	33
Figure 09: Carte de situation du bassin versant d'El-Harrach par apport au bassin côtier Algérois .....	34
Figure 10: Carte de limites de commune de bassin d'El-Harrach .....	34
Figure 11 : Courbe hypsométrique de bassin versant El-Harrach .....	35
Figure 12: Carte présente les postes d'observation hydro-climatiques de la zone d'étude... ..	38
Figure 13: Carte présente le réseau hydrographique de la zone d'étude .....	39
Figure 14: Carte géologique de la plaine de la Mitidja .....	43
Figure 15: carte présente les deux sous bassins d'El-Harrach .....	46
Figure 16: Schéma simplifié de la présentation d'un modèle .....	47
Figure 17: Evolution annuelle des précipitations (1972-2012) à la station de Douar makli .....	49
Figure 18: Evolution annuelle des précipitations (1972-2012) à la station de Baraki... ..	50
Figure 19 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi normale.....	51
Figure 20: Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi Log normale... ..	52
Figure 21: Variation des précipitations moyennes mensuelles à Douar Makli (1972/2012)... ..	55
Figure 22: Variation des précipitations moyennes mensuelles à Baraki (1972/2012).. ..	55
Figure 23: Variations saisonnières des précipitations à Douar Makli (1972/2012).....	56
Figure 24: Variations saisonnières des précipitations à Baraki (1972/2012).....	57
Figure 25: Variations annuelles des lames d'eau écoulées (1972/1973-2012/2013) .. ..	59
Figure 26: Variations annuelles des lames d'eau écoulées (1972/1973-2007/2008) .....	59

Figure 27: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi normale.....	61
Figure 28: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi log normale.	62
Figure 29: Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1972-2012) .....	63
Figure 30 : Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1972-2007) .....	64
Figure 31: Variations saisonnières des lames d'eau écoulées (1972-2012) .....	65
Figure 32: Variations saisonnières des lames d'eau écoulées (1972-2007) .....	65
Figure 33 : Températures moyennes annuelles à Station Boufarik (1980-2004) .....	66
Figure 34: Températures moyennes mensuelles à Boufarik (1980-2004) .....	67
Figure 35: Variations annuelle des hauteurs des pluies et des lames d'eau écoulées.....	69
Figure 36: Variations annuelle des hauteurs des pluies et des lames d'eau écoulées... ..	69
Figure 37: Résultats de corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée annuelle (précipitations de station Douar Makli et lame écoulée de R.D.P) .....	71
Figure 38: Résultats de corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée annuelle (station Baraki). .....	72
Figure 39: Schéma de la structure du modèle GR2M .....	77
Figure 40: Visualisation de la qualité du calage pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons.....	82
Figure 41: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés pour la station Douar Makli – Rocher des Pigeons.....	82
Figure 42: Visualisation de la qualité du calage pour la station de Baraki.....	83
Figure 43: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés pour la station de Baraki. ....	83
Figure 44 : Validation du modèle GR1A pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons et la station Baraki.....	84
Figure 45: Calage du modèle GR2M pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons....	87
Figure 46: Calage du modèle GR2M pour la station Baraki.....	88
Figure 47: Validation du modèle GR2M pour les deux stations.....	90

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01: caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued El-Harrach .....	36
Tableau 02: Caractéristiques des stations pluviométriques .....	37
Tableau 03: Caractéristiques des stations hydrométriques .....	37
Tableau 04 : les paramètres descriptifs du réseau hydrographique.....	39
Tableau 05: caractéristiques géographiques et données disponibles des stations pluviométriques et hydrométriques choisis. ....	45
Tableau 06: caractéristiques géographiques et données disponibles de la station météorologique choisi.....	46
Tableau 07: Paramètres de position des précipitations des stations. ....	50
Tableau 08: Résultats de l'ajustement graphique.....	52
Tableau 09 : résultats de test Khi-deux .....	53
Tableau 10 : Valeurs caractéristiques de la série pluviométrique (1972/2012). ....	54
Tableau 11: Distribution saisonnières des précipitations moyennes.....	56
Tableau 12: paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Rocher des pigeons.....	60
Tableau 13: paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Baraki....	60
Tableau 14: Résultats de l'ajustement graphique.....	62
Tableau 15 : résultats de test de Khi-deux.....	63
Tableau 16: Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée (Rocher des pigeons).....	63
Tableau 17: Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée (Baraki) .....	64
Tableau 18: répartition des lames d'eau écoulées saisonnière.....	64
Tableau 19 : Températures moyennes mensuelles à la station de Boufarik (1980-2004).....	67
Tableau 20: résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et lame d'eau écoulée annuelle .....	70
Tableau 21 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.....	79
Tableau 22 : Résultat du calage du modèle GR1A.....	80
Tableau 23 ; donne les variations des coefficients de détermination et de corrélation Q simulé – Q observé relatifs. ....	84
Tableau 24: Résultat du calage du modèle GR2M.....	85
Tableau 25: Valeurs des paramètres après calibration et performances du modèle GR2M. ....	89
Tableau 26: Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR2M.....	89

## RECOMMANDATIONS

Malgré que les résultats de simulation obtenus par l'application des modèles (GR1A, GR2M) sur le bassin versant d'Oued El Harrach soient satisfaisants, il reste difficile à les appliquer pour une longue série chronologique. En effet l'insuffisance de stations pluviographiques bien réparties sur l'ensemble du bassin influe sur la qualité des données d'entrée au modèle, et par conséquent sur la qualité du calage et de validation. Aussi, la modélisation des phénomènes extrême reste difficile si non impossible. Pour une poursuite des études hydrologiques approfondies dans cette région, nous suggérons donc :

- ❖ Mettre en place d'un réseau hydrométrique adéquat, où les séries d'observation disponibles seraient longues et bien renseignées pour permettre une estimation aussi précise que possible des flux moyens entrants et sortants du bassin versant.
- ❖ Elaborer des nouvelles voies en matière de valorisation des bases d'information disponibles couvrant le bassin versant d'Oued El Harrach.
- ❖ Etablir d'autres modèles sur la région d'étude, et faire la comparaison avec les modèles GR déjà appliqués.

# Chapitre I :

## Synthèse bibliographique

## Chapitre II :

# Présentation de la zone d'étude

# Chapitre III :

## Matériels et méthodes

## Chapitre IV :

# Résultats et interprétation

# INTRODUCTION GENERALE

# CONCLUSION GENERALE

# Références bibliographiques

# Annexes

### **Introduction**

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à l'une des différentes facettes du risque hydrologique.

Nombreuses recherches se sont attachées dont le but d'étudier le lien entre la pluie et le débit dans un système hydrologique. Ces recherches ont donné naissance aux modèles pluie-débit.

### **I.1. L'hydrologie**

Il est assez difficile de définir l'hydrologie car ce n'est pas une science unifiée.

Étymologiquement "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 dans sa partie continentale. Cet immense transfert d'eau naît des variations spatiales et temporelles des flux journaliers d'énergie solaire, des hétérogénéités de la surface du globe et de la différence de mobilité de l'eau, qu'elle soit sous forme de vapeur dans l'atmosphère, liquide à la surface de la Terre ou dans le sous-sol, ou sous forme solide dans les neiges et les glaces.

Dooge (1988) 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). 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. [1]

### **I.2. Le cycle hydrologique**

Le cycle hydrologique, appelé aussi cycle de l'eau, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements accompagnés de changement d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années. [1]

En générale, le cycle hydrologique est un concept qui englobe tous les phénomènes du mouvement soient perte ou renouvellement des eaux de la terre.

Au sein d'un bassin versant, le cheminement des eaux de pluie est relativement complexe, Lorsque les précipitations (**P**) arrive à la surface du bassin, une partie est interceptée par la végétation (arbres, buissons, herbes), une partie s'écoule vers le réseau hydrographique et gagne rapidement l'exutoire c'est le ruissellement (**R**), une partie franchit le sol et le sous sol et va constituer ainsi le stock de l'eau et les réserves des nappes aquifères : ce sont les eaux d'infiltration (**I**). Sous l'action de la température, une partie de l'eau du sol est reprise par évaporation (**E**) à cette action s'ajoute la transpiration des plantes : c'est l'évapotranspiration (**ET**).

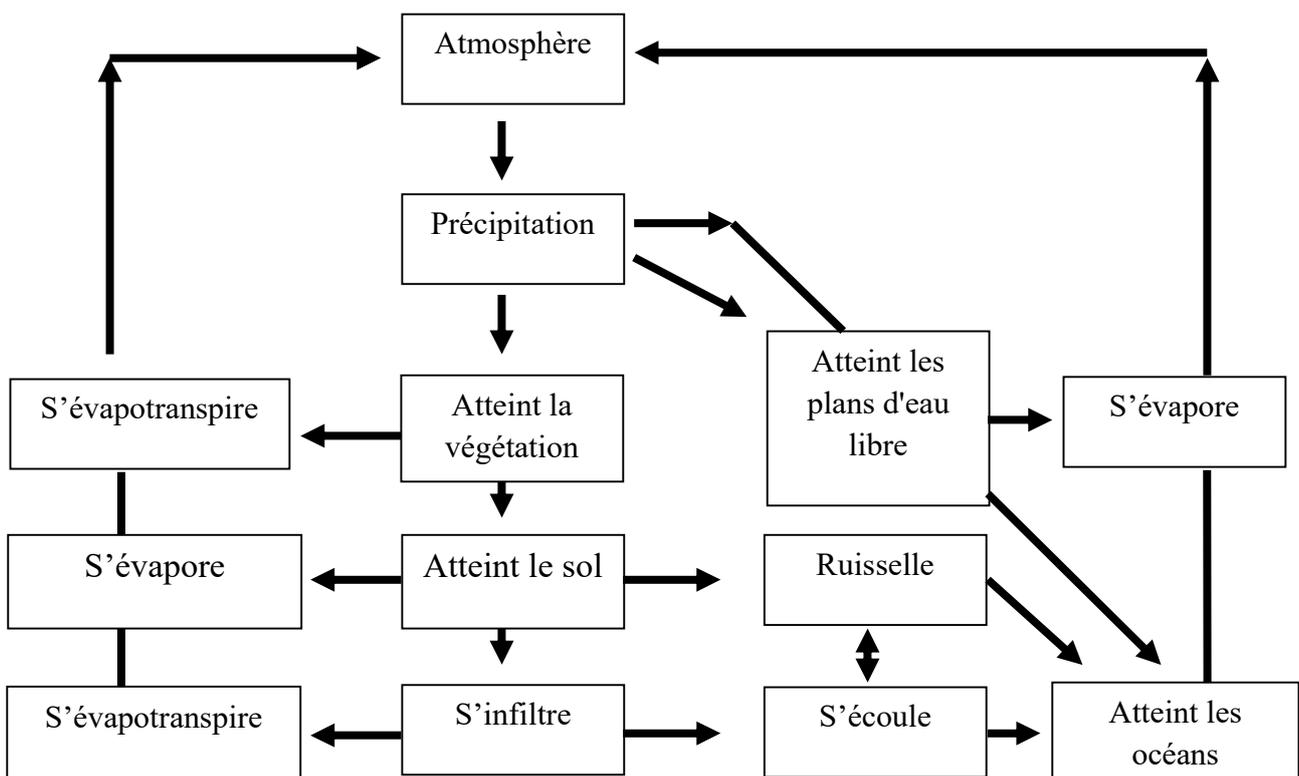


Figure 01 : schéma du cycle de l'eau. [1]

Le bilan hydrologique prend en compte non seulement ce qui entre et sort d'un bassin dans une période donnée, mais aussi ce qui est momentanément stocké ( $\Delta S$ ) ;

$$P = R + I + ET \pm \Delta S$$

Les deux facteurs du bilan qui dépendent du climat, sont les précipitations et l'évapotranspiration. Le ruissellement et l'infiltration dépendent des caractéristiques du sol, du volume de précipitation et de la topographie.

### **I.3. Composantes du bilan hydrologique**

Les éléments essentiels du bilan hydrologique d'un bassin versant sont les suivants :

- Les précipitations
- L'écoulement total
- L'évapotranspiration potentielle

#### **I.3.1. Précipitations**

La pluie constitue la source principale des écoulements. Elle permet d'augmenter le taux d'humidité du sol jusqu'à atteindre un niveau de saturation, au-delà duquel la pluie se transformera en écoulement.

#### **I.3.2. Ecoulement total**

L'écoulement comprend la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire d'un bassin versant considéré. Il représente la somme des différents termes : écoulement de surface, écoulement de subsurface et l'écoulement de base qui résulte de la vidange des nappes.

Le bilan hydrologique est caractérisé aussi par deux coefficients essentiels :

- Coefficient de ruissellement : c'est le rapport entre le volume d'eau ruisselé et le volume d'eau précipité.
- Coefficient d'écoulement : c'est le rapport entre le volume d'eau écoulé et le volume d'eau précipité.

### **I.3.3. Evapotranspiration**

Elle représente la partie de l'eau retirée des précipitations pour regagner l'atmosphère.

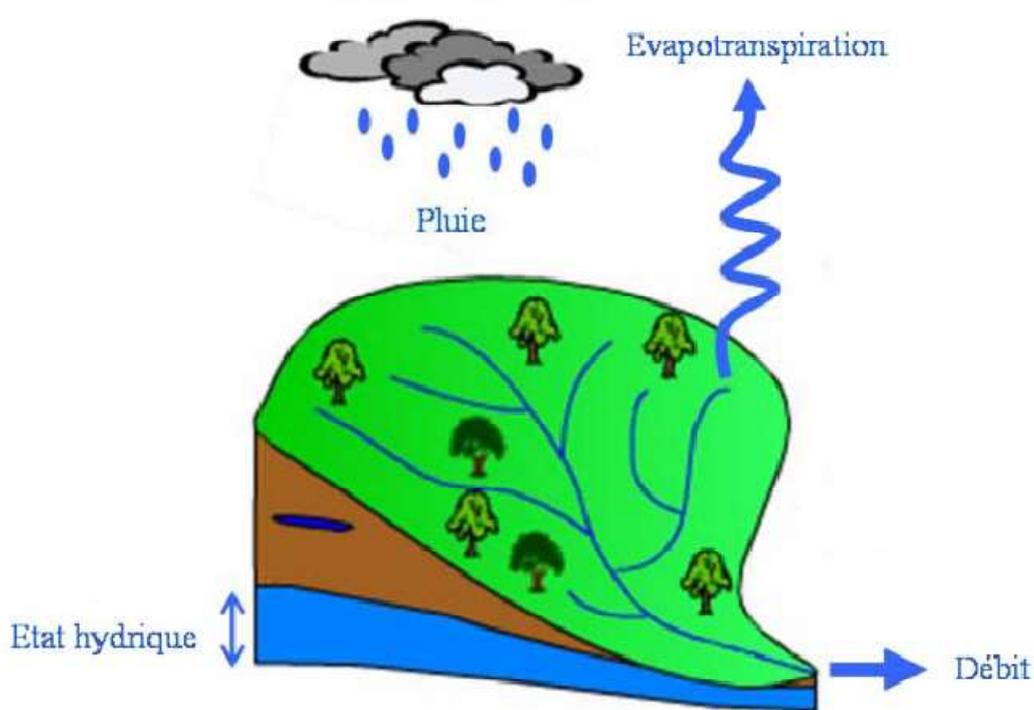
Il s'agit donc de ce qui est prélevé et restitué par les plantes, de ce qui est repris sur les surfaces libres du réseau hydrographique (généralement faible) et de ce qui est retiré des réserves en eau du sol.

L'évapotranspiration potentielle est une composante essentielle du bilan hydrologique et son étude se justifie pleinement pour connaître le potentiel hydrique du bassin versant.

#### I.4. Réponse hydrologique d'un bassin versant

D'après Musy et Higy, 2004, le bassin versant est un système correspondant à « une surface hydrologiquement close ». Ainsi, en une section droite d'un cours d'eau, le bassin versant correspond à l'ensemble de la surface qui contribue à l'écoulement de la dite section [Hubert, 2003]. Le bassin versant est défini par son exutoire et délimité par la ligne de partage des eaux. Il est caractérisé par (figure 02) :

- Ses entrées (les précipitations).
- Sa géométrie (pentes des versants), sa composition (géologie, pédologie, occupation des sols) et ses limites (lignes de partage des eaux).
- Ses états internes (humidité des sols, piézométrie).
- Ses sorties (évapotranspiration, débit à l'exutoire du bassin). [2]



**Figure 02: Schéma représentant un bassin versant avec son entrée (pluie), son état hydrique et ses sorties (évapotranspiration et débit).**

Dans une sollicitation particulière la réponse hydrologique d'un bassin versant peut être caractérisée par:

- ♣ sa vitesse de monter (temps de montée  $t_m$ ) défini comme le temps qui s'écoule entre le début de la crue et le maximum de l'hydrogramme.
- ♣ son intensité (débit de pointe  $Q_{max}$ ,  $V_{max}$  ...).
- ♣ le temps de réaction du bassin versant ; le temps de concentration des eaux sur le bassin représentant la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau parcourt le chemin hydrologique entre un bassin et son exutoire. [2]

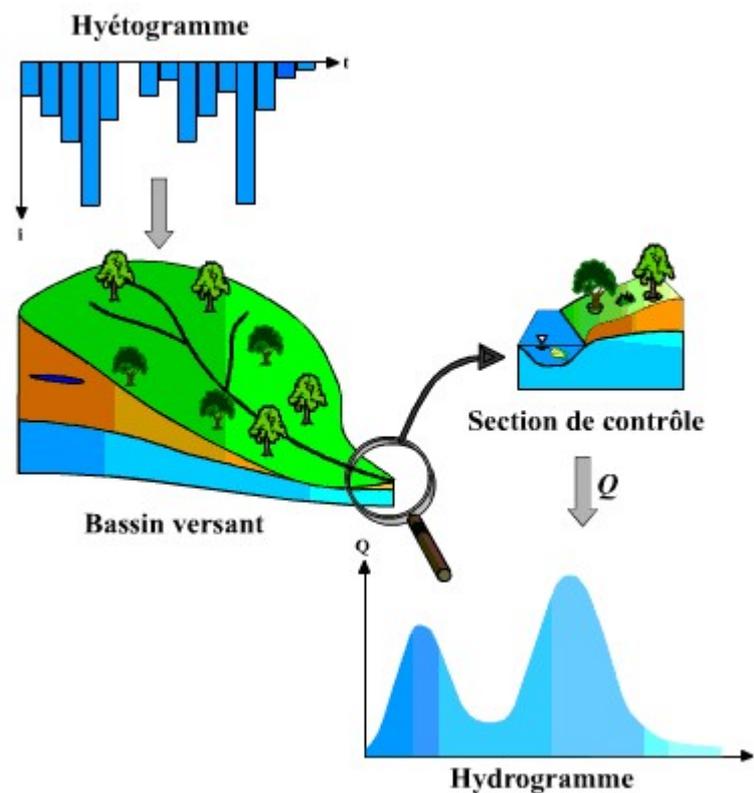
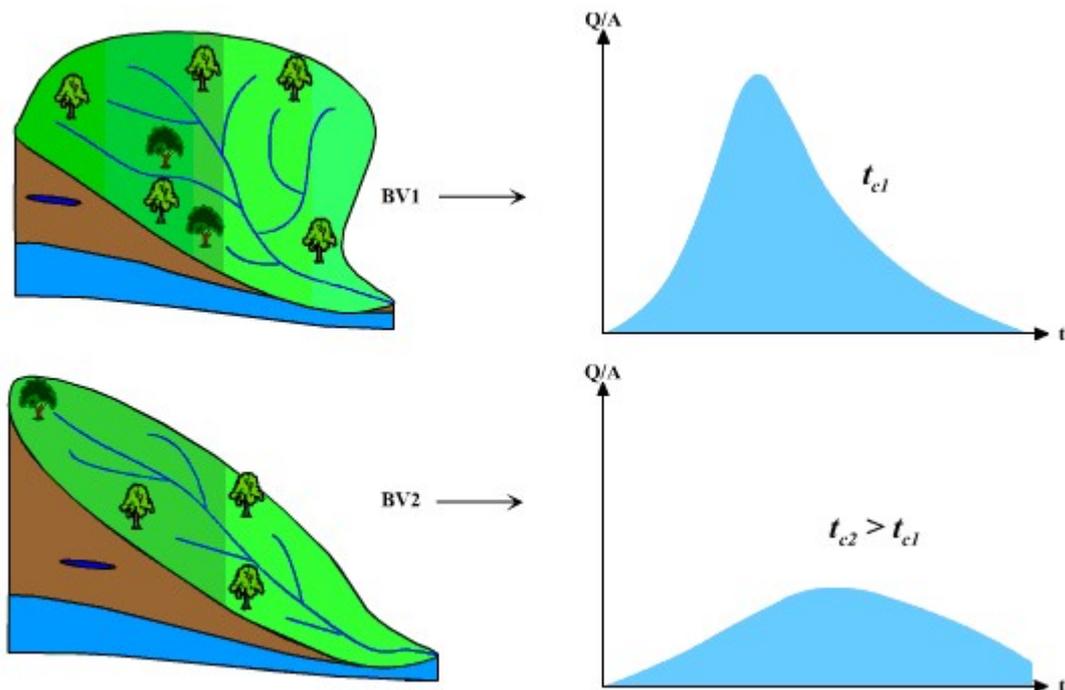


Figure 03: Réponse hydrologique du bassin versant.

La variation des propriétés des bassins versants dépend du contexte climatique, géomorphologique et géologique de la région d'étude.

L'étude de la forme de bassin est importante car elle permet de mieux comprendre le comportement hydrologique (figure 04). Un bassin de forme quasi circulaire à une réponse hydrologique beaucoup plus rapide à la même averse qu'un bassin allongé c'est-à-dire la plus part des points étant à peu près à la même distance de l'exutoire.



**Figure 04: Influence de la forme de bassin versant sur l'hydrogramme de crue.**

La nature du sol du bassin versant a un rôle important sur son comportement hydrologique. Les paramètres qu'interviennent sont la pente, la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement, la perméabilité et la rugosité de la surface qui conditionnent à leur tour la vitesse de ruissellement.

Une averse tombant sur un bassin versant aura comme conséquence, en une station de contrôle située sur le cours d'eau, une réponse pouvant être nulle (absence de modification de l'écoulement ou absence de crue) ou positive (écoulement ou crue) d'après (Andry 1998). [3] La réponse peut-être :

**Rapide** : la réponse rapide est imputable aux l'écoulement de surface à un effet piston ou encore à l'effet de macroporosité du sol.

**Retardée** : La réponse hydrologique est due principalement à l'écoulement souterrain, et la réponse de système hydrologique peut être :

**Totale** : dans ce cas la réponse hydrologique est composée à la fois par des écoulements de surface et souterrains.

**Partielle** : la réponse est le résultat d'un des deux processus (écoulement de surface ou souterrain).

### I.5. Prévision des crues

#### I.5.1. Définition de la prévision des crues

La prévision des crues est définie par :

*« Prévision du niveau, du débit, du temps d'apparition et de la durée d'une crue, et plus spécialement du débit de pointe en un point donné d'un cours d'eau, résultant des précipitations et de la fonte de la neige sur le bassin ».*

La prévision des crues se distingue de la simulation par le non connaissance des données futures. De même, elle se distingue de la prédétermination (« prediction » en anglais) par le fait que ce que l'on cherche à prévoir concerne un instant donné précis dans le futur alors que la prédétermination concerne l'ensemble des états futurs possibles (sans date précise). Ainsi, Coulibaly et al. (1999) ajoutent sur la définition de la prévision que « son objectif général est de fournir les meilleures estimations de ce

qui peut arriver en un point à une date future précise contrairement à la prédiction qui vise l'estimation des conditions futures sans référence à un temps spécifique. » [4]

Le développement récent des techniques des télécommunications, des ordinateurs et de la modélisation hydrologique a bien enrichi la prévision hydrologique. De ce point de vue, la prévision de crue d'aujourd'hui est non seulement une technique particulière en hydrologie, mais aussi une activité profitant des derniers développements technologiques. La modélisation hydrologique et la mise au point des méthodes de prévision composent cependant le noyau de n'importe quel système de prévision hydrologique. [5]

### **I.5.2. Outils de prévision**

D'après L. Moulin (2007), ils existent trois méthodes hydrologiques de prévision des crues;

- ♣ **Prévision débit-débit ou hydraulique** qui traduit la propagation de l'onde crue tout au long de l'écoulement.

Elle utilise les modèles hydrauliques. Elle consiste à propager les débits mesurés en amont dans le réseau hydrologique pour prévoir le débit en aval. L'horizon de prévision est alors limité au temps de propagation dans le réseau hydrographique. Ce type de méthode est adapté aux grands bassins versant soumis à des crues lentes.

- ♣ **Prévision par transformation de la pluie en débit**

Elle utilise des modèles hydrologiques pluie-débit qui transforment la pluie observée jusqu'au temps présent en débit à l'exutoire du bassin versant. Ce type de méthode est adapté aux bassins versant plus petits soumis à des crues plus rapides.

- ♣ **Prévision météorologique** qui prévoit la quantité de pluie qui va tomber.

Elle doit être utilisée pour augmenter l'horizon de prévision, au-delà du temps de concentration du bassin. [6]

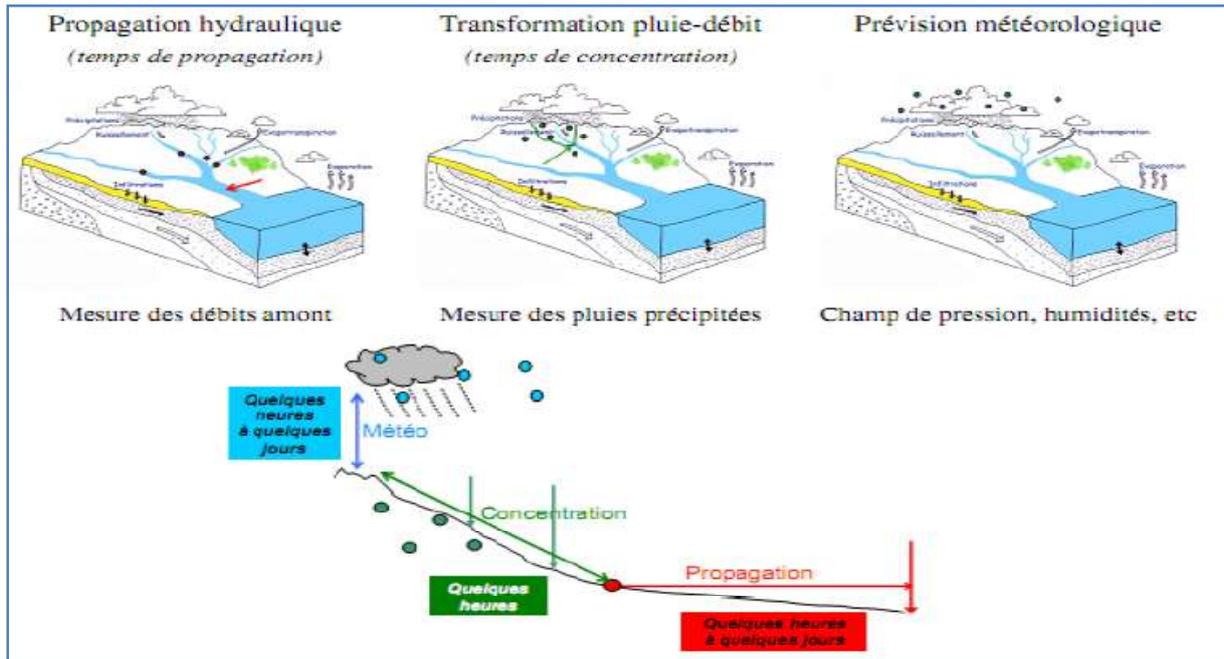


Figure 05: Les différentes méthodes/échéances de prévision des crues. [6]

### I.7. Modélisation pluie débit

La modélisation pluie débit est une discipline des sciences hydrologique qui s'intéresse principalement au cycle hydrologique afin d'aboutir à un outil de travail exploitable dans différents domaines.

La modélisation pluie-débit est défini par deux dimensions;

- L'échelle d'espace, Pour différentes superficies, allant d'une maille de quelques mètres carrés au bassin versant de quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés, il existe une littérature très riche qui va de la proposition de divers types de modèles jusqu'à la critique de ceux ci.

- L'échelle de temps, du pas de temps horaire jusqu'au pas de temps pluriannuel, on trouve dans la littérature de nombreux modèles fonctionnant à chaque pas de temps.[7]

#### I.7.1. Définition d'un modèle

« Un modèle est une représentation simplifiée, sous forme physique, analogique, ou mathématique d'un processus ou d'un système beaucoup plus complexe, en vue de décrire, d'expliquer ou reproduire dynamiquement son fonctionnement » [8]

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments:

1. Le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définit l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase. Dans notre cas, le système est typiquement le bassin versant défini plus loin.
2. L'objectif de modélisation, pour lequel le modèle est développé. Le modèle est construit pour répondre à des questions et peut ainsi, au delà d'un outil de représentation, être également un instrument de connaissance. L'étude du cycle de l'eau est l'objectif général de l'hydrologie. Nous nous intéresserons plus particulièrement dans ce travail de recherche à la représentation de la transformation de la pluie en débit.

3. Le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel de la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés. En fait, le modèle est la plupart du temps le résultat d'un compromis entre généralité, réalisme et précision. La formulation d'un modèle est conditionnée par la connaissance antérieure des processus ou des systèmes considérés, par les idées et l'imagination du modélisateur et par les hypothèses qui sont formulées. [9]

### **I.7.2. Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit**

La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses questions centrées sur l'eau, gestion des risques et de la ressource notamment.

Michel (1989) et Refsgaard et Abbott (1996) répertorient l'essentiel de ces problématiques. Si des aspects de qualité des eaux peuvent être étroitement liés à des aspects de quantité, nous nous intéresserons ici uniquement à une modélisation pluie-débit quantitative. Nous donnons quelques-unes de ces problématiques:

- Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques.
- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage: on désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée. On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau.

- Prévision des crues et des étiages: il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin.
- Influence d'aménagements sur l'hydrologie: on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux.  
Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. [10] [11]

### I.8. Mise en œuvre des modèles

La mise en œuvre des modèles de simulation implique un certain nombre de phases, conduisant à un modèle opérationnel capable de simuler le système réel, Il s'agit de la:

- **La construction:** qui consiste à schématiser le système réel par le biais d'une série d'hypothèses simplificatrices et à en donner une formulation symbolique.
- **La détermination des paramètres internes:** celle-ci pose un problème ardu à cause de complexité des mesures in situ.
- **Le calage du modèle:** permet de déterminer les paramètres d'ajustement (paramètres internes qui n'ont pas de sens physique direct) à partir d'un jeu de données et des réponses mesurées sur le système réel.
- **Le test du modèle:** est une opération indispensable qui consiste à vérifier l'aptitude du modèle calé à simuler la réalité et cela sur un jeu de données et des réponses mesurées sur le système réel, différents du jeu de données de calage.
- **L'exploitation du modèle:** est la phase opérationnelle du processus pour son utilisation pratique. dans le cas de prévision des crues, l'exploitation du modèle étudié consiste en l'extension d'une série de débits à partir de la pluviométrie enregistrée sur le bassin versant. [7]

### I.9. Historique d'apparition des modèles hydrologiques

La modélisation mathématique en hydrauliques et en hydrologie au sens moderne du terme, c'est-à-dire en utilisant les ordinateurs digitaux, datent des années 1950. C'est en 1952-53 que le groupe de chercheurs de l'université de New York (Stoker, Issacson et Troesch, 1996) a pu construire, en écrivant un programme et en utilisant un ordinateur, un modèle moderne de la propagation des crues le long d'un tronçon de Mississippi.

Depuis les modèles ont subi une série de transformations passant par quatre génération:

- Première génération: des formules numérisées. Cette génération est maintenue jusqu'au début des années 60.

- Deuxième génération: des modèles numériques spécifiques. Il s'agissait de programmes créés à cette fin unique et demandant des modifications importantes dès que l'on voulait les utiliser pour une autre application. Cette génération a régné sans conteste entre 1960-1970.
- Troisième génération: des systèmes généraux de modélisation. Un système conçu pour simuler la propagation des crues, permet aussi bien construire un modèle de seine qu'un modèle du Niger. Ces systèmes ont été utilisés à partir de 1965 jusqu'à 1995.
- Quatrième génération: Les progiciels véritables, des systèmes généraux de modélisation exploités d'une manière conversationnelle. [12]

### I.10. Classification des modèles pluie-débit

Plusieurs classifications des modèles ont été proposées et il y a presque autant de classifications que d'hydrologues ! La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes, et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuant.

Clarke (1973) et Ambroise (1998) ont proposé quelques clés de différenciation des modèles:

- **déterministes ou stochastiques**, suivant la nature des variables, des paramètres et/ou des relations entre eux.
- **globaux, semi-distribués ou spatialisés**, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles.
- **cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs)**, suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause.

• **empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique)**, suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé. [13][14]

Perrin (2000) a proposé une classification et assez satisfaisantes, dont on distingue trois catégories de modèles, les modèles ‘boîte noire’, les modèles ‘à réservoirs’ conceptuels ou empiriques et les modèles fondés sur la physique. [15]

### **I.10.1.les modèles ‘boîte noire’ (blackbox)**

On classe dans cette catégorie les modèles ou sous-modèles qui établissent un pur lien mathématique entre les variables d’entrée et de sortie du système. Ces modèles sont globaux.

En donne succinctement quelques exemples.

#### **- Les modèles ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with exogenous inputs)**

Ces modèles autorégressifs à moyenne mobile, sont parmi les plus simples. Initialement développés par Box et Jenkins (1976), ils ont suscité beaucoup d’intérêt, principalement du fait de leur solide fondement mathématique, qui s’appuie sur la théorie des modèles linéaires (modèles de régression et de corrélation). La forme générale du modèle est donnée par l’équation de Salas, 1993 : [16]

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

Où  $\mu$  et  $\psi_1, \dots, \psi_r$  sont des paramètres du modèle,  $y_t$  et  $z_t$  respectivement la sortie (débit) et l’entrée exogène (pluie) à l’instant  $t$ ,  $\phi_1, \dots, \phi_p$  sont des  $p$  paramètres autorégressifs,  $\theta_1, \dots, \theta_q$  sont  $q$  paramètres de moyenne mobile et le bruit  $\varepsilon_t$  est un processus normal non auto corrélé, de moyenne nulle et non corrélé à  $y_{t-1}, \dots, y_{t-p}$ .

Bien qu’ils aient donné des résultats satisfaisants dans un certain nombre de cas, ces modèles trouvent leurs limites dans le fait que leur linéarité n’est pas adaptée pour

représenter la transformation pluie-débit non linéaire. Ils doivent donc être utilisés en combinaison avec des opérateurs de transformation non linéaires. [17]

### **- Les modèles des réseaux de neurones artificiels**

Ces modèles sont non linéaires, ils ont été utilisés par de très nombreux auteurs depuis le milieu des années 90 dans le contexte de la modélisation pluie-débit.

Les réseaux de neurones ont une structure mathématique flexible, capable d'identifier des relations non linéaires complexes entre les entrées et les sorties d'un système. Ils imitent, de façon simplifiée, la manière dont les neurones d'un cerveau se comportent. Ils sont organisés en couches successives de nœuds (neurones) et chaque nœud d'une couche est relié à tous les nœuds de la couche suivante par une relation paramétrée. On comprend alors aisément que le nombre de paramètres augmente très rapidement lorsque le nombre de nœuds augmente, rendant le système sur-paramétré.

Par ailleurs, l'utilisation du réseau de neurones suppose que les données soient normées, ce qui pose des problèmes lorsque l'on veut appliquer le modèle sur des données sortant de l'intervalle de variation de celles utilisées pour le calage des paramètres.

### **- Méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)**

Proposé pour la première fois par Sherman en 1932. L'hydrogramme unitaire tente de représenter l'effet des caractéristiques du bassin sur une entrée unitaire de pluie nette. Simple dans sa conception (il découle de l'interprétation physique des courbes isochrones) et basé sur les mathématiques linéaires.

Essentiellement outil de transfert, il doit généralement être couplé à des modules non linéaires qui permettent de convertir la pluie brute en pluie, c'est-à-dire de déterminer la proportion de la pluie en entrée qui contribuera finalement à l'écoulement.

Par ailleurs, l'application de l'hydrogramme unitaire demande la séparation préalable du débit de base, dont la détermination est souvent arbitraire.

### **- La méthode DPFT-ERHUDIT (Différentielle Première de la Fonction de Transfert–Excess Rainfall and Unit Hydrograph by a Deconvolution Iterative Identification Technique)**

Cette méthode est inspirée des travaux de Newton et Vinyard (1967), a pour but d'essayer de limiter les problèmes liés à l'utilisation des hydrogrammes unitaire, en évitant un choix arbitraire dans la sélection et le calage d'une fonction de production et d'une technique de séparation du débit de base. [18] [19] [20]

Il s'agit d'une procédure itérative, dans laquelle la première estimation de la pluie nette correspond à la pluie brute. La première fonction de transfert est alors calculée, puis rectifiée par des contraintes physiques.

A partir de cette nouvelle fonction de transfert, on résout alors le problème inverse, c'est-à-dire l'estimation de la pluie nette par déconvolution. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'il y ait convergence.

Ce modèle, dont le calage repose sur la sélection d'événements de crues, a donné des résultats satisfaisants dans un contexte de prévision de ces événements. Cependant, il doit être considéré comme un modèle de crue puisqu'il est calé sur des événements où le système hydrologique est en état de répondre par une crue à une entrée de pluie. Sa faiblesse dans l'extension à d'autres périodes réside dans l'absence de procédure de suivi d'humidité.

Nous pouvons ainsi citer, dans cette classe de modèles 'boîte noire', ceux reposant sur une simple équation non linéaire qui donne directement le débit en fonction des pluies antérieures. [21] [22]

#### **I.10.2. Les modèles 'à réservoirs', conceptuels ou empiriques**

Ces procédures prennent souvent la forme de réservoirs qui se remplissent et se vident au cours du temps. Elles permettent donc au système d'avoir une mémoire des conditions antérieures, qui ne se limitent pas aux débits et pluies antérieures. Ces modèles sont schématiquement constitués de réservoirs interconnectés qui assurent la transformation de la pluie en débit.

Ces modèles sont structurés à partir de deux composants majeurs:

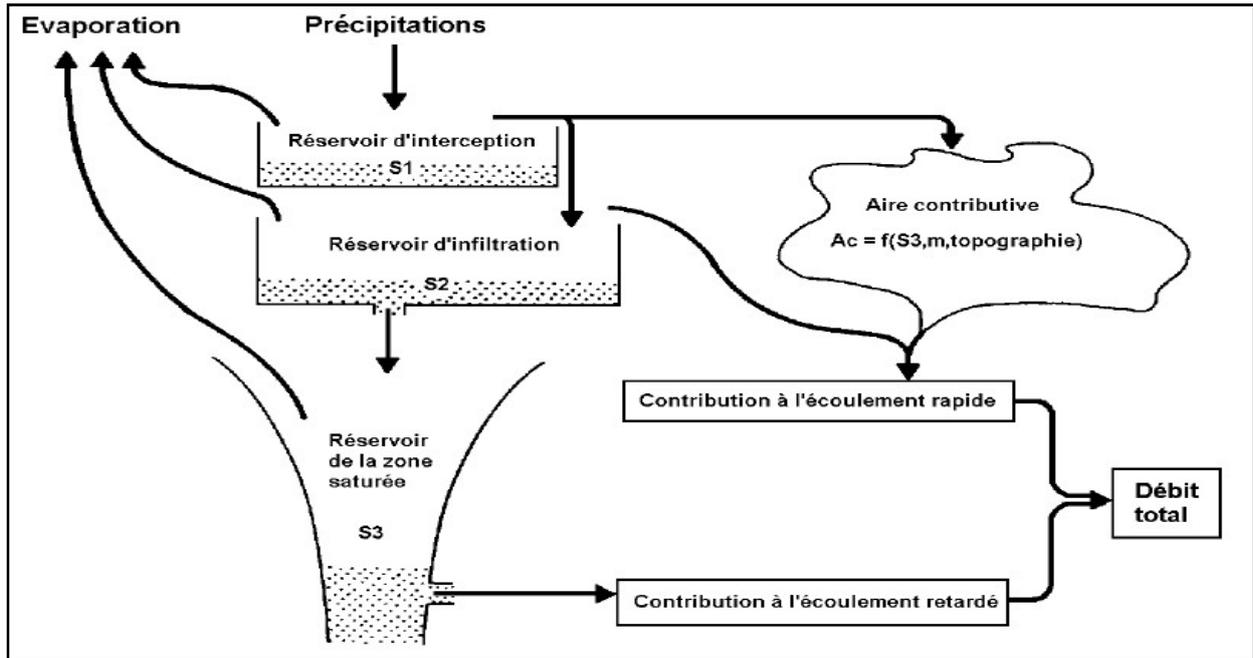
- Un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée. Parfois présentes dans les modèles, les fonctions d'échanges en eau, permettant de simuler des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

Les premiers modèles à réservoirs ont été proposés au début des années 60. Ils correspondaient en fait à une simplification des équations de la physique, alors trop complexes pour être utilisées telles quelles dans des modèles numériques. Ils essayaient de représenter de façon assez exhaustive tous les processus pouvant influencer les débits et étaient donc très complexes, avec des structures faisant intervenir de nombreux réservoirs et de très nombreux paramètres: le modèle de Stanford (Crawford et Linsley, 1963) comprenait plus de 30 paramètres optimisables, le modèle SSARR (Schermerhorn et Kuehl, 1968) plus de 25 paramètres, celui proposé par Girard (1970) plus de 20 paramètres. [23] [24]

Devant les problèmes de calage et d'utilisation de tels modèles, ce sont ensuite des modèles moins complexes (moins de paramètres) qui ont été proposés.

### - **TOPMODEL (TOPography-based hydrological MODEL)**

Ce modèle autour duquel le plus de travaux sont réalisés actuellement. Développé à l'Université de Lancaster au Royaume-Uni, ce modèle a été construit sur le concept d'aires contributives variables à l'écoulement. Prenant explicitement en compte la topographie du bassin étudié, il utilise le fait que les sols des zones de plus faible pente (fond de vallée) ont une plus grande propension à atteindre un état de saturation que les zones de forte pente, et donc à générer des écoulements rapides lors d'événements pluvieux, TOPMODEL est un modèle que l'on peut qualifier de conceptuel. [25]



**Figure 06: Représentation schématique de TOPMODEL (S1, S2, S3: niveaux dans les réservoirs; m: un des paramètres du modèle) [25]**

La différence entre les deux adjectifs conceptuel et empirique que nous avons utilisés pour qualifier les modèles à réservoirs fait ici exclusivement référence à la manière dont les modèles ont été développés:

- la grande majorité des modèles à réservoirs existants sont des modèles conceptuels mis au point à partir de concepts sur la manière dont se passe la transformation pluie-débit. On représente alors dans le modèle de façon simplifiée les processus jugés pertinents pour la modélisation. Le concepteur du modèle introduit des idées a priori, généralement fondées sur les connaissances physiques et l'observation du bassin.

- Beaucoup plus marginaux que les précédents, les modèles empiriques sont construits seulement à partir des observations hydro-météorologiques (correspondant aux entrées et sorties du modèle), sans avancer d'hypothèses a priori sur la nature des processus dominants ou d'idées préconçues sur la structuration du modèle.

Le modèle est alors construit à partir d'une structure élémentaire, complexifiée progressivement si nécessaire pour une amélioration de l'efficacité.

Le modélisateur cherche en fait à découvrir quels éléments doivent intervenir dans cette structure et comment ils sont reliés, non pas en fonction de la chaîne de phénomènes dont il a connaissance dans le milieu naturel, mais en fonction du plus ou moins grand succès du modèle à reproduire les débits observés.

### **- Les modèles GR (CEMAGREF)**

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. [26]

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 termes 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. [27]

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), Makhlouf (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. [28]

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.[29]

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. [30]

Enfin, Perrin (2000) a rajouté un quatrième paramètre au modèle journalier à la suite d'un travail comparatif avec d'autres modèles. [31]

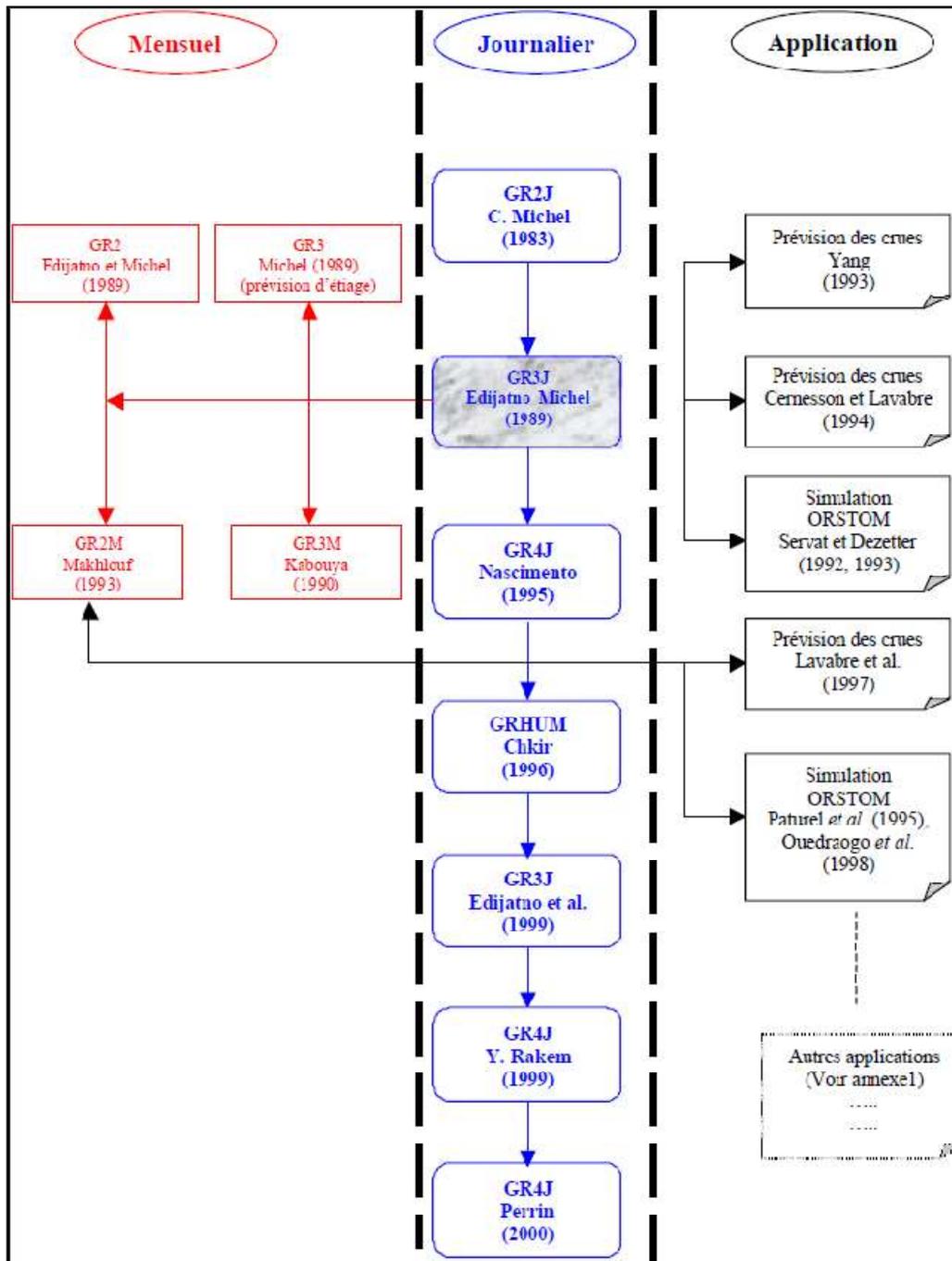


Figure 07: Evolution des travaux des modèles 'GR'.

### I.10.3. Modèles fondés sur la physique

Les modèles fondés sur la physique tentent d'utiliser des explications physiques à ce comportement. Ils utilisent le cadre théorique des équations de la physique (équations aux dérivées partielles), avec par exemple les équations de Saint-Venant pour les écoulements en rivière ou celles de Boussinesq ou Richards pour les écoulements dans les sols saturés ou non saturés. Ils tiennent compte de la variabilité spatiale du bassin par une discrétisation fine à base de mailles sur lesquelles sont appliquées les lois concernées, ce qui permet de donner une représentation des flux et stocks au sein du bassin.

Chacune est caractérisée par un ensemble de paramètres, ayant en principe une signification physique et donc mesurables sur le terrain.

Plusieurs modèles ont été créés parmi ces modèles on cite des modèles, SHE (Abbott et al. 1986), IHDM (Beven et al. 1987), SWATC (Morel-Seytoux et Al Hassoun, 1989) ou plus récemment du modèle proposé par Kuchment et al. (1996). [32] [33] [34] [35]

### I.11. Choix des modèles

Pour évaluer l'intérêt de ces approches variées, il faut d'abord définir les qualités recherchées pour ces modèles. Lindström et al. (1997) présentent les qualités suivantes comme règles de modélisation:

- le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains.
- les besoins en données doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci sur la majorité des bassins.
- la complexité du modèle doit être justifiée en termes de performances.
- le modèle doit être convenablement validé.
- le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs. [36]

### I.12. Critère de calage des performances d'un modèle hydrologique

Pour quantifier les performances des modèles, il n'y a pas de critère d'évaluation universel. Le principe général est de comparer les débits calculés/simulés aux débits observés. De nombreux critères sont utilisés, notamment :

#### I.12.1 Critère d'erreur quadratique

Les critères mesurent le degré d'adéquation entre les valeurs de la variable simulée par le modèle (ici le débit) et de la variable mesurée. Les critères en moindres carrés se basent sur une fonction suggérée par la régression linéaire (Nash et Sutcliffe, 1970), somme des erreurs quadratiques du modèle définie par:

$$F^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2$$

Où  $Q_{obs,i}$  et  $Q_{calc,i}$  sont respectivement les débits observé et simulé au pas de temps  $i$ , et  $n$  le nombre total de pas de temps de la période d'étude.

$F^2$  est analogue à la variance résiduelle d'une régression linéaire. Il est cependant difficile en utilisant  $F^2$ , de pouvoir comparer les performances du modèle d'une période à l'autre ou d'un bassin à l'autre, la valeur de cette fonction étant généralement d'autant plus élevée que le niveau des débits est fort (les erreurs absolues étant en moyenne plus élevées).

Nash et Sutcliffe (1970) proposent donc de normer la fonction en effectuant une comparaison de  $F^2$  avec ce même critère appliqué à un modèle élémentaire. Ils ont pris comme modèle  $Q = \text{constante}$  et ont calé ce modèle élémentaire, ce qui donne constante =  $\overline{Q_{obs}}$ , la moyenne des débits observés. Pour ce modèle élémentaire, utilisé comme référence, la fonction  $F^2$  devient  $F_0^2$  définie par:

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2$$

Ce qui correspond à la variance des débits observés.

- **Critère d'efficacité**

Nash et Sutcliffe (1970) construisent ainsi un critère d'efficacité  $R$  défini comme la proportion de la variance initiale des débits expliquée par le modèle. Il est défini par:

$$R = 1 - F^2$$

Où ;

$$F_0^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Ce critère (que nous appellerons critère de Nash-Sutcliffe ou critère de Nash), variant dans l'intervalle  $]-\infty;1]$  a l'avantage d'être d'interprétation facile. Il estime l'amélioration d'ajustement que l'on obtient en utilisant le modèle pour simuler les débits par rapport à un modèle 'zéro' (modèle de référence) qui donnerait sur toute la période considérée un débit constant égal au débit moyen.

- ✓ Un critère de valeur 1 signifie que l'erreur du modèle est nulle (modèle parfait).
- ✓ Une valeur de  $R$  inférieure à zéro signifie que le modèle n'explique pas mieux le comportement du bassin que le modèle de débit constant.

### I.12.2. Critère d'erreur absolue

L'erreur moyenne absolue  $A$  d'un modèle peut être définie par :

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|$$

Elle représente la déviation absolue du débit simulé par rapport à l'observé en moyenne à chaque pas de temps.

### I.12.3. Critère de Nash

Le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet le d'accéder au meilleur calage.

Le critère de Nash s'écrit comme suit:

$$N = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|^m}{\sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}|^m} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Où **m** est un exposant entier.

### **Conclusion**

Pour l'hydrologue, il est important de comprendre ce que cache la notion de bassin versant qui est un système complexe et son fonctionnement dépend de ses caractéristiques hydrologiques.

La modélisation pluie-débit est l'un des outils les plus adaptés pour décrire le comportement hydrologique du bassin versant à une sollicitation (pluie).

Plusieurs modèles à différentes échelles ont été mis en œuvre et à l'utilisateur de choisir le modèle adéquat de manière à satisfaire ces objectifs.

### **Introduction**

L'hydrologie de surface est une science qui s'intéresse ou traite essentiellement les problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents.

Ces problèmes sont généralement des prévisions ou des prédéterminations de débits en un point ou sur une surface (bassin versant).

La représentativité du bassin versant est très importante lorsque notre objectif présente un caractère plus général comme la prévision hydrologique.

Le choix des facteurs de représentativité du bassin versant doit être fait en fonction du contexte physicochimique qu'il est possible de définir par le climat (régime de précipitations, de l'évaporation, des températures...etc.), le relief (la pente), la géomorphologie (paramètres morphométriques).

Le bassin versant d'Oued El Harrach, objet de notre étude, fait partie de bassin côtier Algérois.

## II.1. Aspect géographique

Le bassin versant de l'oued El Harrach, couvrant une superficie de 1236.28 Km<sup>2</sup> appartient au bassin versant côtier Algérois. L'oued El Harrach, oued majeur dans la Mitidja, a une longueur principale de 67 Km, prend sa source au nord de l'Atlas Blidéen et est formé par la confluence de deux oueds principaux, l'oued Okacha et l'oued Mekka du côté de Hammam Melouane (rocher des pigeons).

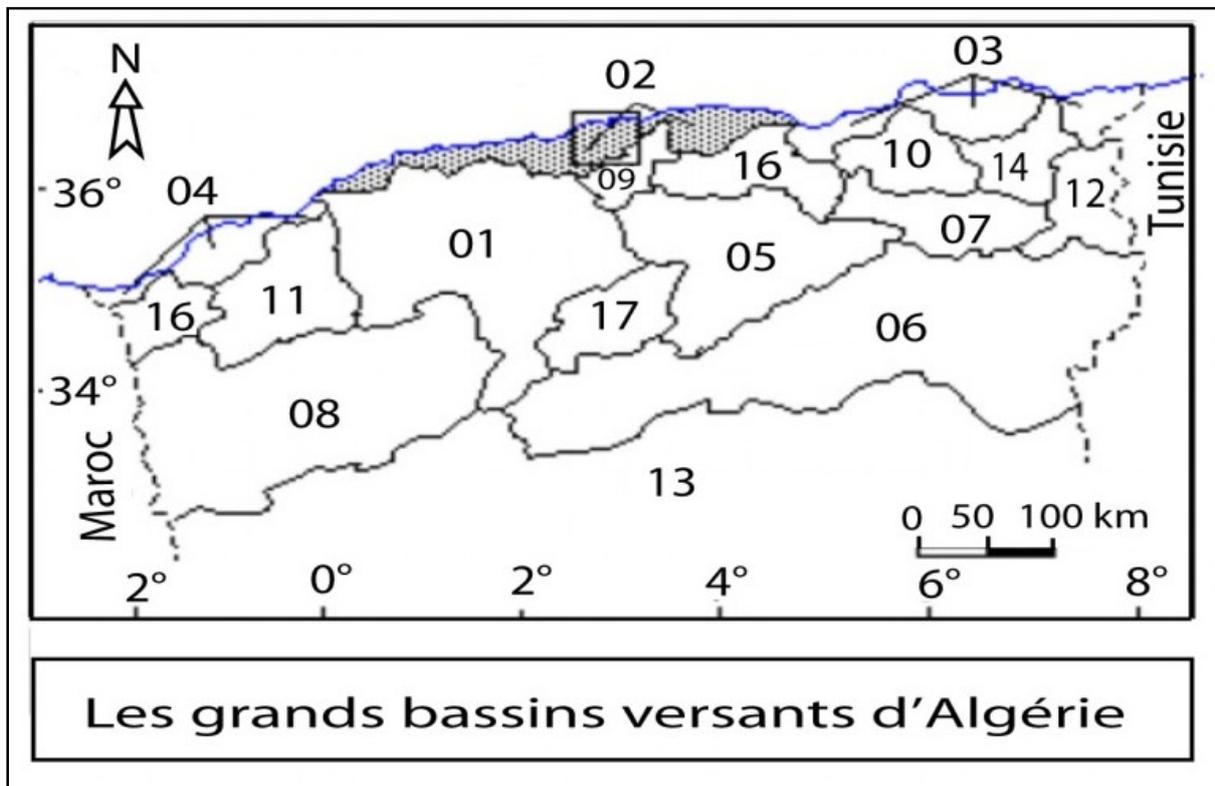
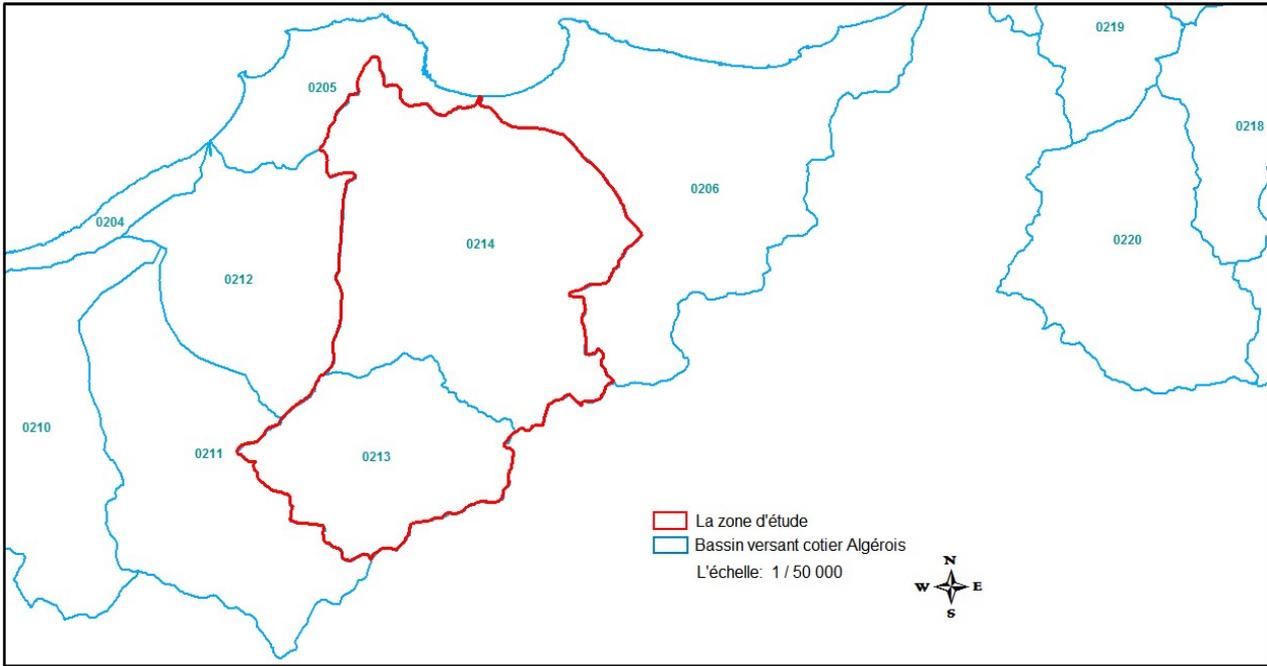
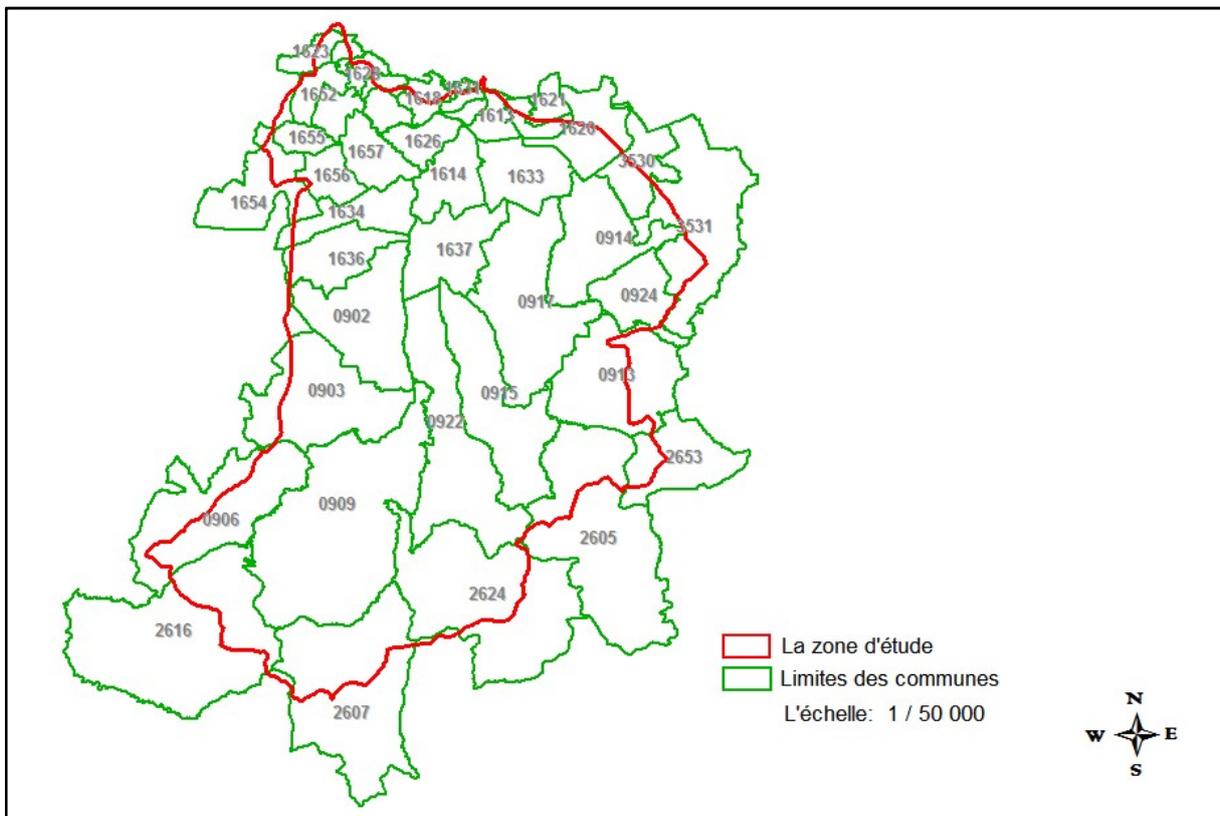


Figure 08: Situation de bassin versant d'El Harrach par apport aux grands bassins d'Algérie. [37]



**Figure 09: Carte de situation du bassin versant d'Oued El Harrach par apport au bassin côtier Algérois.**



**Figure 10: Carte de limites de commune de bassin versant d'Oued El Harrach.**

## II.2. Courbe hypsométrique et caractéristiques géomorphologiques

La courbe hypsométrique représente la répartition de la surface du bassin en fonction des altitudes. Elle exprime le pourcentage de superficie au delà d'une certaine altitude.

Donc fournit une vue synthétique de la pente du bassin (relief).

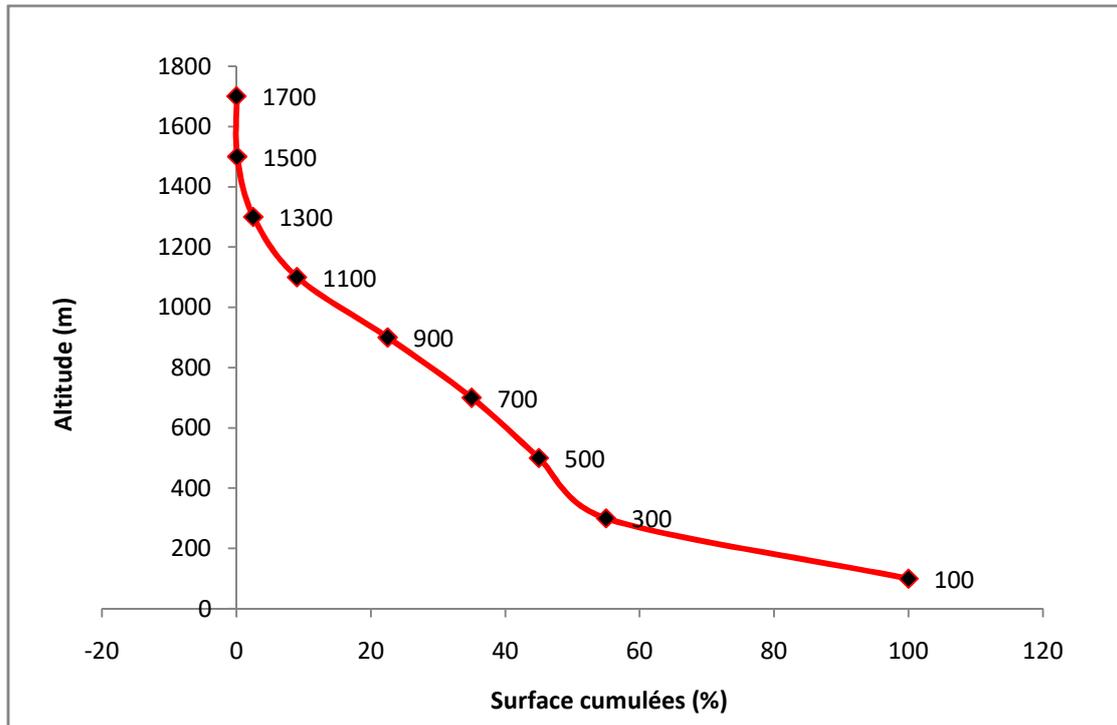


Figure 11 : Courbe hypsométrique de bassin versant d'Oued El Harrach. [37]

Cette courbe hypsométrique nous permet de déduire les caractéristiques géomorphologiques données dans le tableau suivant:

**Tableau 01: caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued El Harrach. [37]**

Caractéristiques du bassin versant	Bassin versant d'Oued El Harrach
Aire Km <sup>2</sup> (A)	1236.28 Km <sup>2</sup>
Périmètre (P)	188.17 Km <sup>2</sup>
Longueur de Talweg principal	67 Km
Longueur (L)	78.295 Km
Largeur (l)	15.79 Km
Indice de Compacité (K)	1.498
Altitude maximale (m)	1700
Altitude de fréquence	265 m
Altitude moyenne (h <sub>moy</sub> )	430 m
Indice de pente globale (I <sub>g</sub> ) m/km	31.57 m/Km
Dénivelée spécifique (Ds)	485.22 m

L'analyse des caractéristiques géomorphologiques permettent de classer le bassin d'oued El Harrach dans le type grand bassin versant de forme allongée de relief assez fort.

### II.3. Le réseau hydro-climatologique

#### II.3.1. pluviométrie

Le bassin versant d'oued El Harrach comporte dans son ensemble quatre stations pluviométriques résumées dans le tableau ci-dessous

**Tableau 02: Caractéristiques des stations pluviométriques. [37]**

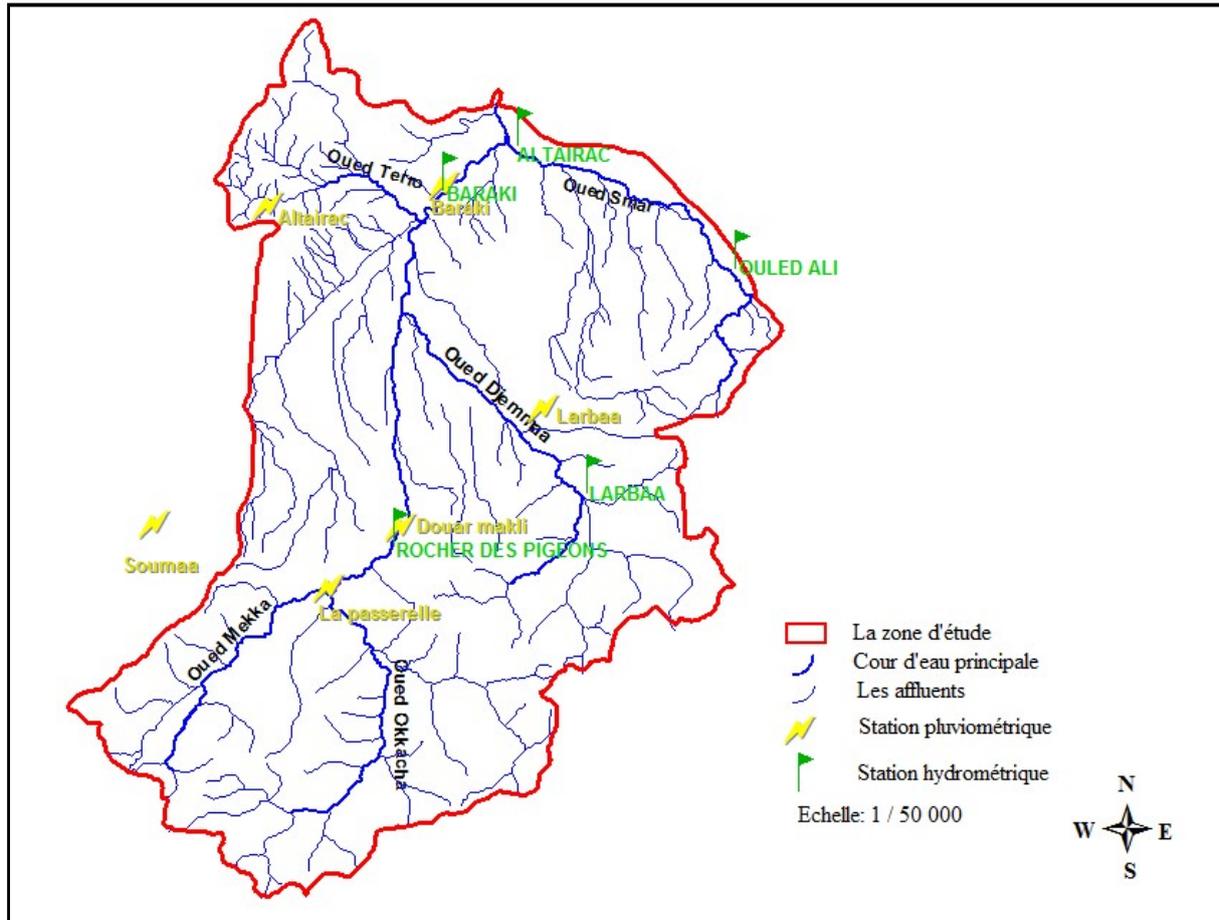
Code	Nom station	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
021421	BARAKI	535.000	376.5	20
021427	DOUAR MAKLI	532.45	355.75	130
021307	LA PASSERELLE	528.05	352.05	260
021234	SOUMAA	517.45	355.9	177
021443	ALTAIRAC	525.4	375.3	20
021403	LARABAA	541.15	362.95	100

#### II.3.2. Hydrométrie

Le bassin versant d'oued El Harrach comprend quatre stations hydrométriques.

**Tableau 03: Caractéristiques des stations hydrométriques. [37]**

Code	Situation	X (km)	Y (km)	Z (m)
021301	Rocher des pigeons	532.050	354.750	830
021418	Baraki	535.000	376.500	824.5
021443	Altairac	539.550	379.050	153
020627	Ouled Ali	552.580	371.550	332
021402	Larabaa	543800	358000	819



**Figure 12: Carte présente les postes d'observation hydro-climatiques de la zone d'étude**

#### II.4. L'hydrographie

Le bassin versant d'oued El Harrach présente une hydrographie très modérée. Son système de drainage est constitué d'un certain nombre de rivières et leurs affluents:[37]

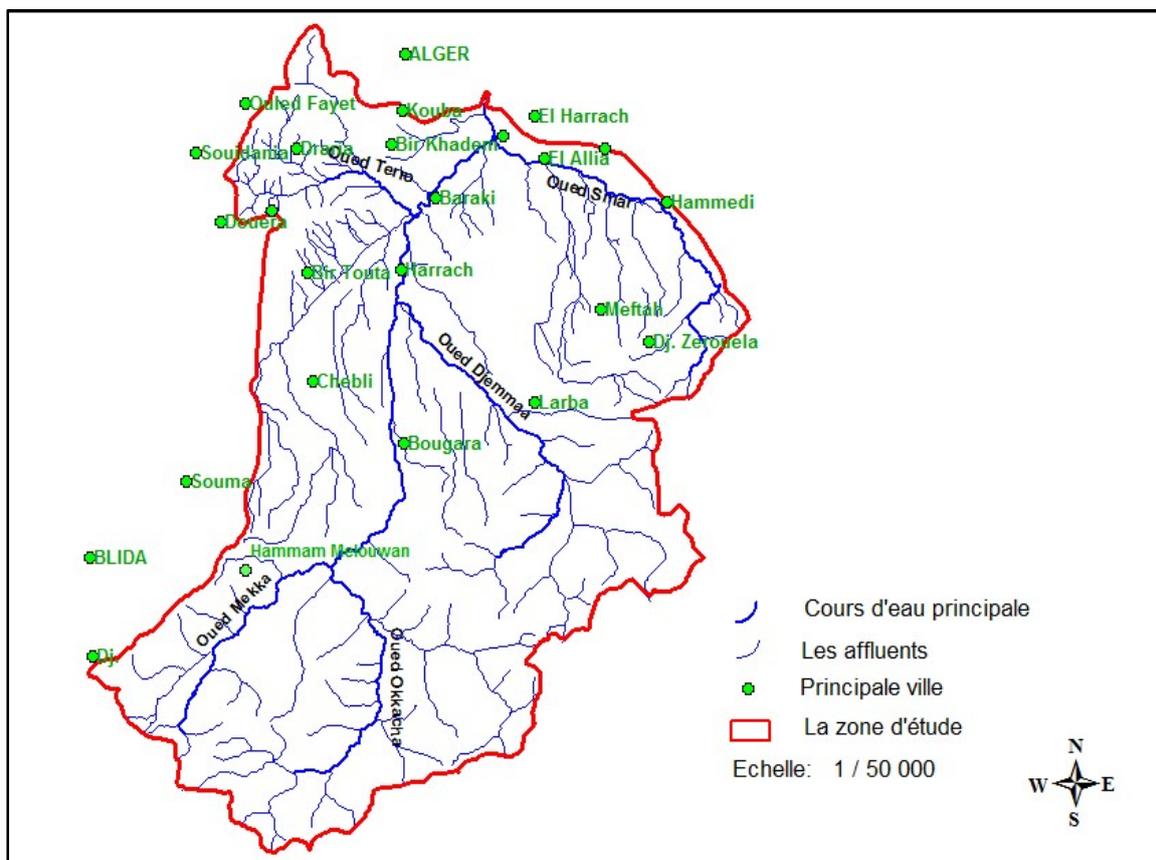
- L'oued Djemaa (BV 225 Km<sup>2</sup>)
- L'oued Baba Ali et l'oued Terro ( BV 165 Km<sup>2</sup>)
- L'oued Smar (BV 117 Km<sup>2</sup>)
- L'oued kerma ( BV 74 Km<sup>2</sup> )
- L'oued Ouchaiah (BV 22 Km<sup>2</sup>)
- L'oued Adda

Le réseau hydrographique est défini par divers paramètres descriptifs présentés ci-dessous:

**Tableau 04 : les paramètres descriptifs du réseau hydrographique. [37]**

Caractéristiques du réseau hydrographique	Sous bassin d'El Harrach
Densité de drainage Dd	0.56 Km/Km <sup>2</sup>
Coefficient de torrentialité Ct	0.039
Temps de concentration Tc	14.64 h

En observant les valeurs faibles de la densité de drainage et le coefficient de torrentialité on constate que le bassin versant d'El Harrach a un drainage relativement faible et n'est pas du type torrentiel. De même pour le temps de concentration des eaux qui est assez long, il témoigne d'un écoulement assez lent.



**Figure 13: Carte présentant le réseau hydrographique de la zone d'étude.**

### II.5. Le climat

La région d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen contrasté avec un hiver pluvieux et humide, un été chaud et sec et de températures moyennes respectives de 11°C et 26.5°C.

Pendant la plus grande partie de l'année les vents ont une orientation NNW-SSE.

### II.6. Aperçu géologique:

On rappelle que le bassin versant de l'oued El-Harrach est constitué essentiellement de trois unités géologiques :

- au nord, le Sahel d'Alger compris entre le massif de Bouzaréah et la rive gauche de l'oued El-Harrach. Il est constitué par les marnes plaisanciennes et la mollasse astienne. Le piémont sud du Sahel, caractérisé par des pentes douces, est formé de dépôts argilo-caillouteux ;
- la plaine de la Mitidja qui constitue une véritable gouttière comblée par des formations néogènes et quaternaires ;
- au sud, l'Atlas blidéen, vaste massif montagneux constitué essentiellement d'épaisses séries d'âge crétacé.

Du point de vue lithostratigraphique, la plaine de la Mitidja comporte des formations quaternaires et tertiaires. [37]

#### II.6.1. Le Quaternaire :

Il contient les formations suivantes :

- des dépôts récents limités aux lits mineurs et majeurs des oueds. Ce sont des cailloutis fluviaux, grossiers à galets ronds, plats et des blocs parfois volumineux. Des limons de débordement gris ocre s'observent par plages. Ce sont aussi des formations marécageuses limono-argileuses et des limons d'épandage de crues ;

- les formations rharbiennes de Mazafran et Halloula. Le Gharbien est représenté par les alluvions qui forment les derniers comblements de la Mitidja. Dans les régions les plus basses, ce sont des limons gris, des limons argileux, de l'argile noire ou bleue, qui passent à des limons sableux en bordure du piémont, avec une épaisseur moyenne de 10 m. Près des oueds, les limons caillouteux sont grossiers et épais. Les limons sont rencontrés le long de la cluse du Mazafran, alors que les formations de Halloula sont localisées à l'ouest de la plaine et sont séparées des dépôts de Mazafran par les oueds Djer et Bouroumi et l'ancien lac Halloula, leur épaisseur maximum atteint les 60m ;

- les formations soltano-tensiftiennes de la Mitidja. Elles sont présentes sur toute la plaine sauf exceptionnellement sur la partie occidentale. Elles présentent une épaisseur allant de 100 à 200m diminuant vers la bordure de la baie d'Alger. Au Tensiftien, ce sont des alluvions fluviales à éléments subanguleux, dispersés dans une matrice argilo-terreuse rouge à brun rouge. Elles sont finement litées. Des passées limoneuses alternent avec des galets gris. Au Soltanien, ce sont des cailloutis silteux semblables aux précédents mais dont la couleur rouge s'estompe et devient plutôt gris-rose.

On rattache à cette période la base des formations grossières qui constitue les bons aquifères ;

- les formations du Villafranchien : ce sont des argiles qui se sont développées sur le bassin fluvio-lacustre de la Mitidja au début du Quaternaire. Elles correspondent à une séquence uniforme d'argiles jaunâtres à grises avec quelques cailloutis et des lentilles de graviers. Elles affleurent à El Harrach, sur le flanc sud du Sahel et à l'extrémité occidentale de la plaine de la Mitidja. Elles se présentent sur une épaisseur allant jusqu'à 200m, puis elles diminuent vers l'Atlas et disparaissent presque totalement sur une grande partie de la Mitidja orientale. [37]

## **II.6.2. le Tertiaire :**

Il est constitué par les formations suivantes :

### **2.1. Les marnes et molasses du Pliocènes :**

#### **a. l'Astien :**

Il est caractérisé par un faciès très varié :

- un faciès mollassique représenté par des calcaires spongieux et granuleux. La molasse astienne repose directement sur le Plaisancien et est marquée par un niveau caractéristique à glauconie ;
- un faciès marno-sableux dominant ;
- un faciès calcaire ou calcaro-gréseux représenté par de larges dalles ;
- un faciès gréseux et argilo-gréseux détritique, terminant l'Astien par un dépôt de 30m.

#### **b. le Plaisancien :**

Il est caractérisé par des marnes grises et bleues uniformes avec localement des bancs gréseux. Cette série est plus connue sous le nom de «marnes bleues du Plaisancien». Cette série affleure dans le Sahel, au centre et au nord du bassin de la Mitidja sur une grande partie, puis elle se biseaute vers le sud ou elle repose en discordance sur les formations du Miocène.

### **2.2. Le Miocène :**

Il n'occupe qu'une petite partie dans le développement du bassin de la Mitidja. Il affleure par endroits dans le piémont de l'Atlas blidéen, au djebel Zerouala et au SE de Khemis El Khechna ou il est représenté par des marnes du Vindobonien épaisses de 50m.

Les formations anciennes sont des roches éruptives du Miocène moyen affleurant sur le pourtour sud de la Mitidja.



### **Conclusion**

Notre zone d'étude située à l'Est du bassin versant côtier Algérois, s'étend sur une superficie de 1236.28 km<sup>2</sup> et un périmètre de 188.17 km.

L'analyse des caractéristiques géomorphologiques permettent de classer le bassin versant d'oued El Harrach dans le type grand bassin versant de forme allongée.

La densité de drainage et le coefficient de torrencialité ont des valeurs faibles, on constate que le bassin versant d'oued El Harrach a un drainage relativement faible et n'est pas du type torrentiel. De même pour le temps de concentration des eaux qui est assez long, il témoigne d'un écoulement assez lent.

### **III.1. Matériels**

#### **III.1.1. Exploitation des données**

Pour notre zone d'étude, nous avons deux sous bassins pour lesquelles on a choisi des postes de pluviométrie et d'hydrométrie représentatifs selon la disponibilité des données et les exigences du modèle utilisé.

Les données pluviométriques (P) et hydrométriques (Q) ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Blida et les données des températures ont été recueillies auprès de l'Institut de Technologie d'Arboriculture Fruitier (ITAF) de Boufarik.

Après l'analyse des données pluviométriques, hydrométriques et météorologiques, nous avons pris les stations présentent dans le tableau suivant;

Tableau 05: caractéristiques géographiques et données disponibles des stations pluviométriques et hydrométriques choisis. [37]

<b>Stations</b>	<b>Code</b>	<b>Altitude X(m)</b>	<b>Longitude Y(m)</b>	<b>Latitude Z(m)</b>	<b>Période d'observation</b>
Station pluviométrique Douar Makli	021427	532.45	355.75	130	1972-2000
Station pluviométrique Baraki	021421	535.000	376.5	20	1979-2007
Station hydrométrique Rocher Des Pigeons	021301	532.050	354.750	830	1972-2000
Station hydrométrique Baraki	021421	535.000	376.5	20	1979-1993 1997-2007

Tableau 06: caractéristiques géographiques et données disponibles de la station météorologique choisi. [38]

Station	Altitude X(m)	Longitude Y(m)	Latitude Z(m)	Période d'observation
Boufarik	518.4	363.5	19	1980-2004

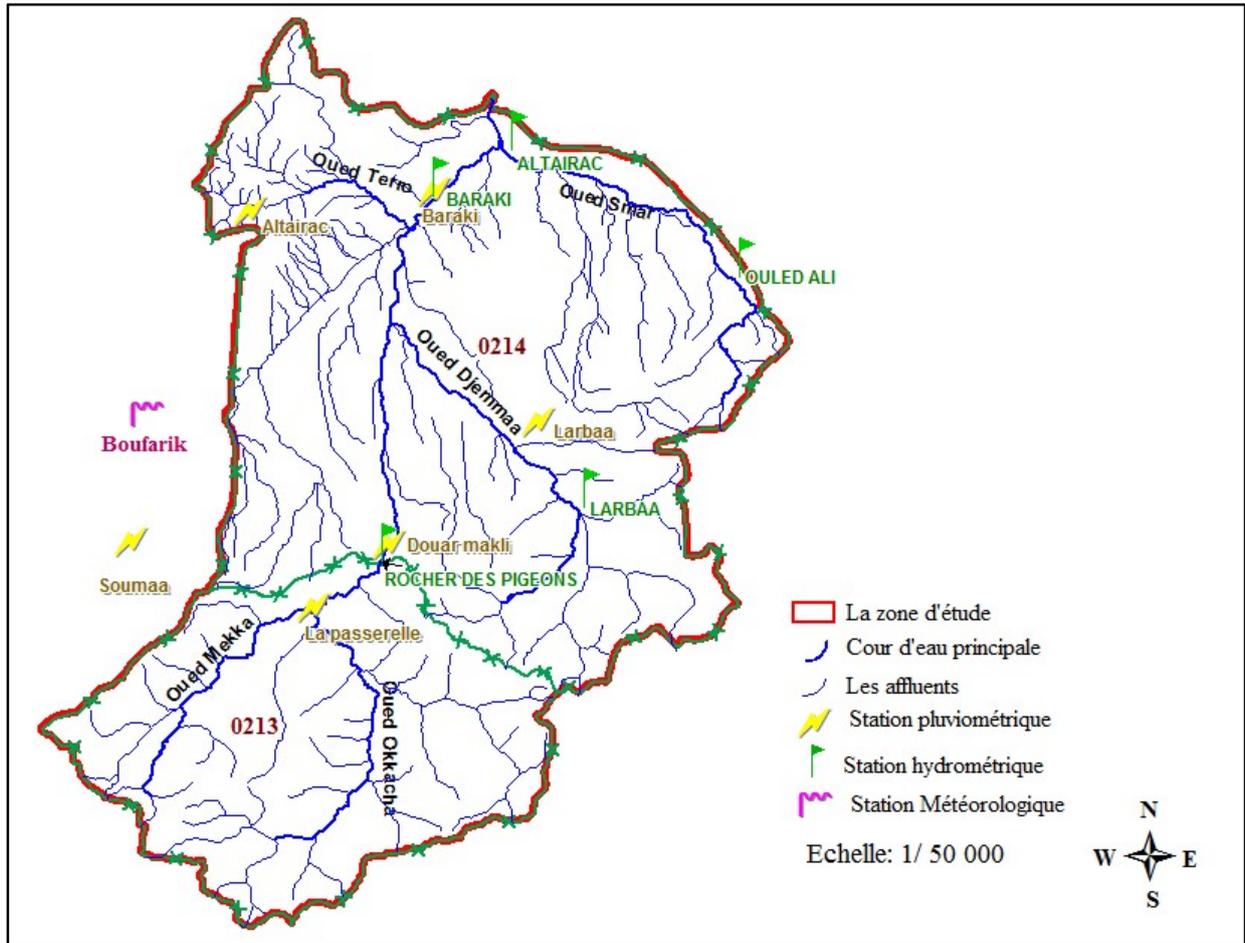
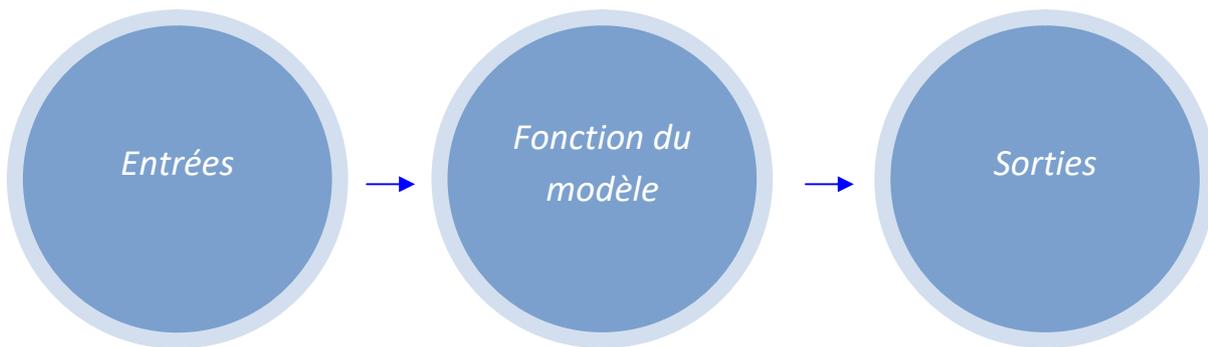


Figure 15: carte présente les deux sous bassins d'El-Harrach

### III.1.2. Modèles pluie-débit

Pour notre travail nous avons choisi deux modèles : GR1A, GR2M.

Ce sont des modèles conceptuels au pas de temps Annuel et mensuel qui fonctionnent presque de la même façon avec quelques différences au niveau des paramètres intervenant dans le calage du modèle. Ils présentent les mêmes objectifs dont essentiellement la transformation des pluies en débits.



**Figure 16: Schéma simplifié de la présentation d'un modèle.**

Les pluies et les évapotranspirations servent comme entrées du modèle, à partir desquelles seront simulées les débits qui représentent les sorties du modèle.

Les débits simulés seront ensuite comparés aux débits observés. On utilisera pour cela le critère de Nash, afin de juger les performances et la qualité du modèle.

### III.1.3. Logiciels et programme utilisés

#### ➤ Système d'information géographique (SIG)

Un SIG est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes d'aménagement et de gestion.

On appelle donnée à référence spatiale toute donnée pouvant être localisée de façon directe (une école, une route...) ou indirecte (une adresse, un propriétaire...) à la surface de la terre. Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale,

on décompose le territoire en couches thématiques (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques.

Les bases de données qui alimentent les SIG doivent être géoréférencées, c'est à dire partager un cadre commun de repérage appelé système de projection. Ce cadre commun est fixé légalement.

A cette condition, les couches se superposent à la demande dans le SIG pour fournir une connaissance précise et actuelle du territoire.

Actuellement plusieurs logiciels existent sur le marché ; Mapinfo, Arc view, Arc GIS...

Les cartes présentées dans ce mémoire, nous avons établies à l'aide de Mapinfo8.0.

### ➤ **Logiciel HYDROLAB**

Le logiciel HYDROLAB est un outil très simple parfaitement intégré au logiciel EXCEL, élaboré par J.P. LABORDE. L'objectif est de répondre aux questions les plus fréquemment posées aux Hydrologues dont essentiellement : les ajustements aux différentes lois de probabilité (loi log normale, loi racine normale...), le comblement de lacunes dans des séries de données (bouche trous), et l'analyse en composantes principales (ACP).

### ➤ **Logiciel ALED**

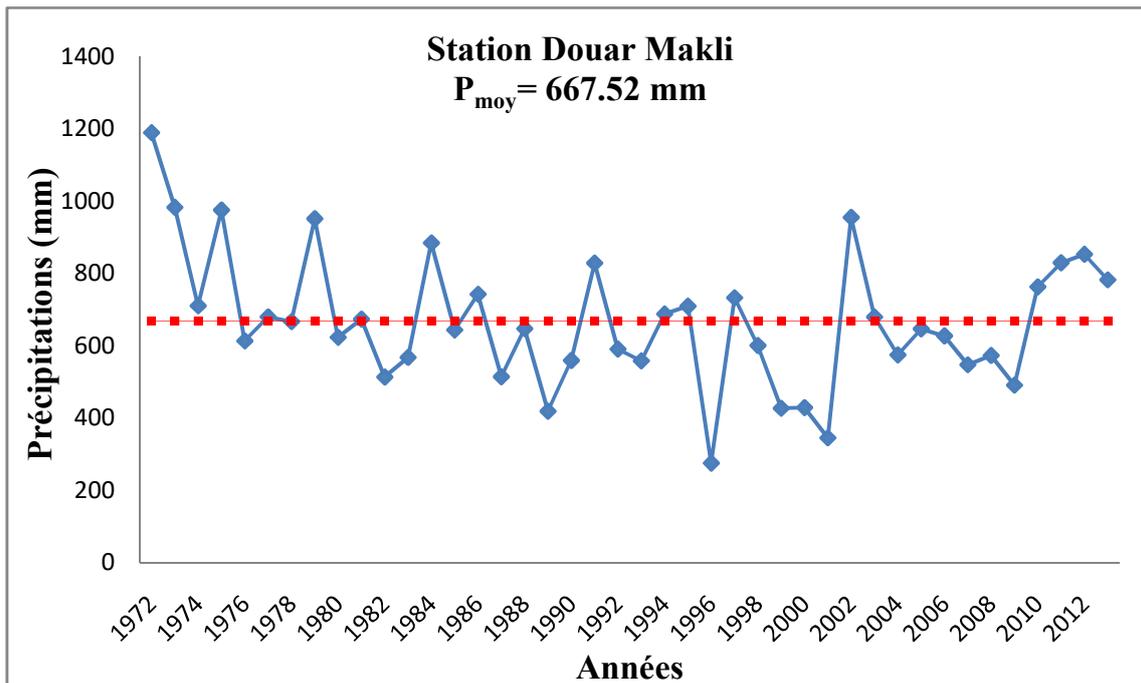
Ce logiciel fonctionne sous dos, il permet de réaliser des ajustements statistiques selon les différentes lois de probabilités utilisée en hydrologie, il nous a permis entre autres de déterminer les tests de Khi-deux.

## III.2. Méthode

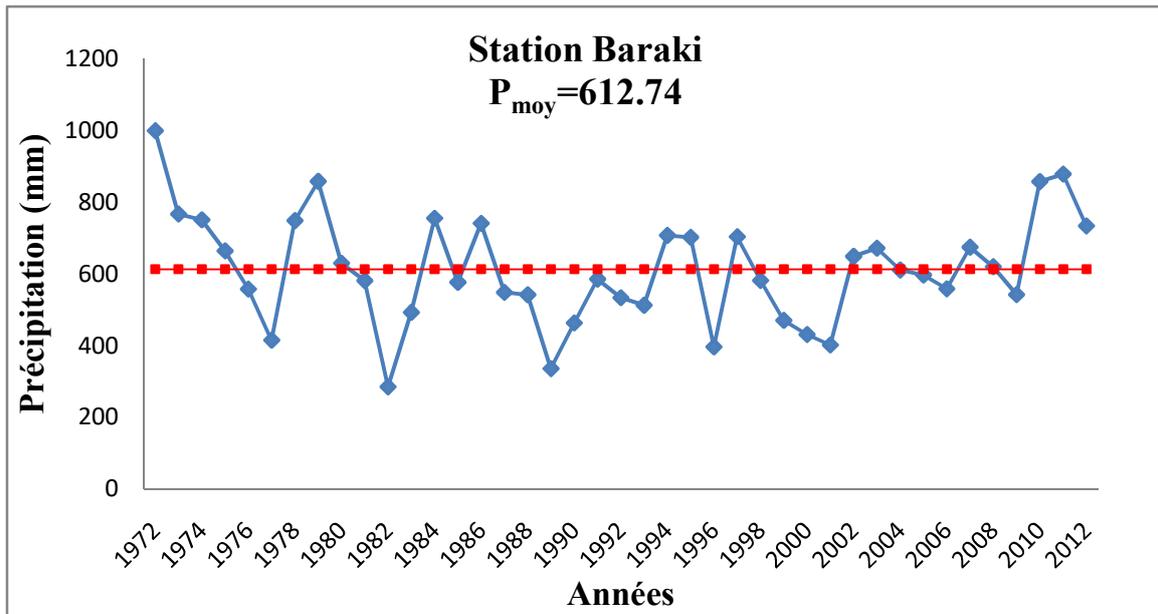
### III.2.1. Etude des précipitations

#### III.2.1.1. Variation de la pluviométrie annuelle

Les figures 17 et 18 visualisent l'évolution de la pluviométrie annuelle sur une période de 40 ans 1972/2012 où l'on remarque que les hauteurs maximales des précipitations atteignent 1188.6 mm au niveau de la station de Douar Makli au cours de l'année 1972 et 999.2 mm en 1973 au niveau de la station de Baraki, tandis que les hauteurs minimales de l'ordre de 274.8 mm ont été enregistrées à la station de Douar Makli en 1996, et 284.8 mm à la station de Baraki en 1982. Les hauteurs moyennes de l'ordre de 667.52 mm et 612.74 mm correspondant successivement à Douar Makli et Baraki.



**Figure 17: Evolution annuelle des précipitations (1972-2012) à la station de Douar Makli.**



**Figure 18: Evolution annuelle des précipitations (1972-2012) à la station de Baraki.**

### III.2.1.1.1. Ajustement des précipitations annuelles

#### ❖ Test graphique

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

Le tableau résume les paramètres de dispersion des séries des deux stations pour la loi normale et log normale.

Tableau 07: Paramètres de position des précipitations des stations.

Station		Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation	Variance
Douar Makli	Loi Normale	667,024	184,502	0.277	34031.02
	Loi Log Normale	2,807	0,125	/	0.0156
Baraki	Loi Normale	612,268	152,876	0.25	23370.76
	Loi Log Normale	2,773	0,1148	/	0.0131

Le coefficient de variation est presque le même pour les deux stations qui est ( $Cv < 0.5$ ), cela nous laisse penser que l'ajustement suit une loi normale, le test de Khi-deux ( $\chi^2$ ) permettra de vérifier cette adéquation.

Le test graphique montre que les précipitations relatives à nos stations s'ajustent mieux à une loi log normale, dont les équations de la droite d'ajustement sont présentées sur le tableau 08.

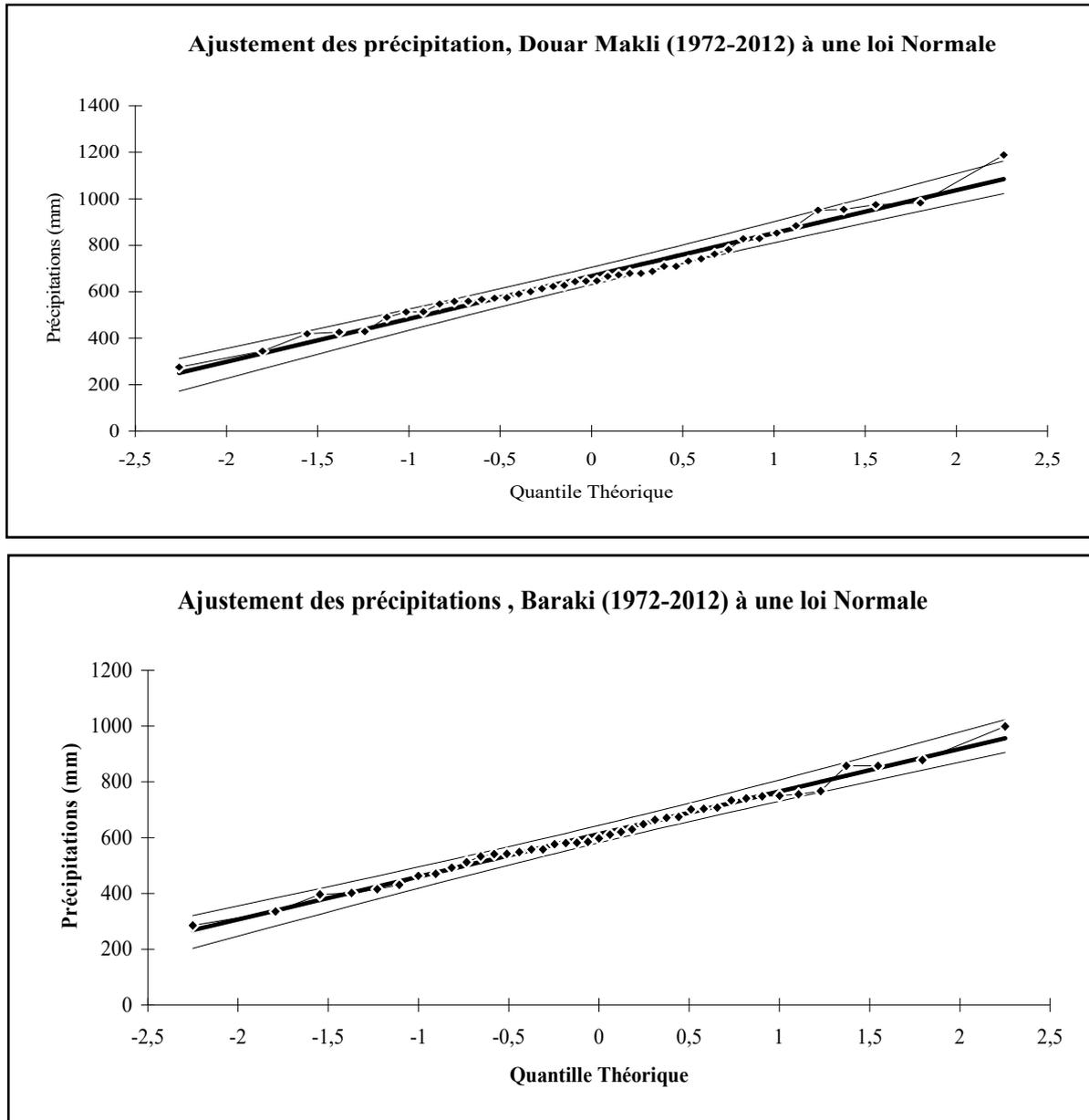
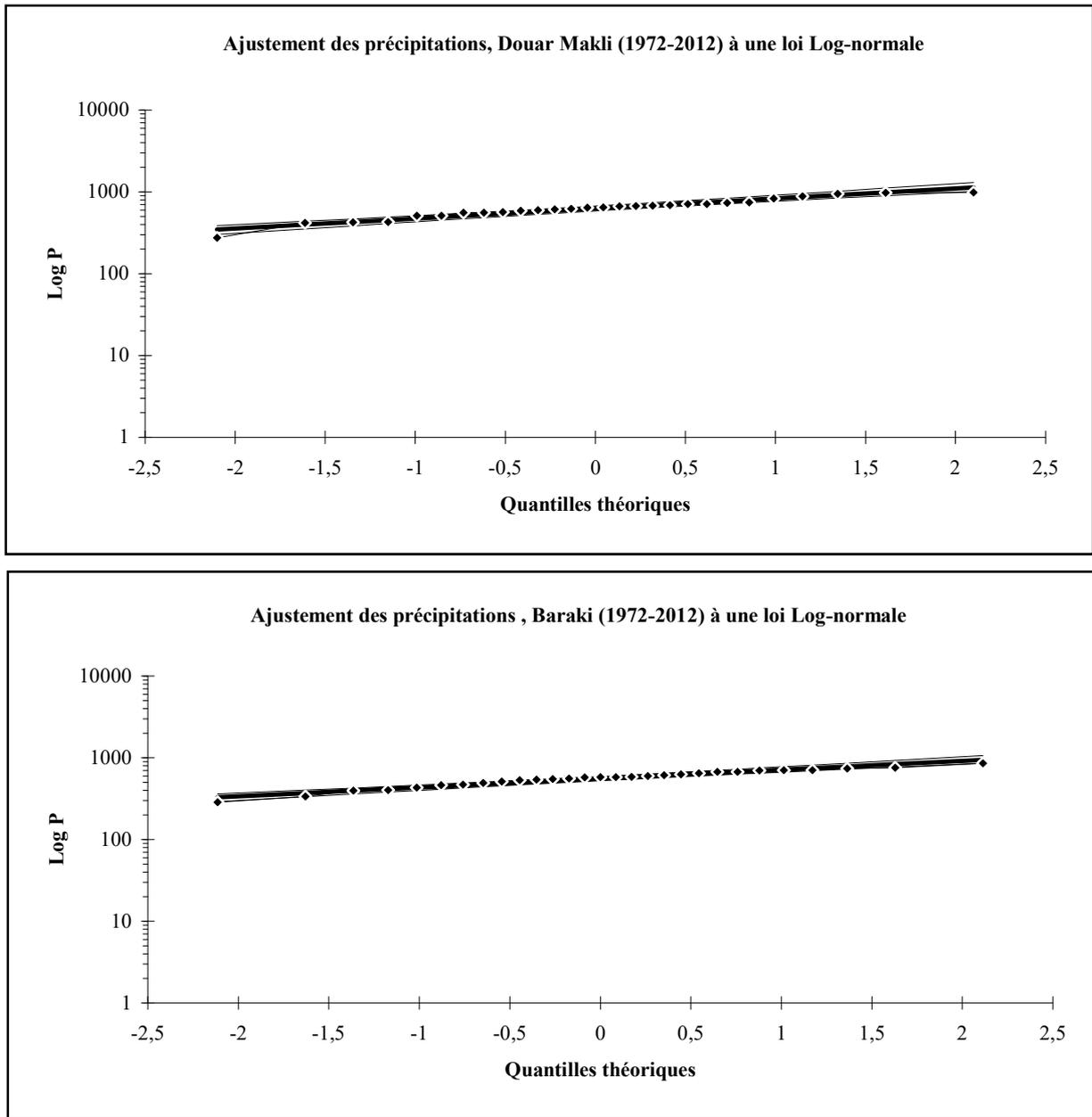


Figure 19 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi normale.



**Figure 20: Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi Log normale.**

Tableau 08: Résultats de l'ajustement graphique.

Stations	Equations de la droite d'ajustement	
Douar Makli	Loi Normale	$P=667.024+184.502*U$
	Loi Log Normale	$\text{Log } P=2.807+0.125*U$
Baraki	Loi Normale	$P=612.268+152.876*U$
	Loi Log Normale	$\text{Log } P=2.773+0.1148*U$

- **Test analytique:**

Il existe plusieurs tests utilisés on site parmi lesquelles le test de Khi-deux, le test de Kolmogorv ...etc.

Le test de Khi-deux ( $\chi^2$ ) permet de juger la qualité de l'ajustement d'une distribution théorique à une distribution expérimentale par le mesure de l'écart entre les fréquences observées et les fréquences théoriques.

Pour cela l'on fait subir le test de Khi-deux ( $\chi^2$ ) à nos séries, en utilisant le logiciel ALED, on a obtenu les résultats mentionnés sur le tableau ci dessous:

Tableau 09 : résultats de test Khi-deux.

Test	Khi -deux calculé		Khi-deux tabulé		Ajustement probable
	Loi Log Normale	Loi Normale	Loi Log Normale	Loi Normale	
d'erreurs=5% Ddl=2					
Douar Makli	3.45	4.46	5.99		Log Normale
Baraki	2.55	3.29			Log Normale

### III.2.1.2. Etude de la pluviométrie mensuelle

#### III.2.1.2.1. Calcul des valeurs caractéristiques

Afin d'évaluer la variabilité des précipitations mensuelles sur la région d'étude, on a défini les différentes caractéristiques descriptives des stations pluviométriques relatives à la période d'observation 1972/2012 (Tableau 10).

Tableau 10 : Valeurs caractéristiques de la série pluviométrique (1972/2012).

Station		Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	An
Douar Makli	$\bar{P}$	30,41	58,36	81,18	94,19	87,25	91,78	77,82	71,15	56,1	7,71	3,107	5,671	664,7
	$\sigma$	30,69	51,4	52,62	68,88	63,81	73,52	61,78	52,9	53,73	10,98	7,751	11,12	185,9
	c.v	1,01	0,88	0,65	0,73	0,73	0,80	0,79	0,74	0,96	1,42	2,49	1,96	0,28
Baraki	$\bar{P}$	30,33	60,14	95,22	93,15	85,07	79,79	58,78	56,85	34,6	8,62	4,073	6,112	612,7
	$\sigma$	31,27	53,61	60,26	57,08	51,97	64,84	45,45	42,68	36,32	12,03	9,426	9,796	152,9
	c.v	1,03	0,89	0,63	0,61	0,61	0,81	0,77	0,75	1,05	1,39	2,31	1,60	0,25

On remarque des variations temporelles qui restent toutefois moins marquées qu'à l'échelle mensuelle. Le phénomène de variabilité interannuelle des modules pluviométriques est bien exprimé par le coefficient de variation (Cv) traduisant la dispersion relative des pluies.

#### III.2.1.2.2. Répartition mensuelle de la pluviométrie

Les histogrammes de la figure 21 et 22 représentent la répartition des précipitations moyennes mensuelles des stations Douar Makli et Baraki relative à la période 1972/2012.

L'observation de ces histogrammes montre que les mois les plus pluvieux de l'année pour la régions contrôlée par la station de Douar Makli sont les mois de Décembre, Février et Janvier et les mois les plus secs sont ceux de Juin, Juillet et Août, Pour la région contrôlée par la station de Baraki sont les mois de Novembre ,Décembre et Janvier et les mois les plus secs sont ceux de Juin, Juillet et Août.

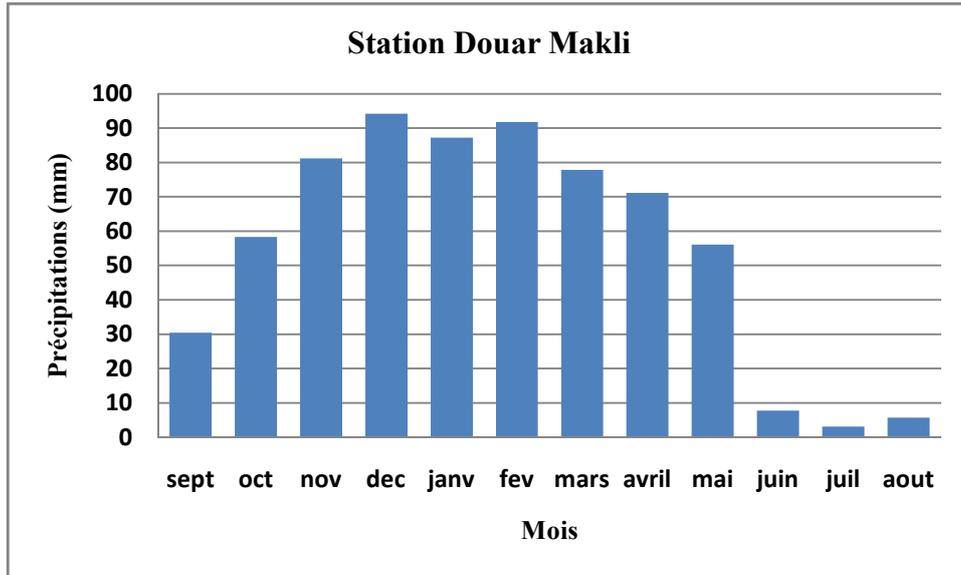


Figure 21: Variation des précipitations moyennes mensuelles à Douar Makli (1972/2012).

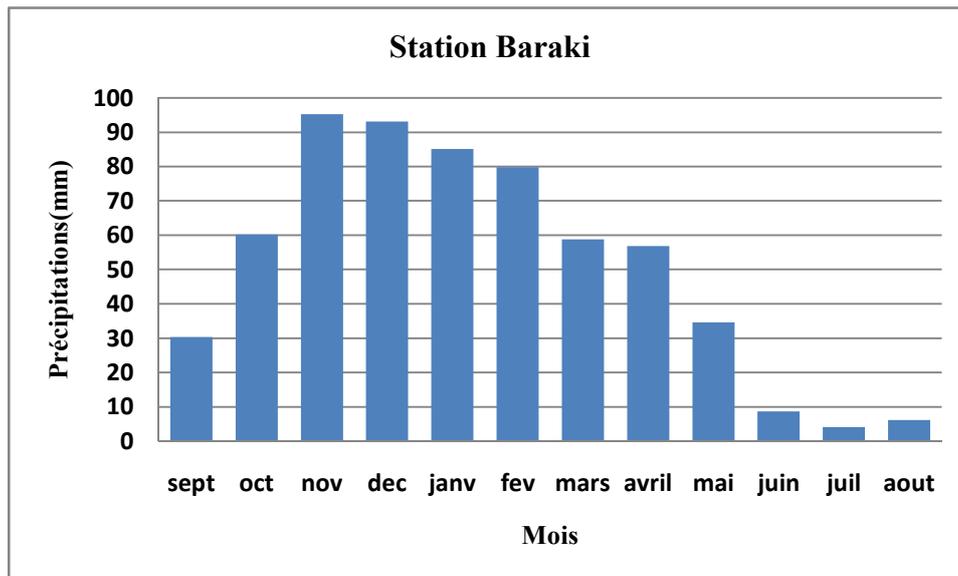


Figure 22: Variation des précipitations moyennes mensuelles à Baraki (1972/2012).

III.2.1.3. Etude de la pluviométrie saisonnière

Le tableau 11 rassemble les données des précipitations saisonnières des deux stations du bassin pour la période 1972/2012.

Tableau 11: Distribution saisonnières des précipitations moyennes.

Stations		Automne	Hiver	Printemps	Été	Annuel
<b>Douar</b>	<b>P (mm)</b>	170	273,2	205,1	16,49	664,79
<b>Makli</b>	<b>P(%)</b>	25,57	41,10	30,85	2,48	100
	<b>P (mm)</b>	185,69	258,01	150,24	18,80	612,74
<b>Baraki</b>	<b>P(%)</b>	30,31	42,12	24,52	3,07	100

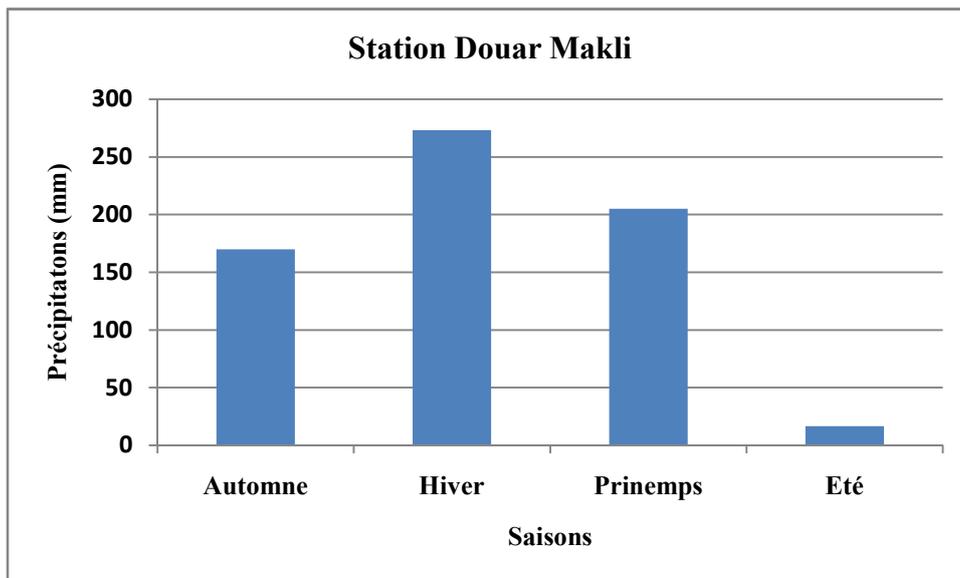
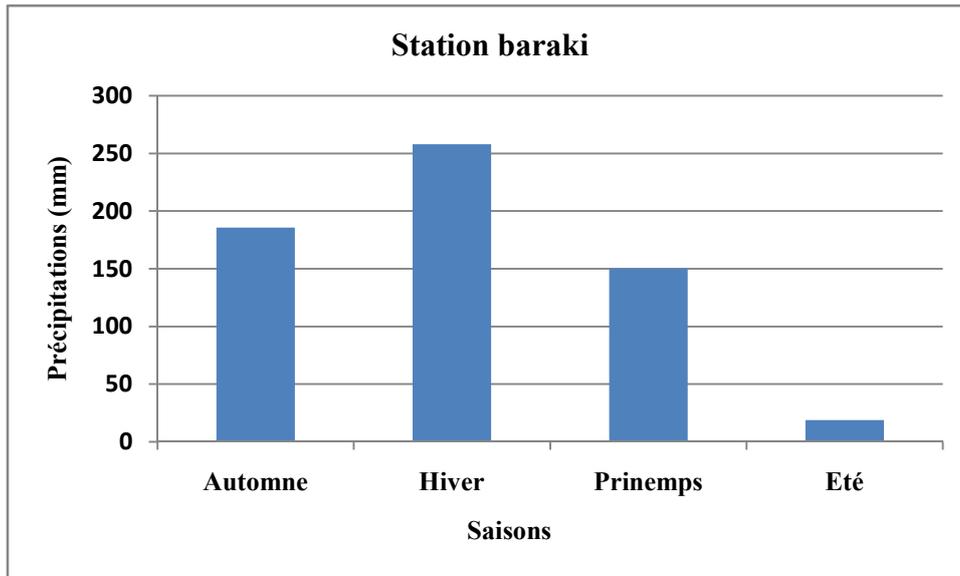


Figure 23: Variations saisonnières des précipitations à Douar Makli (1972/2012).



**Figure 24: Variations saisonnières des précipitations à Baraki (1972/2012).**

L'étude de la répartition saisonnière de la pluviosité montre une grande variabilité des précipitations, on remarque que l'hiver et l'automne sont les saisons pendant lesquelles sont enregistrées les plus grandes quantités de pluie avec un pourcentage qui varie entre 41.10 % à 42.12 %, par rapport à la saison de l'automne pendant laquelle le pourcentage de pluies oscille entre 25.57 % et 30.31 %. L'été est la saison la moins pluvieuse période pendant laquelle le pourcentage de pluies varie entre 2.48 % à 3.07 %.

On remarque une petite variabilité des précipitations annuelles entre La région contrôlée par station Douar Makli et celle contrôlée par Baraki, cette variabilité dépend de l'altitude.

### III.2.2. Etude des débits (Lames écoulées)

Dans cette étude, nous étions confrontés à un manque criard des données hydroclimatiques sur le bassin versant d'Oued El Harrach, surtout les données hydrométriques.

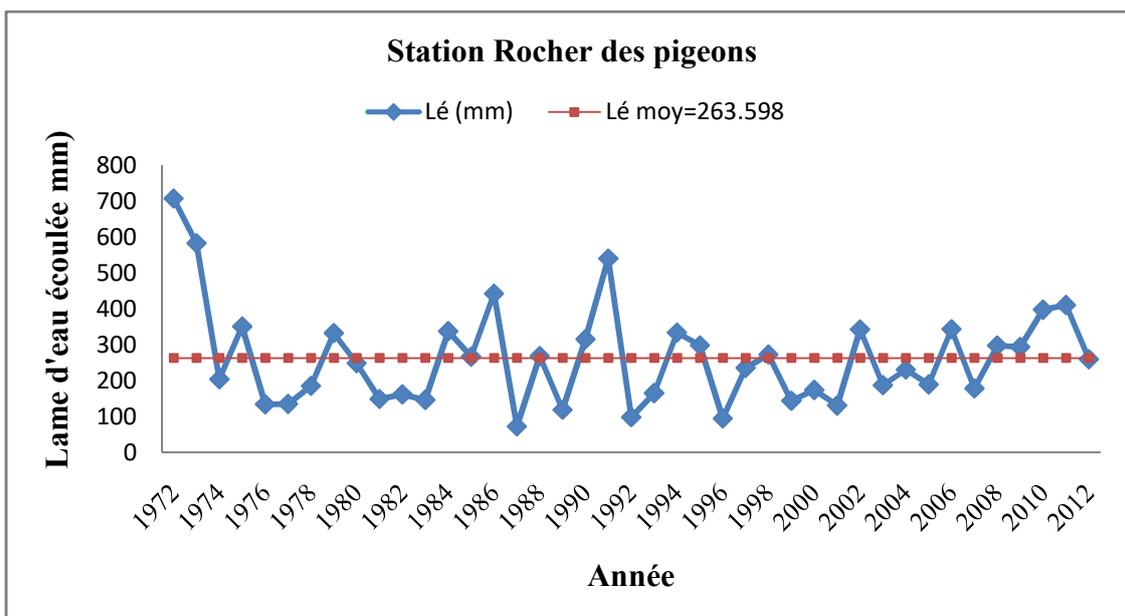
Il existe deux stations de contrôle hydrométriques sur ce bassin, il s'agit de la station du Rocher Des Pigeons à l'amont du bassin et la station de Baraki à l'aval du bassin, les séries d'observations ne sont pas continues, et contiennent plusieurs lacunes.

Du fait de la mauvaise qualité des données et dont le but de combler ces lacunes, nous avons utilisé le logiciel HYDROLAB (le plus utilisée en hydrologie pour la régression pluie-débit). (Voir annexe I)

#### III.2.2.1. Variation des écoulements annuels

Nous disposons ici de deux séries de données hydrométriques ;

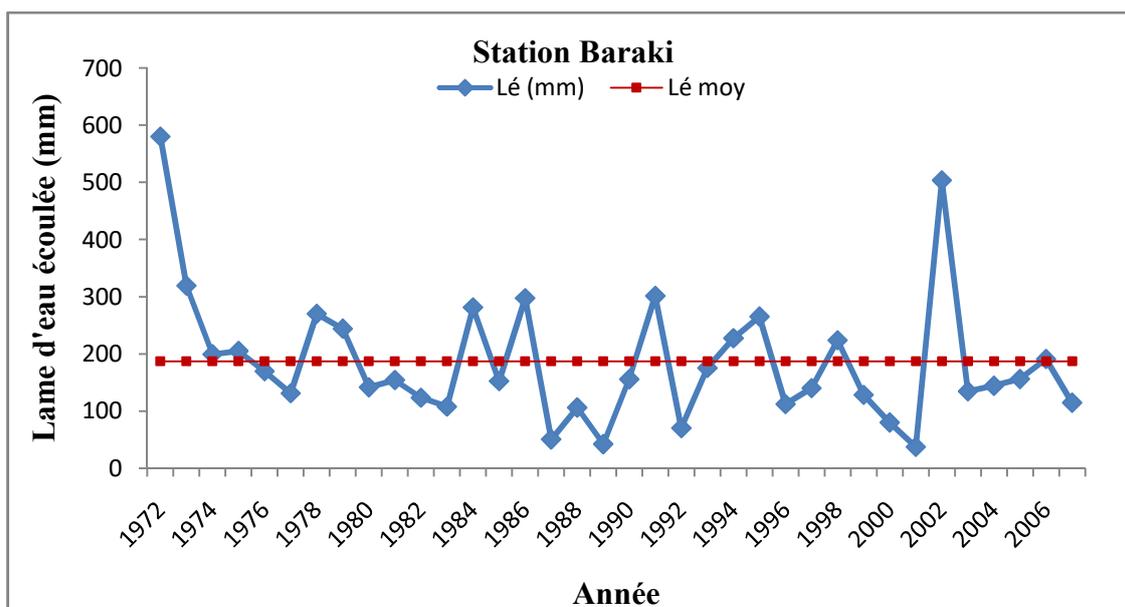
La station du Rocher des pigeons représentant 40 ans d'observations (1972/1973 – 2012/2013). Les variations interannuelles de l'écoulement à l'amont du bassin versant d'oued El Harrach (figure 25), montrent un module annuel moyen de 263.598 mm. Le module annuel maximal s'est présenté en 1972 /1973 avec 708.38 mm, alors que le module minimal est enregistré en 1987/1988 avec 73.07 mm.



**Figure 25: Variations annuelles des lames d'eau écoulées (1972/1973-2012/2013)**

La station de Baraki représentant 35 ans d'observations (1972/1973 – 2007/2008), Les variations de l'écoulement à l'aval du bassin versant d'El Harrach (figure 26), montrent un module annuel moyen de 188.96 mm.

Le module annuel maximal s'est présenté en 1972 /1973 avec 580.08 mm, alors que le module minimal est enregistré en 2001/2002 avec 37.108 mm..



**Figure 26: Variations annuelles des lames d'eau écoulées (1972/1973-2007/2008)**

### III.2.2.2. Etude statistique des écoulements

A travers certaines valeurs caractéristiques, l'analyse statistique des données hydrométriques nous permet de définir les régimes d'écoulement, les paramètres de distribution des lames annuelles est donnée au tableau suivant.

Tableau 12: paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Rocher des pigeons.

Paramètres	Valeurs
Moyenne	263.598
Variance	18833.9942
Ecart-type	137.237
Coefficient de variation	0.52

Tableau 13: paramètres de distribution des lames d'eau écoulées de la station de Baraki.

Paramètres	Valeurs
Moyenne	188.96
Variance	13187.28
Ecart-type	114.8359
Coefficient de variation	0.607

La valeur élevée du coefficient de variation montre une forte dispersion des lames d'eau écoulées, ce qui laisse penser à une distribution dissymétrique pour notre série.

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

III.2.2.2.1. Ajustement des lames d'eau écoulées annuelles à la loi normale et log normale

- Test graphique

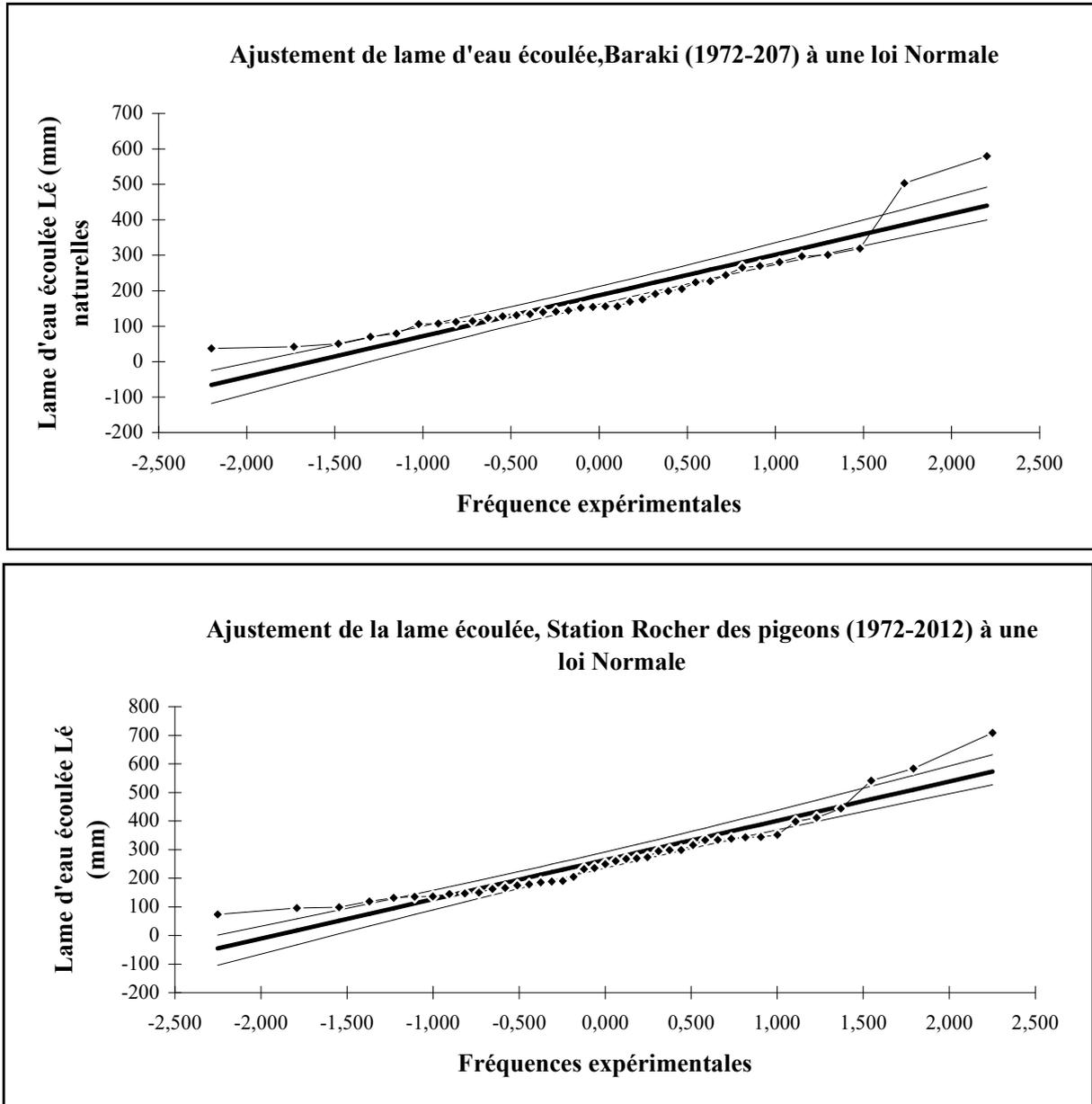
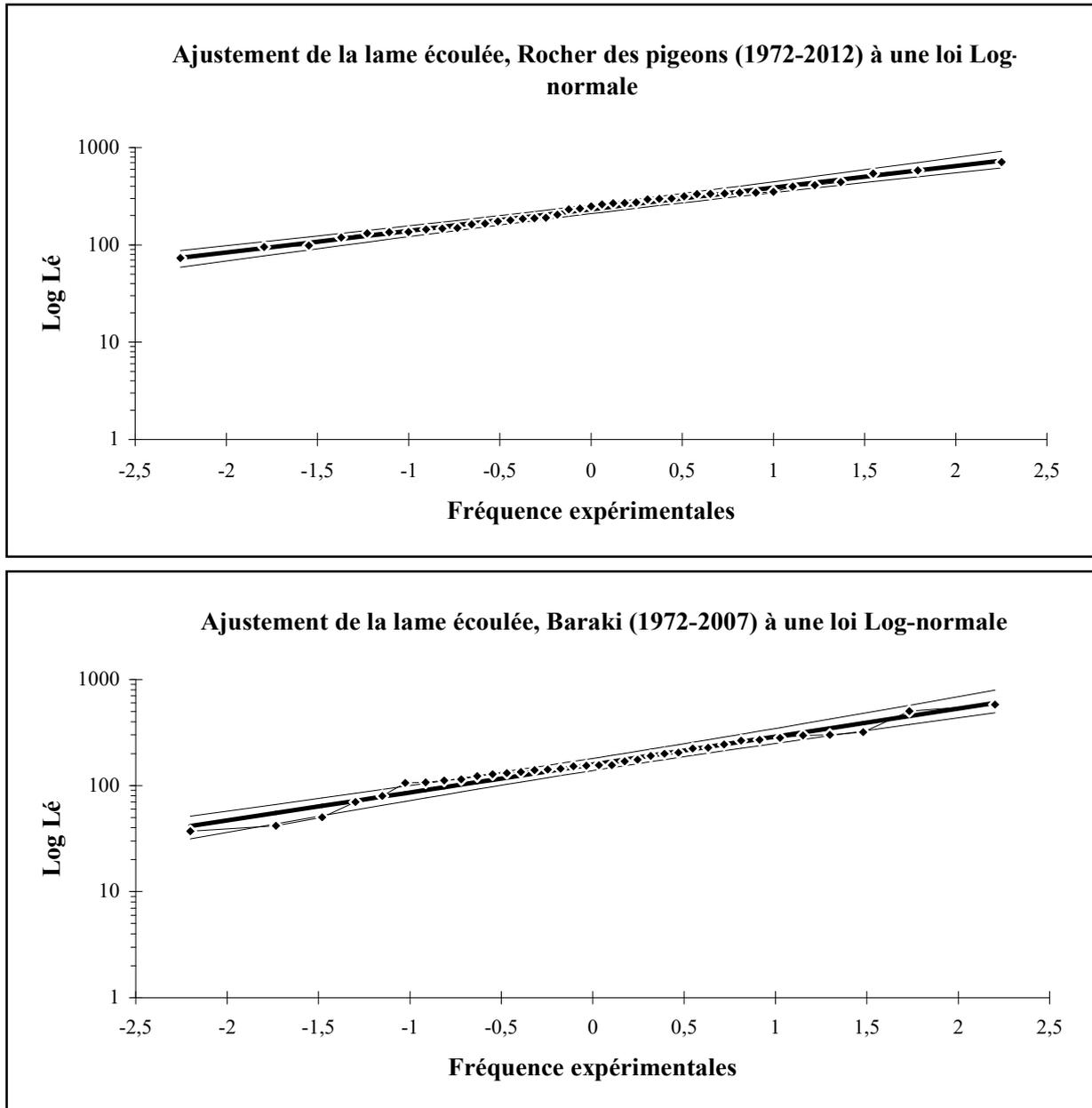


Figure 27: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi normale.



**Figure 28: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à une loi log normale.**

Tableau 14: Résultats de l'ajustement graphique.

Station	Equation de la droite d'ajustement	
Rocher des pigeons	Loi Normale	$Lé = 263.598 + 137.237 * U$
	Loi Log Normale	$\text{Log Lé} = 2.3605 + 0.222 * U$
Baraki	Loi Normale	$Lé = 188.96 + 114.84 * U$
	Loi Log Normale	$\text{Log Lé} = 2.198 + 0.26 * U$

- Test de khi-deux

Tableau 15 : résultats de test de Khi-deux.

	Khi 2 calculé		Khi 2 tabulé		Ajustement probable
	Loi Log Normale	Loi Normale	Loi Log Normale	Loi Normale	
Test d'erreurs 10% Ddl= 2					
Rocher Des Pigeons	2.96	3.36	5.99		Log Normale
Baraki	3.16	4.26			Log Normale

### III.2.2.2. Variations mensuelle des lames d'eau écoulées

Tableau 16: Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée (Rocher des pigeons)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
Lé (mm)	4,40	6,94	12,19	25,74	37,49	46,17	52,74	33,98	23,81	10,01	5,86	4,26

L'analyse des lames écoulées mensuels montre une hauteur minimale varie entre 4.26 mm et 4.40 mm en aout et septembre, et une hauteur maximal de 52.74 mm en mars.

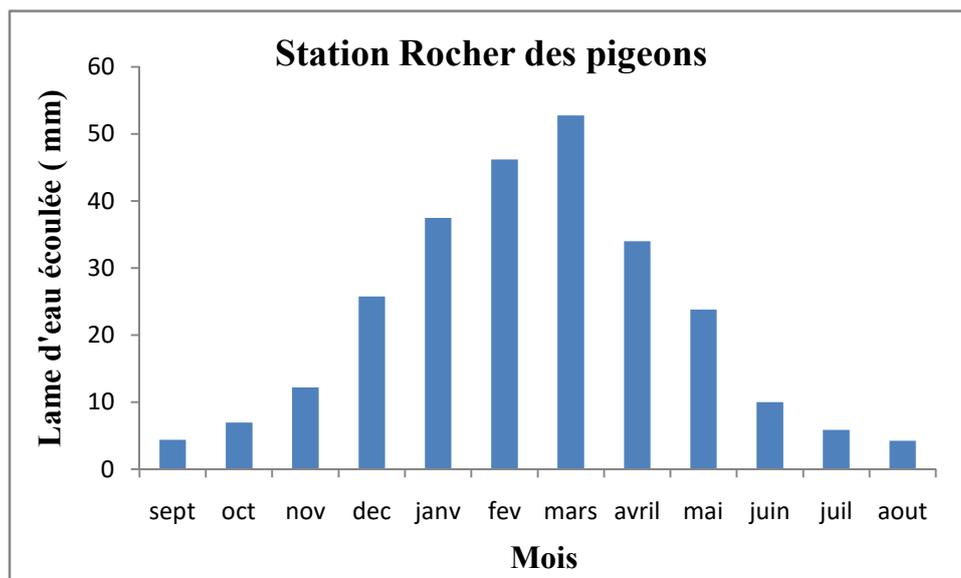


Figure 29: Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1972-2012)

Tableau 17: Valeurs moyennes mensuelles de la lame d'eau écoulée (Baraki)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
Lé (mm)	2,94	4,70	8,35	23,18	34,15	41,64	27,39	22,11	11,94	4,29	4,30	2,99

L'analyse des lames écoulées mensuels montre une hauteur minimale varie entre 2.94 mm et 2.99 mm en septembre et aout, et une hauteur maximal de 41.64 mm en Février.

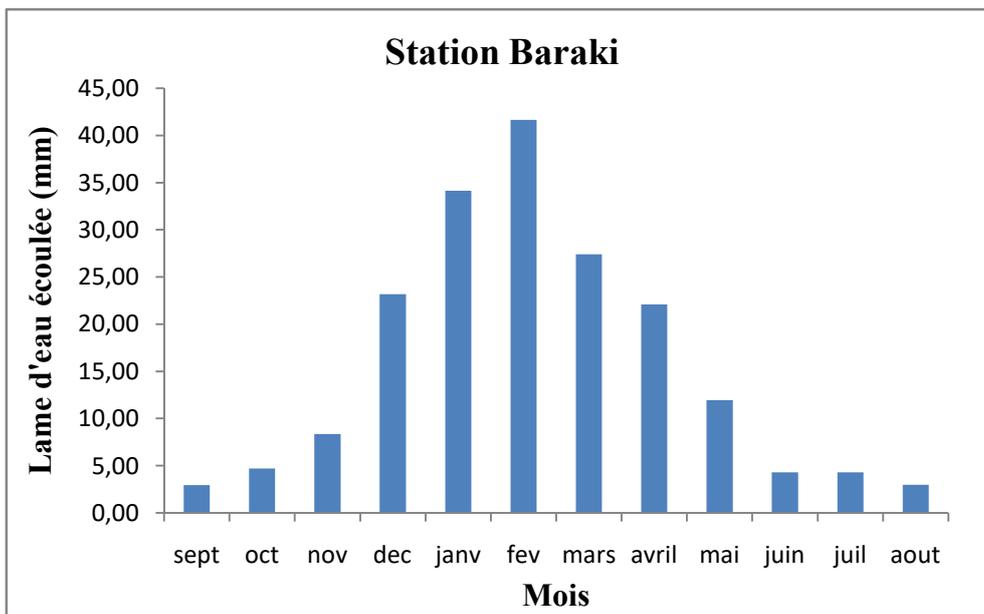


Figure 30 : Variations mensuelles des lames d'eau écoulées (1972-2007)

### III.2.2.3. Variations saisonnière des lames d'eau écoulées

Tableau 18: répartition des lames d'eau écoulées saisonnière.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
<b>Saisons</b>	Automne			Hiver			Printemps			Été		
Roches Des Pigeons	23,531			109,41			110,53			20,129		
Baraki	15,99			98,98			61,44			11,58		

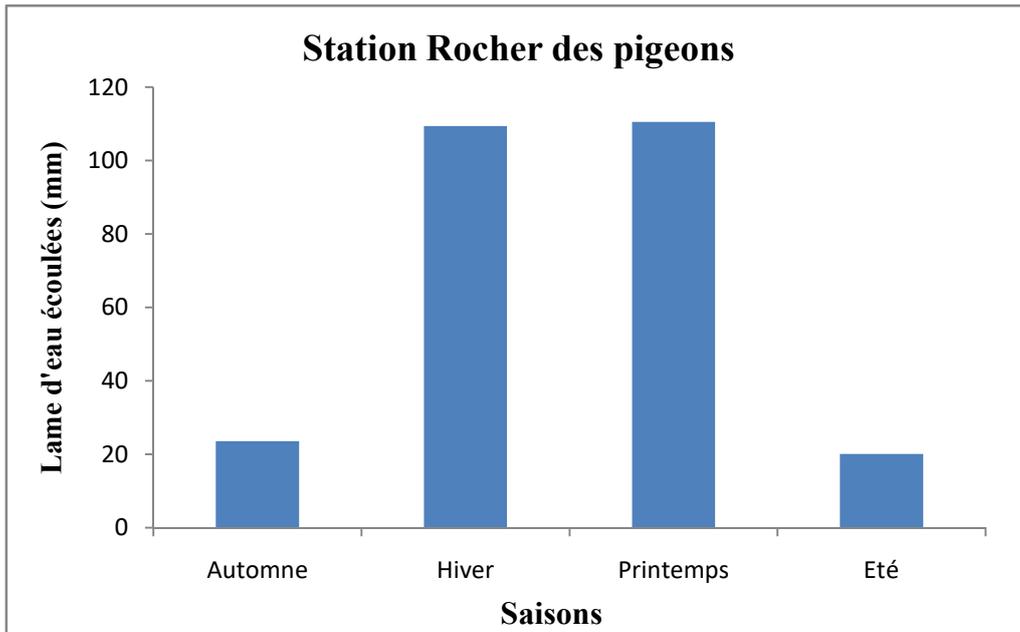


Figure 31: Variations saisonnières des lames d'eau écoulées (1972-2012)

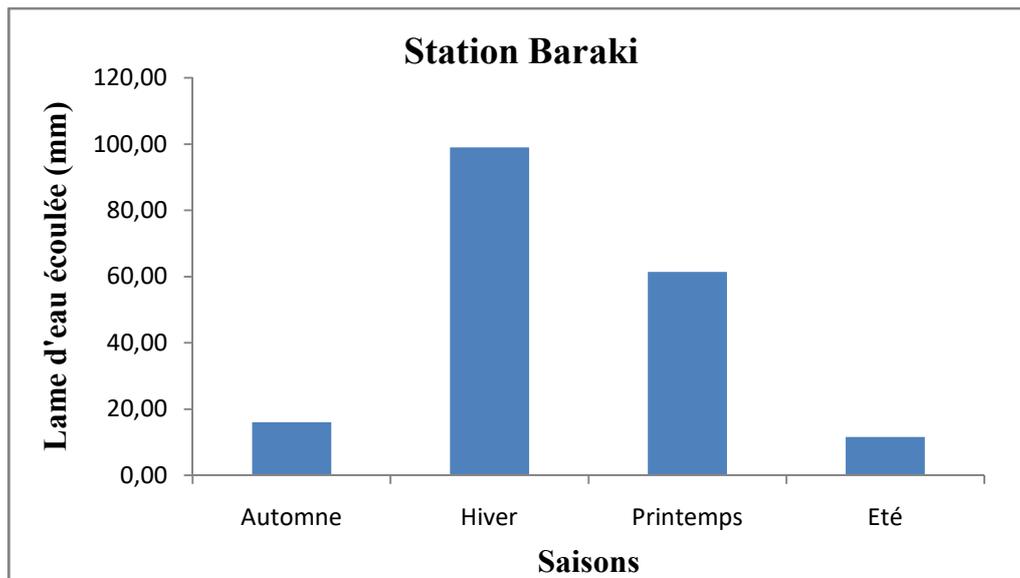


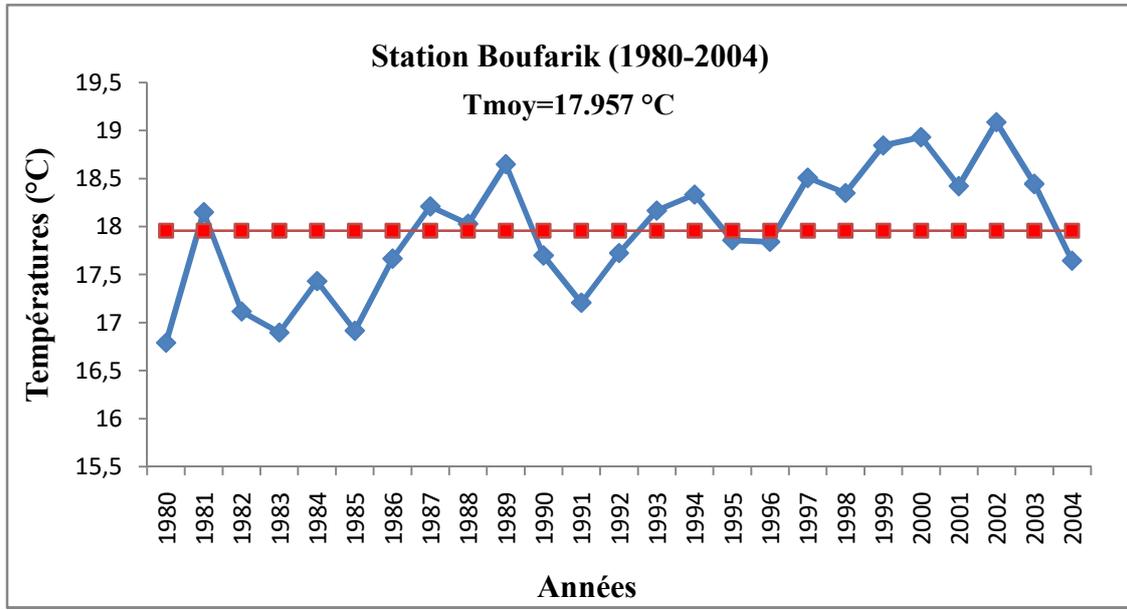
Figure 32: Variations saisonnières des lames d'eau écoulées (1972-2007)

La distribution saisonnière des lames d'eau écoulées montre que l'Hiver est la saison qui présente des écoulements importants dont le maximum atteint le 98.98 mm et cela explique la présence des crues durant cette saison.

### III.2.3. Etude de la température

#### III.2.3.1. Températures annuelles

La moyenne annuelle des températures est  $17.957^{\circ}\text{C}$ , la température maximale atteinte  $19.0875^{\circ}\text{C}$  en 2002, et la température minimale de  $16.79^{\circ}\text{C}$  à été enregistrée en 1980.



**Figure 33 : Températures moyennes annuelles à Station Boufarik (1980-2004)**

Selon la figure 35, on constate une augmentation de la température au-delà de l'année 1991, on passe de  $17.957^{\circ}\text{C}$  à  $19.0875^{\circ}\text{C}$ . Cette augmentation à l'échelle de notre zone d'étude a une influence directe sur les paramètres hydroclimatiques tels que l'évapotranspiration.

### III.2.3.2. Température mensuelles

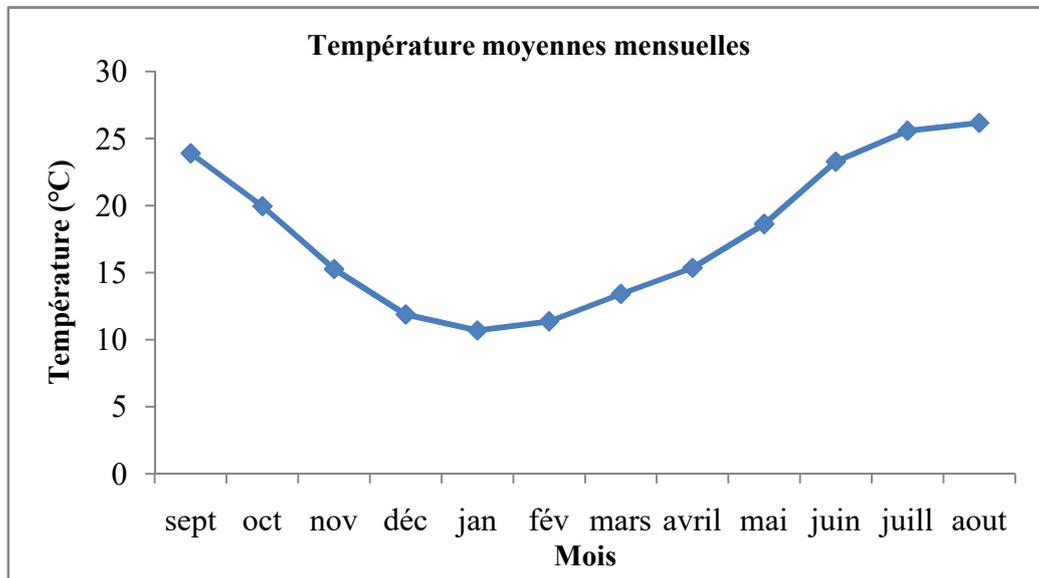
Les températures moyennes mensuelles sont regroupées dans le tableau 19, pour une période de 24 ans (1980-2004).

Le tableau 19 : Températures moyennes mensuelles à la station de Boufarik (1980-2004).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T Moy	23,9	19,95	15,27	11,88	10,7	11,38	13,41	15,36	18,63	23,28	25,57	26,16

Le tableau ci-dessus, montre que la température moyenne minimale s’observe au mois de Janvier (10.7°C) et la maximale de 26.16°C en Août.

La saison chaude s’étend de Mai à Octobre, Les mois pendant lesquels les températures moyennes mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle (17.957°C), alors que la saison froide correspond à la période allant de Novembre à Avril.



**Figure 34: Températures moyennes mensuelles à Boufarik (1980-2004)**

### III.2.4. Etude d'évapotranspiration (ETP)

L'évapotranspiration est une des composantes fondamentales de cycle hydrologique, son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'un bassin versant.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, on utilise des méthodes basées sur des variables climatiques.

La formule empirique qu'on a utilisée est celle de THORNTHWAITE, cette formule a été établie en 1948 et tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

Formules de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration (ETP) potentielle mensuelle ;

$$ETP = 16 \times (10 t / I)^a \times K$$

Ou : ETP ; évapotranspiration mensuelle en mm,

T ; température moyenne mensuelle,

I ; Indice thermique annuel soit la somme des indices de chaleur mensuels

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

Avec  $i = (t/5)^{1.514}$  ;

$$a = (1.6 / 100) I + 0.5$$

Et  $K =$  coefficient d'ajustement mensuel dépend de la latitude. (Voir annexe II)

Selon les cartes établies par l'ANRH (voir Annexe III), les valeurs moyennes annuelles de l'ETP dans notre zone d'étude, varient généralement entre 1293 et 1353 mm/an. En comparant ces valeurs avec celle obtenues par les méthodes de THORNTHWAITE, on remarque un écart modérée.

### III.2.5. Modélisation par corrélation (précipitations-lames écoulées)

#### III.2.5.1. Corrélation annuelle

Nous exposons ici une corrélation simple entre les précipitations de chaque station avec les lames d'eau écoulées.

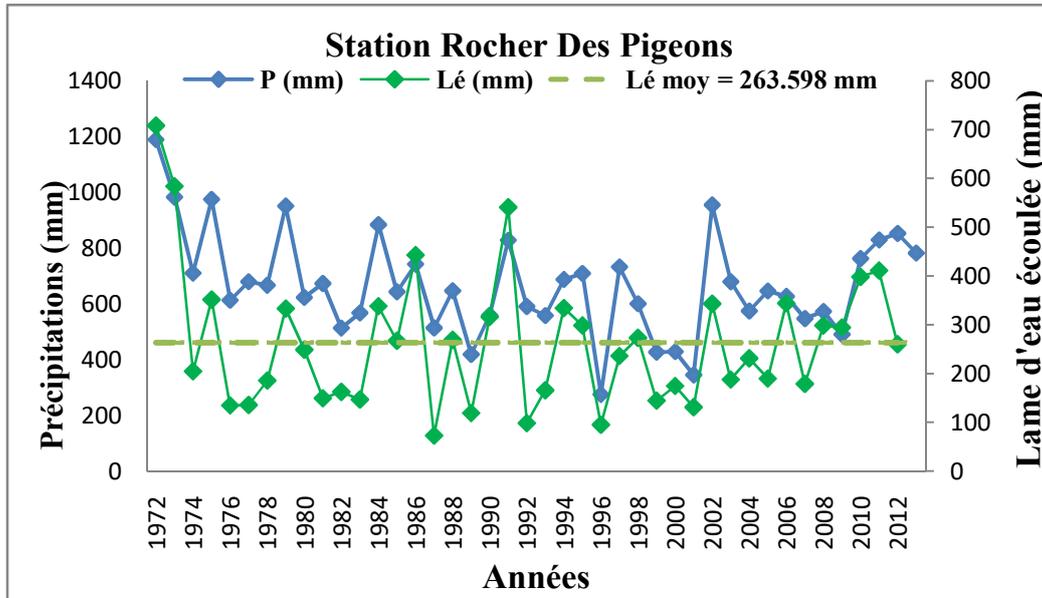


Figure 35: Variations annuelle des hauteurs des pluies et des lames d'eau écoulées.

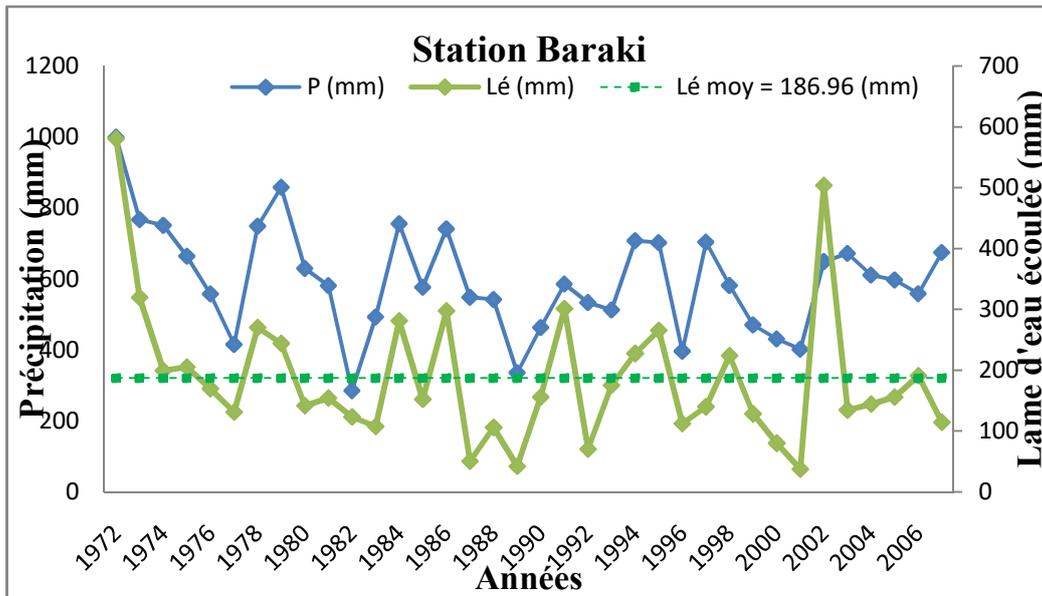


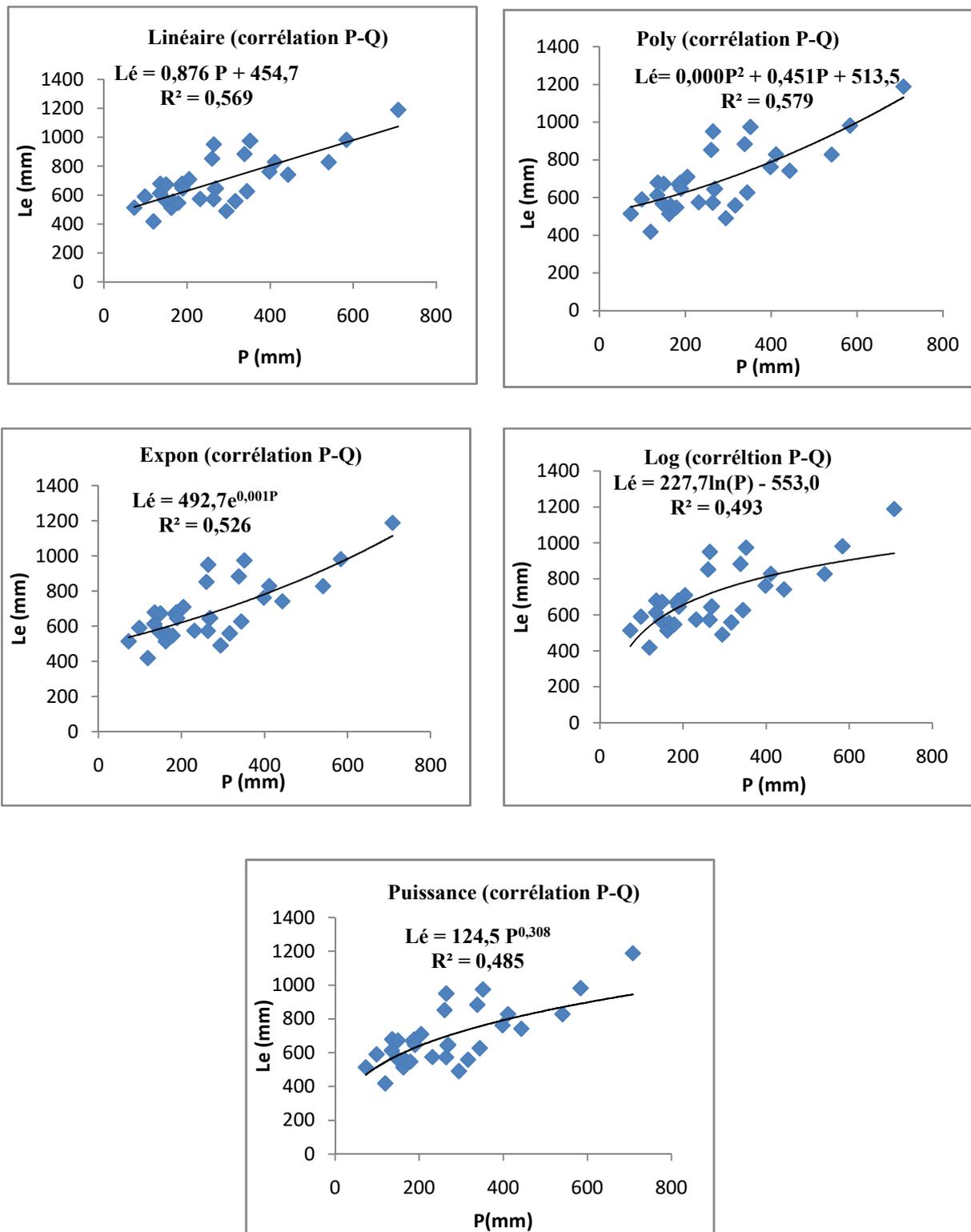
Figure 36: Variations annuelle des hauteurs des pluies et des lames d'eau écoulées.

Le tableau 20, montre les différents résultats du coefficient de détermination et les modèles qui relient les paramètres pluies-débits.

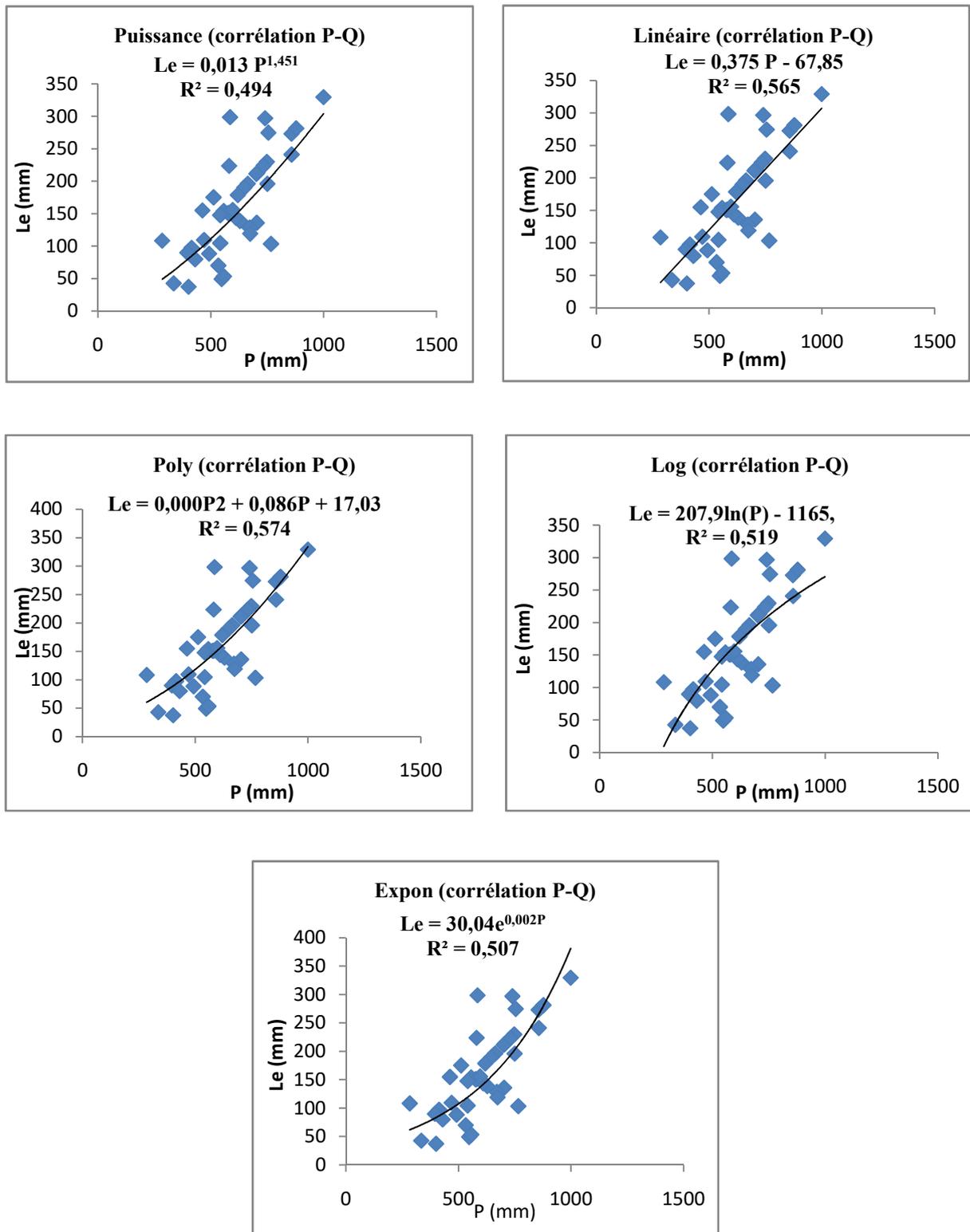
Tableau 20: résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et lame d'eau écoulée annuelle.

	Rocher Des Pigeons	Baraki
Linéaire	$Lé = 0.876 P + 454.7$	$Lé = 0.375 P - 67.85$
Exponentielle	$Lé = 492.7 e^{0.001 \cdot P}$	$Lé = 30.04 e^{0.002 P}$
Logarithmique	$Lé = 227.7 \ln (P) - 553.0$	$Lé = 207.9 \ln (P) - 1165$
Polynomial	$Lé = 0.000P^2 + 0.451P + 51305$	$Lé = 0.000P^2 + 17.03$
puissance	$Lé = 124.5 P^{0.308}$	$Lé = 0.013 P^{1.451}$

Les figures 37 et 38 visualisent la modélisation par corrélation des données annuelles. Quelque soit le type de relation choisi les coefficients de corrélation sont très faibles, les corrélations qui peuvent être admissibles pour notre cas, sont les tendances linéaires et polynomiales pour les deux stations.



**Figure 37: Résultats de corrélacions entre les pluies et la lame d'eau écoulée annuelle (précipitations de station Douar Makli et lame écoulée de Rocher Des Pigeons).**



**Figure 38: Résultats de corrélacions entre les pluies et la lame d'eau écoulée annuelle (station Baraki).**

### III.2.6. Description des modèles GR (Génie Rural)

#### ❖ 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) et mensuel (GR2M). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle, cette dernière pouvant être une courbe moyenne interannuelle. [39] [40] [41] [42]

Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse. [31]

Les paramètres doivent être déterminés par calage, en minimisant l'erreur du modèle sur une série de débits observés. Lorsque des données de débit ne sont pas disponibles pour le calage, l'estimation des paramètres peut se faire par des formules régionales liant les valeurs des paramètres à des descripteurs physiques du bassin, par l'utilisation de modèles calés sur des bassins voisins, ou mieux encore par l'exploitation de quelques mesures ponctuelles en périodes de hautes eaux. [44]

Cependant, leur utilisation conduit souvent à des erreurs beaucoup plus fortes que lorsque l'on peut réaliser un véritable calage du modèle.

Le développement des modèles étant un processus de longue haleine, nous présentons ici succinctement les versions actuelles de trois modèles GR conçus respectivement pour les pas de temps annuel, mensuel et journalier.

Dans la suite, on désignera par  $P$  (mm) la hauteur journalière de pluie, par  $E$  (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par  $Q$  (mm) le débit simulé (mm).  $P$  est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment).  $E$  n'est pas nécessairement une donnée datée mais peut être issue d'une courbe de régime d'ETP moyenne interannuelle. Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm.

### **III.2.6.1. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A**

#### **III.2.6.1.1. Définition**

Le modèle **GR1A** (modèle du **G**énie **R**ural à **1** paramètre **A**nnuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau.

La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006a). [45] [46]

### III.2.6.1.2. 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 :

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

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.

### III.2.6.1.3. Paramètre

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

### III.2.6.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

#### III.2.6.2.1. Définition

Le modèle **GR2M** (modèle du **G**énie **R**ural à **2** paramètres **M**ensuel) 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), Makhlouf (1994), Makhlouf et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006b), qui a permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi et al. (2006b) qui paraît la plus performante. [47]

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.

#### III.2.6.2.2. Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure 39.  $P_k$  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 :

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

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 :  $S' = S_k + P_S$

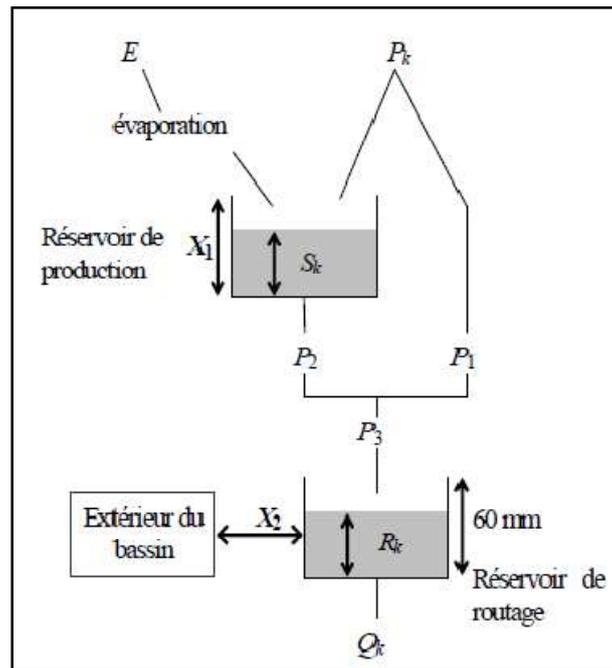


Figure 39: Schéma de la structure du modèle GR2M. [47]

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

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

$E$  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  $P_2$  :

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

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 :

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

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

$$R'' = X_2 \times R'$$

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 :

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

### III.2.6.2.3. 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 23.

Tableau 21 : 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

#### IV.1. Application du modèle GR1A

Dans notre étude, nous avons utilisé la version Excel disponible dans le site de Cemagref.

Les données annuelles utilisées pour ce modèle sont les pluies annuelles observées en mm, des ETP en mm et des débits annuels exprimés en lames d'eau écoulées en mm.

La période choisie pour cette étude est celle de 1972 à 2000 pour la station de (Douar Makli – Rocher des Pigeons) et de 1979 à 1993 et 1997 à 2007 pour la station de Baraki.

##### IV.1.1. Calage de modèle

Le calage du modèle a été effectué avec la série allant 1973 à 1990 pour la station (Douar Makli – Rocher des Pigeons) et 1979 à 1993 pour la station de Baraki.

Nous avons procédé au calage du paramètre X (coefficient de correction de l'ETP(mm)) du modèle en appliquant des changements sur ce dernier en commençant par la valeur fixée à 0.13 et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0.01 jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum supérieur ou égale à 70% et un coefficient de corrélation entre les débits simulés et les débits observés significatif proche de 1. La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination  $R^2$ .

Les résultats du calage et validation du calage sont présentés dans le tableau 22.

Tableau 22: Résultat du calage du modèle GR1A.

Station	Douar Makli –Rocher Des Pigeons				Baraki			
	X	Nash %	Bilan %	Coefficient de détermination $R^2$	X	Nash %	Bilan %	Coefficient de détermination $R^2$
Résultats	0.46	89.5	104.8	0.869	0.40	86.1	97.0	0.859

Selon le tableau 22, les valeurs des coefficients de détermination sont supérieures à 80%, les valeurs du critère de Nash obtenues sont très bonnes comprises entre 89.5% et 86.1% et le bilan est équilibré variant entre 104.8 % et 97.0 %. Aussi, la bonne superposition des courbes (Fig 40 et 42) des Lames d'eau écoulées calculées et mesurées indique que le modèle GR1A appliquée aux données d'Oued El Harrach est bien calé.

Le paramètre du modèle, coefficient de correction de l'évapotranspiration (X) est inférieur à 1, et varie entre 0.46 et 0.40 pour les deux stations.

La diminution de la valeur de X a été remarquée de l'amont vers l'aval tout au long du bassin d'Oued El Harrach.

Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique et selon les résultats obtenus montre que notre bassin gagne de l'eau en profondeur.

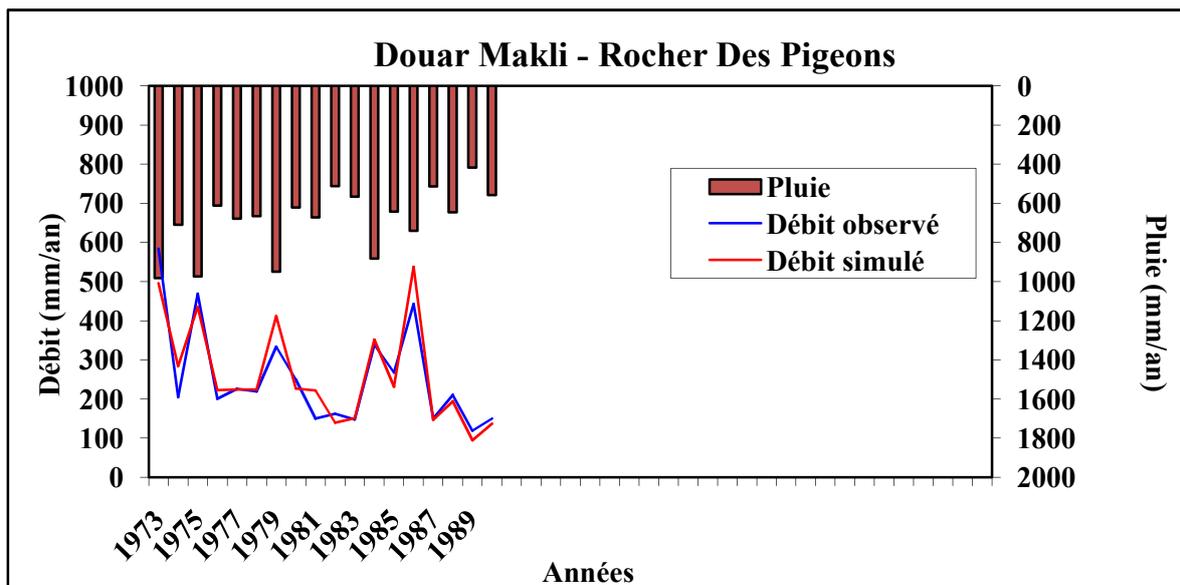


Figure 40: Visualisation de la qualité du calage pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons.

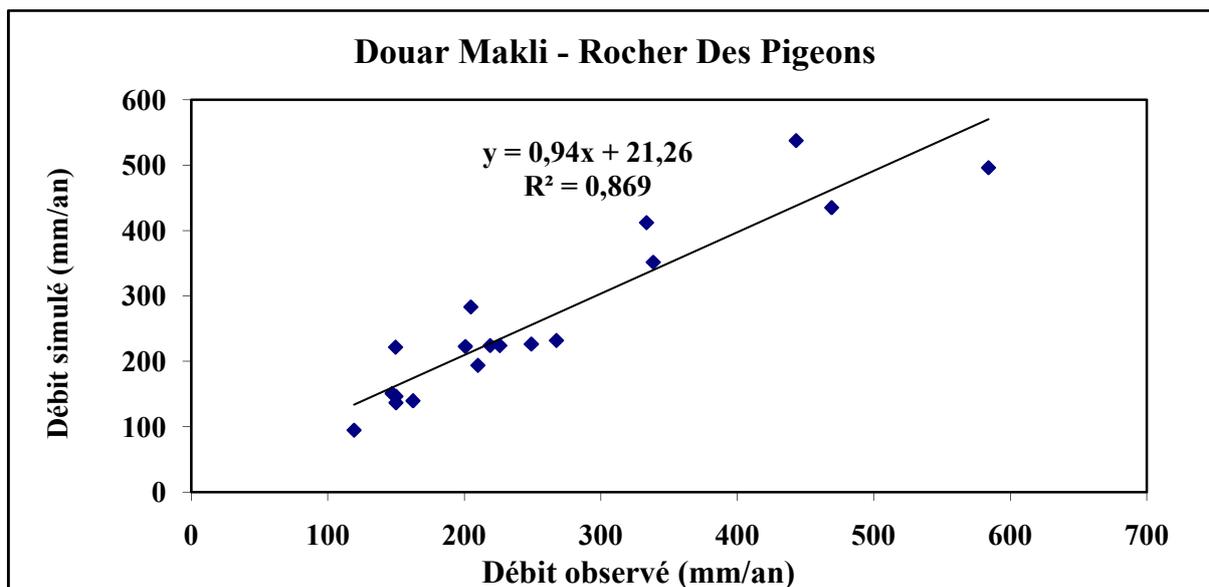


Figure 41: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés pour la station Douar Makli – Rocher des Pigeons.

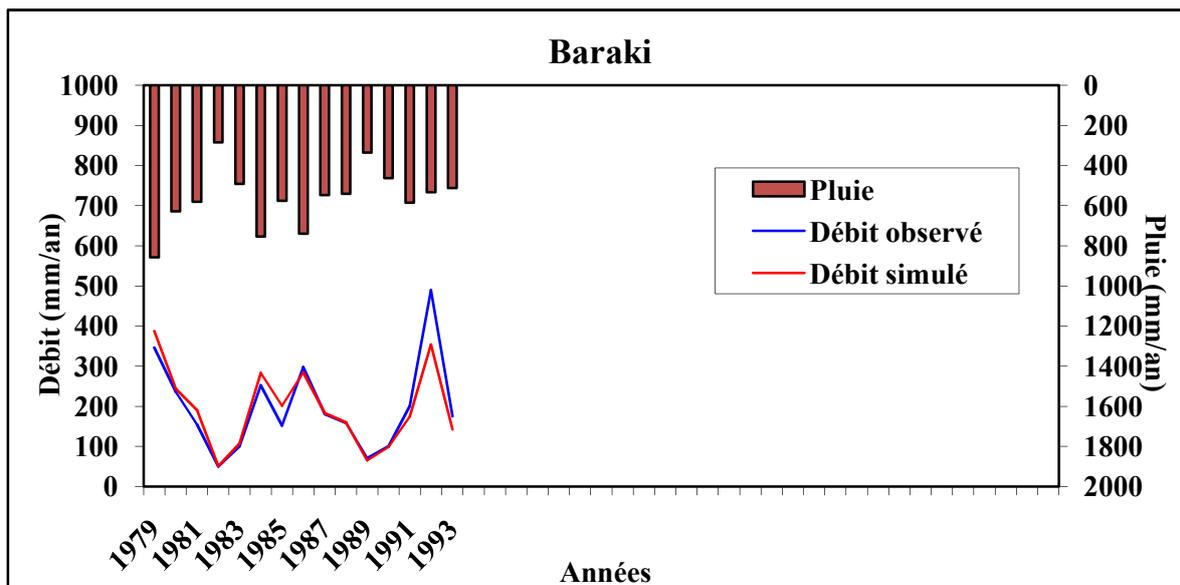


Figure 42: Visualisation de la qualité du calage pour la station de Baraki.

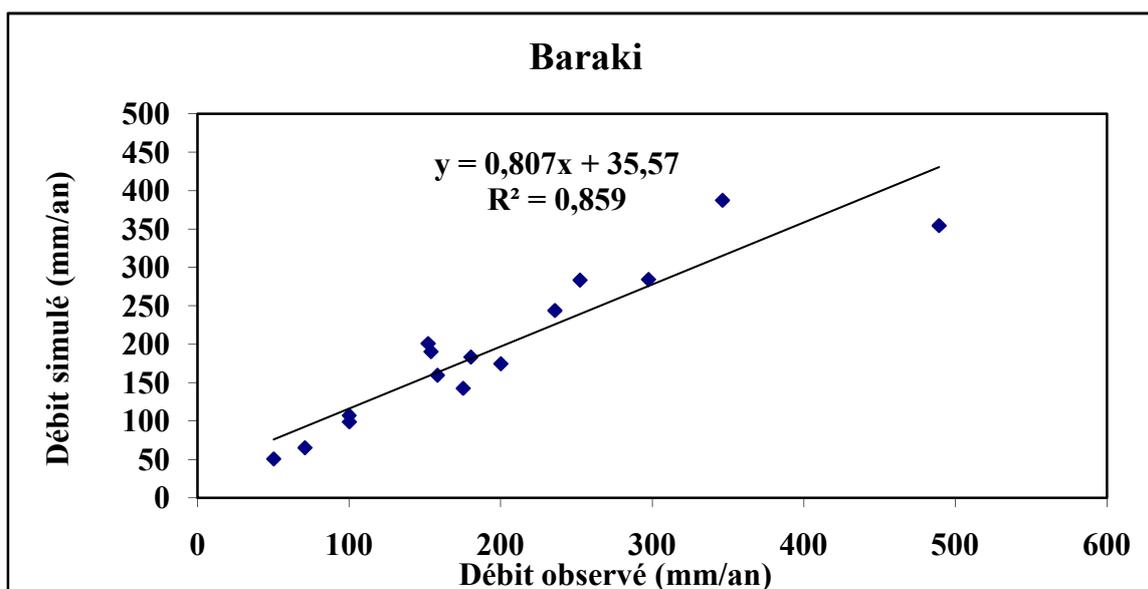


Figure 43: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés pour la station de Baraki.

IV.1.2. Validation du modèle

La validation porte sur l’application du modèle sur une série de données qui n’ont pas été utilisées lors du calage. Nous avons utilisé donc la série allant de 1991 à 2000 pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons, et de 1997 à 2007 pour la station de Baraki.

Le tableau 23 ; les variations des coefficients de détermination et de corrélation Q simulé – Q observé relatifs.

	Douar Makli – Rocher Des Pigeons	Baraki
Coefficient de détermination ( $R^2$ )	0.884	0.911
Coefficient de corrélation (R)	0.94	0.954

Selon le tableau 23 ci-dessus, la validation du modèle GR1A donne des valeurs de coefficients de corrélation (R) supérieures à 80%, cela traduit la bonne performance du modèle appliquée à Oued El Harrach.

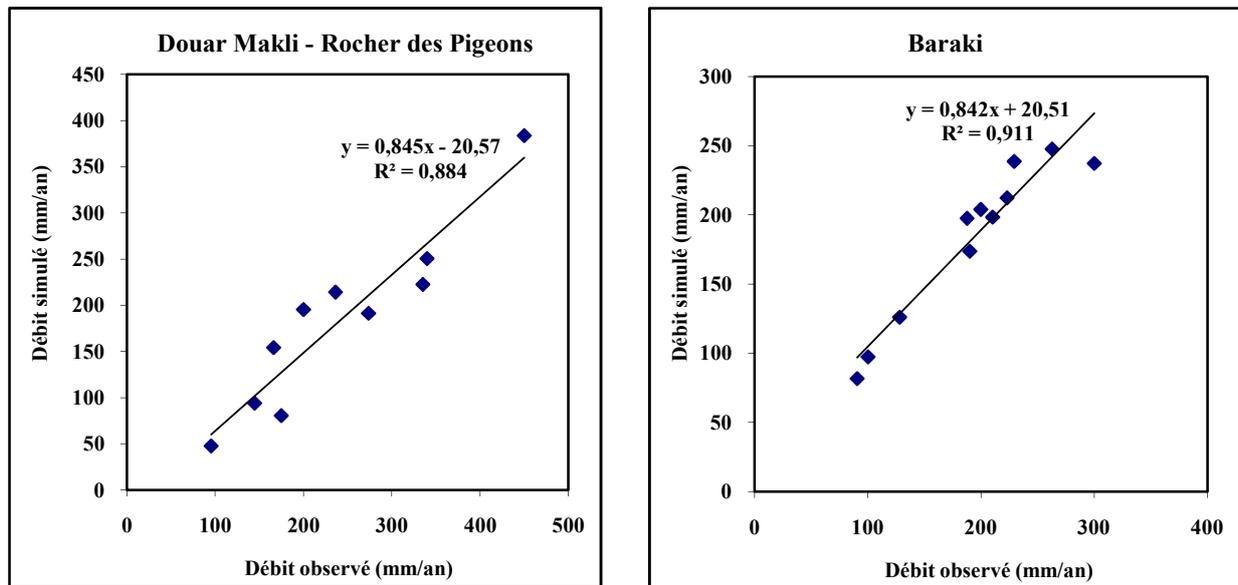


Figure 44: Validation du modèle GR1A pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons et la station Baraki.

## IV.2. Application du modèle GR2M

Pour prédire le débit à un mois donné nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm).

Les données utilisées sont relatives aux périodes (Janv-1973 à Déc 1990) pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons, et (Janv-1979 à Déc-1993) pour la station de Baraki.

### IV.2.1. Calage du modèle

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

Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X1 et X2 du modèle entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) pour X1 et 0.21 à 1.31 (mm) pour X2 avec un intervalle de 0.001 jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination, et le critère de Nash (valeur égale ou supérieur à 70%).

Les résultats du calage, coefficient de détermination, et le Nash sont présentés dans le tableau 24.

Tableau 24: Résultat du calage du modèle GR2M.

Critères	Station Douar Makli-Rocher Des Pigeons	Station Baraki
X <sub>1</sub>	205.00	242.00
X <sub>2</sub>	0.98	0.93
Nash %	80.8	80.2
Bilan %	93.7	91.2
R <sup>2</sup>	0.904	0.883

D'après les valeurs du critère de Nash et les coefficients de détermination obtenus pour les deux stations, ainsi que la bonne superposition des courbes des débits observés et les débits simulés (Tableau 24 ; et les figures 45 et 46), le calage paraît correct pour les deux stations.

La variabilité mensuelle de l'écoulement est plus importante que celle annuelle, traduit par l'effet de compensation statistique qui règle la moyenne annuelle. Cette irrégularité des débits mensuels se traduit dans le modèle par le niveau de réservoir de production.

La capacité du réservoir de production est assez modérée. Elle varie entre 0.28 et 135.15 mm pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons, et entre 0.62 mm et 156.24 mm pour la station de Baraki.

De même, la capacité du réservoir de routage est aussi assez modérée pour les deux stations, elle varie entre 6.36 mm et 49.06 mm pour La station de Douar Makli – Rocher Des Pigeons et entre 3.17 mm et 43.37 mm pour la station de Baraki.

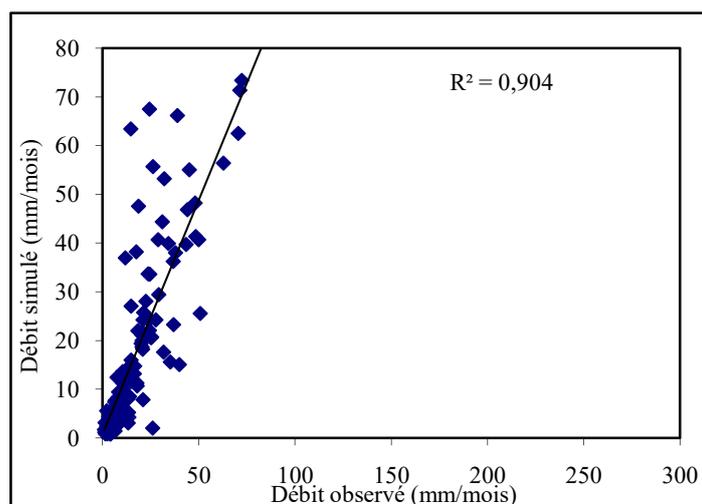
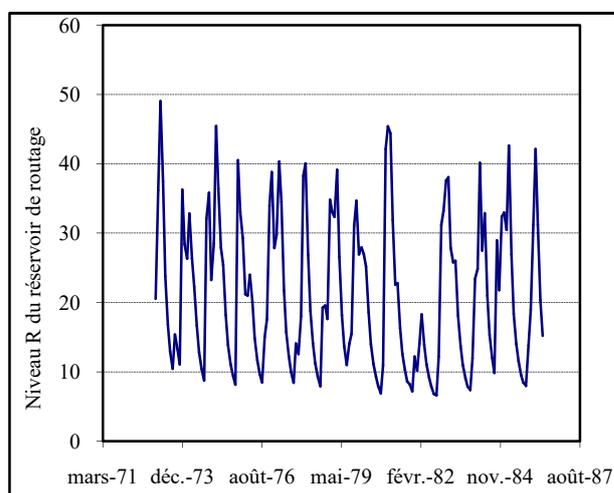
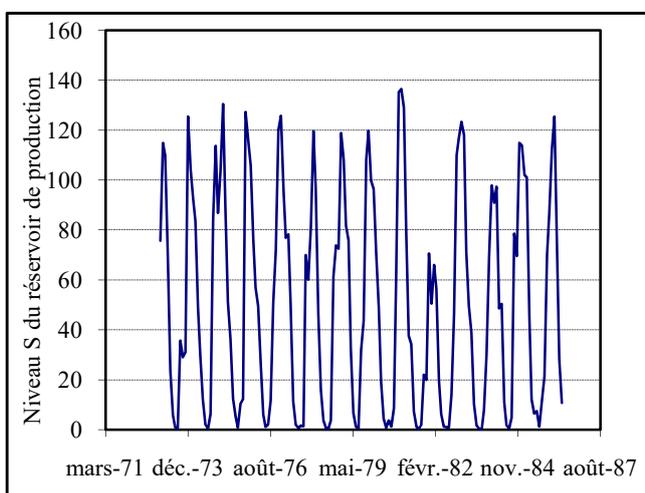
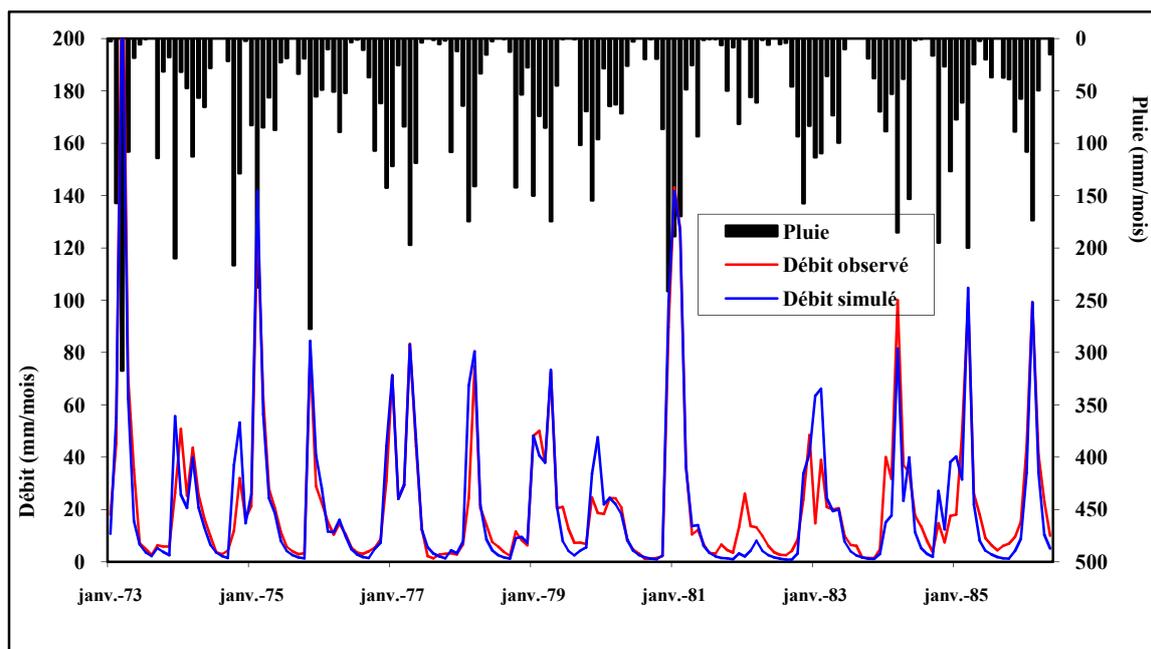


Figure 45: calage du modèle GR2M pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons.

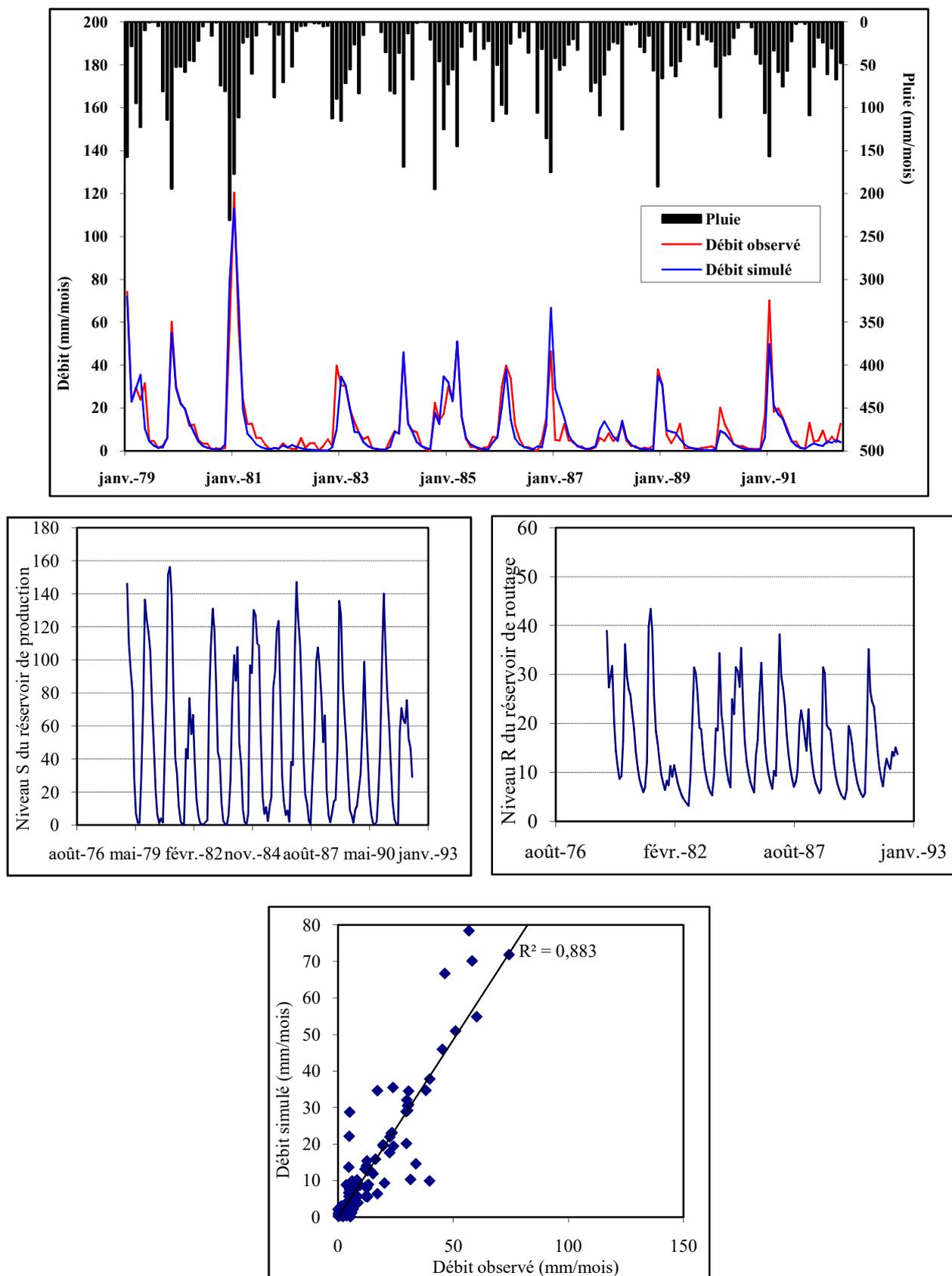


Figure 46: Calage du modèle GR2M pour la station Baraki.

Tableau 25: Valeurs des paramètres après calibration et performances du modèle GR2M.

Station	Douar Makli-Rocher Des Pigeons	Baraki
S	0.28 - 135.15	0.62 - 156.24
R	6.63 - 49.06	3.17 - 43.37

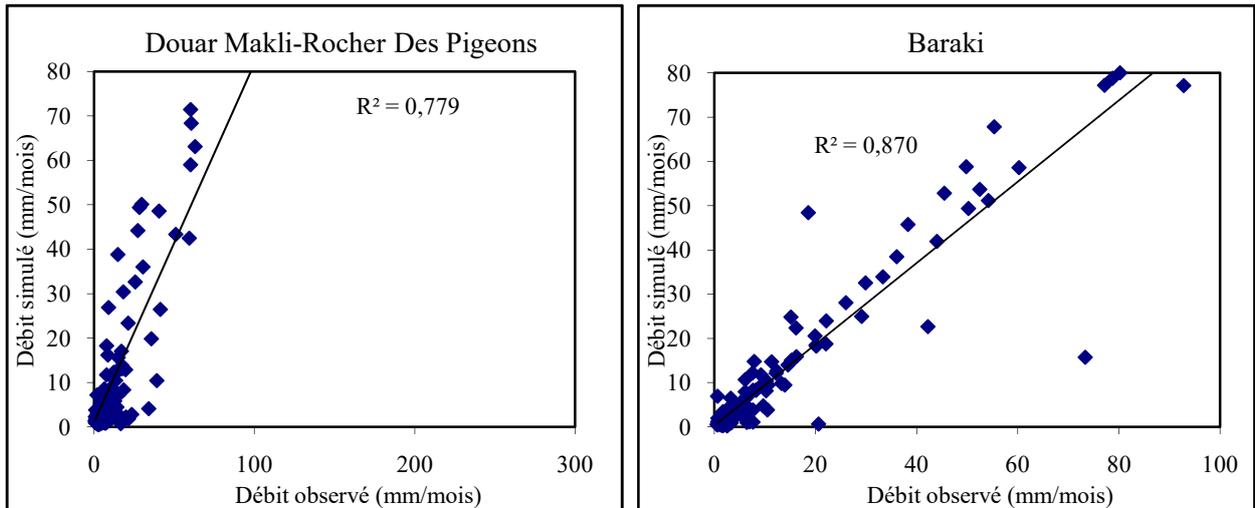
#### IV.2.2. Validation du modèle GR2M

Pour la validation, nous utilisons des séries des données correspondant à la période de Jan-1991 à Déc-2000 pour la station Douar Makli – Rocher Des Pigeons, et de Jan-1997 à Déc-2007 pour la station Baraki.

Le tableau 26, résume les résultats de la validation du modèle GR2M, les coefficients de corrélations (débits simulés /débits observés) sont exprimés pour chaque station.

Tableau 26: Les variations de coefficients de corrélation de la validation du modèle GR2M.

	Douar Makli-Rocher Des Pigeons	Baraki
Coefficient de détermination ( $R^2$ )	0.779	0.87
Coefficient de corrélation (R)	0.882	0.93



**Figure 47: Validation du modèle GR2M pour les deux stations.**

Selon les valeurs de coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulé (Tableau 26), la validation du GR2M donne de bons résultats

## Annexes I

	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dec</i>	<i>Janv</i>	<i>Fev</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil</i>	<i>Aout</i>	<i>Ann</i>
<b>1972</b>	19,5	14,6	7,3	70,2	135,7	218,9	121,7	65,5	29,6	13,3	7,11	4,97	708,4
<b>1973</b>	9,38	5,87	5,8	26,3	18	29,9	296,6	131,3	35,2	13,02	7,89	4,7	584
<b>1974</b>	4,25	11,8	32	16,7	12,8	25,3	43,5	25,6	16,6	9,79	3,6	2,9	204,8
<b>1975</b>	2,93	3,3	33	28,9	21,4	130	62,8	27,8	20,6	11,3	5,7	3,97	351,7
<b>1976</b>	3,97	5,49	8,79	31	22,6	15,1	10,49	14,8	10,7	5,33	3,58	3,01	134,9
<b>1977</b>	2,81	3,09	3,27	2,8	7,29	10	22,3	53,4	19,4	7,86	2,21	1,36	135,8
<b>1978</b>	2,26	11,6	8,3	6,39	6,52	24,4	74,72	20,6	14	7,5	5,82	3,79	185,9
<b>1979</b>	7,32	6,8	24,5	18,7	65	22,5	68,76	32,6	46,3	21	12,5	7,34	333,3
<b>1980</b>	<b>1,349</b>	<b>2,499</b>	<b>12,98</b>	<b>74,36</b>	<b>13,36</b>	<b>30,55</b>	<b>44,03</b>	<b>33,85</b>	<b>18,05</b>	<b>8,723</b>	<b>5,217</b>	<b>4,042</b>	<b>249</b>
<b>1981</b>	6,52	4,5	3,55	13,3	26	36	23,8	10,5	12,2	6,7	3,35	3,17	149,6
<b>1982</b>	4,1	8,45	23,8	48,4	26	13,7	13,2	9,85	6,13	3,7	2,65	2,5	162,5
<b>1983</b>	1,62	1,46	1,44	4,92	14,7	38,86	21	20	20,5	9,97	6,498	6,13	147,1
<b>1984</b>	3,73	14,8	7,47	17,5	40	31,7	112,7	37	34,2	17,8	13,5	7,99	338,4
<b>1985</b>	6,05	7	9,5	15,29	18	49	99	26	18	9,05	6,29	4,35	267,5
<b>1986</b>	3,81	5,2	8,48	66	44	219	49	23	10	7,89	4,6	2,08	443,1
<b>1987</b>	1,44	4,2	15	4,87	5,6	4,9	19	4	6,2	3,76	2,3	1,8	73,07
<b>1988</b>	4,66	4	3,9	172	13,3	7,27	20,6	21,2	13,3	4,4	1,31	3,24	269,2
<b>1989</b>	3,1	3,63	3,4	3,27	4,6	3,09	4,38	5,18	46	21	17,6	3,97	119,2
<b>1990</b>	3,45	4,38	5,9	29,6	21,7	97,4	99,8	32,07	13,15	3,32	2,78	2,707	316,3
<b>1991</b>	1,59	35,8	9,644	6,31	243,3	18,33	28,28	117,4	61,9	11,9	4,56	2,01	541
<b>1992</b>	0,67	1,13	13,4	14,8	12,9	8,63	12,79	9,1	12,5	4,02	3,63	5,13	98,7
<b>1993</b>	5,07	6,85	7,813	8,69	75,2	29,7	19,75	7,86	1,85	0,979	0,825	1,31	165,9
<b>1994</b>	<b>2,339</b>	<b>13,13</b>	<b>6,559</b>	<b>15,09</b>	<b>92,99</b>	<b>28,85</b>	<b>122,4</b>	<b>18,45</b>	<b>12,6</b>	<b>12,69</b>	<b>5,217</b>	<b>4,137</b>	<b>222,70</b>
<b>1995</b>	<b>3,104</b>	<b>3,921</b>	<b>6,518</b>	<b>2,077</b>	<b>41,4</b>	<b>110,8</b>	<b>9,094</b>	<b>78,79</b>	<b>21,28</b>	<b>11,73</b>	<b>5,792</b>	<b>4,383</b>	<b>250,74</b>
<b>1996</b>	<b>7,142</b>	<b>4,971</b>	<b>1,711</b>	<b>-2,15</b>	<b>8,039</b>	<b>2,613</b>	<b>0</b>	<b>38,1</b>	<b>16,65</b>	<b>8,49</b>	<b>5,6</b>	<b>4,1</b>	<b>47,66</b>
<b>1997</b>	<b>4,825</b>	<b>8,789</b>	<b>17,54</b>	<b>25,72</b>	<b>16,66</b>	<b>21,4</b>	<b>34,05</b>	<b>39,08</b>	<b>50,86</b>	<b>7,906</b>	<b>5,217</b>	<b>4,141</b>	<b>214,42</b>
<b>1998</b>	<b>3,351</b>	<b>3,908</b>	<b>18,36</b>	<b>15,12</b>	<b>63,65</b>	<b>60,18</b>	<b>59,45</b>	<b>17,47</b>	<b>12,84</b>	<b>9,54</b>	<b>5,217</b>	<b>4,355</b>	<b>191,41</b>
<b>1999</b>	<b>3,655</b>	<b>2,742</b>	<b>13,45</b>	<b>56,73</b>	<b>6,464</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>23,49</b>	<b>19,9</b>	<b>7,994</b>	<b>5,792</b>	<b>4,385</b>	<b>94,16</b>

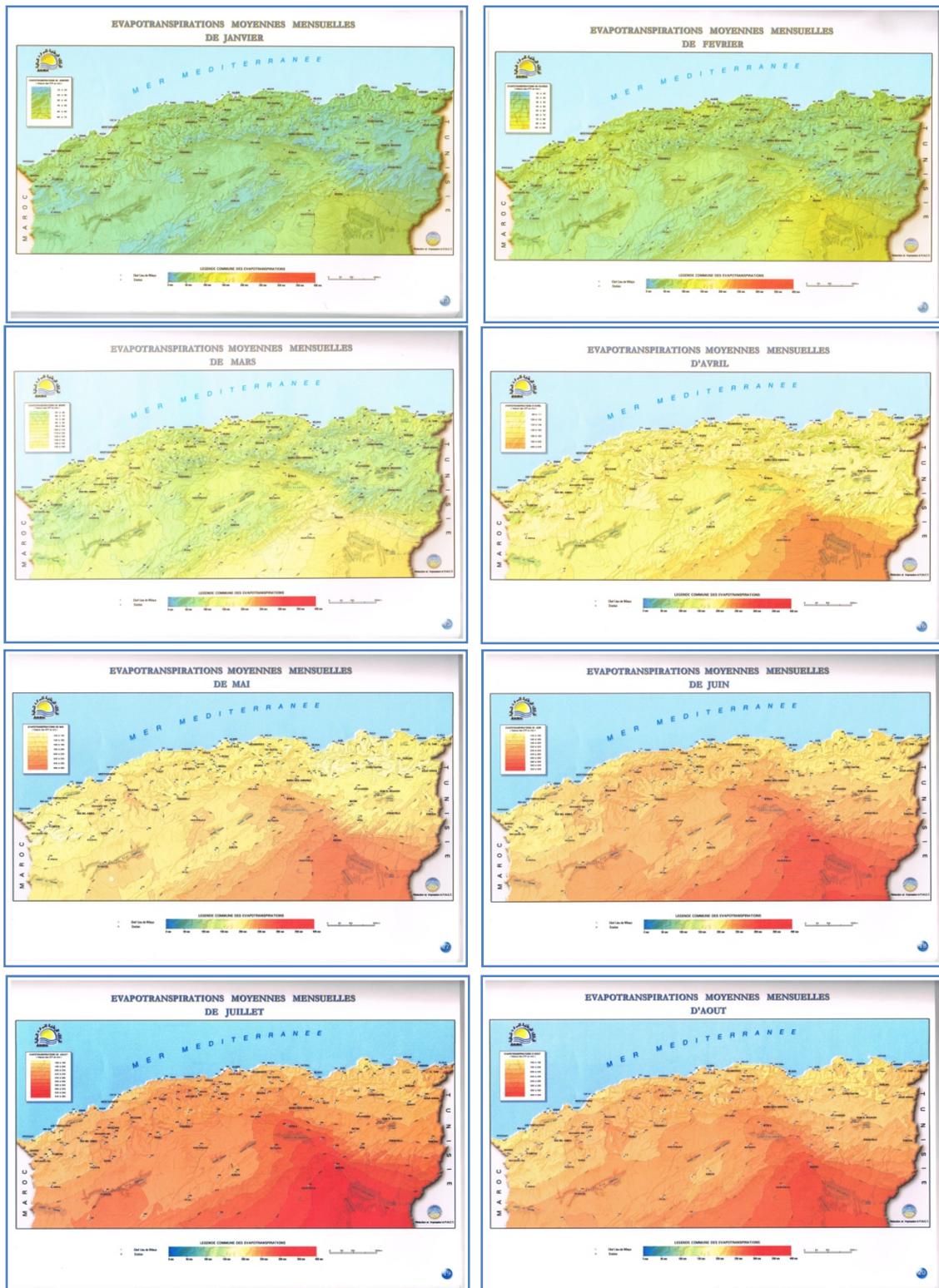
## Annexes I

<b>2000</b>	<b>1,687</b>	<b>4,753</b>	<b>11,12</b>	<b>7,492</b>	<b>63,06</b>	<b>27,23</b>	<b>0</b>	<b>25,63</b>	<b>16,27</b>	<b>7,906</b>	<b>5,217</b>	<b>4,367</b>	<b>80,62</b>
<b>2001</b>	<b>2,913</b>	<b>1,282</b>	<b>7,846</b>	<b>12,28</b>	<b>16,94</b>	<b>0</b>	<b>29,95</b>	<b>24,31</b>	<b>17,49</b>	<b>8,052</b>	<b>6,75</b>	<b>3,565</b>	<b>131,4</b>
<b>2002</b>	<b>4,746</b>	<b>5,535</b>	<b>22,98</b>	<b>50,48</b>	<b>80,94</b>	<b>86,7</b>	<b>0</b>	<b>47,92</b>	<b>21,59</b>	<b>12,51</b>	<b>5,504</b>	<b>4,34</b>	<b>343,2</b>
<b>2003</b>	3,4	3,66	8,66	19,3	34,2	14,1	30,66	12,06	32,12	16,37	7,34	6,11	188
<b>2004</b>	5,64	5,77	11,39	21,1	15,57	67,19	66,78	11,88	7,19	7,91	6,52	4,56	231,5
<b>2005</b>	2,55	2,91	2,39	9,541	19,6	54,77	36,5	8,6	38,06	6,67	4,33	3,99	189,9
<b>2006</b>	3,48	2,08	2,26	12,19	5,9	8,2	162,7	92,2	33,41	11,06	6,188	4,53	344,2
<b>2007</b>	9,85	31,02	52,2	11,1	13,2	6,57	16,4	16	10,4	6,111	3,55	2,68	179,1
<b>2008</b>	3,09	3,55	10,77	50,9	95,5	33,3	34,6	22,6	17,6	9,74	8,45	8,5	298,6
<b>2009</b>	9,51	8,89	30,5	33,08	49,48	58,7	59,2	15,1	15,88	6,988	3,79	3,37	294,5
<b>2010</b>	2,03	2,604	9,05	15,05	17	108,3	56,6	38,4	105,9	28,6	10,08	4,822	398,4
<b>2011</b>	3,45	4,22	9,46	14,1	10,1	91,7	124	113,8	24,49	7,96	4,46	3,73	411,5
<b>2012</b>	4,203	4,332	7,73	5,95	38,6	48,1	51,68	20,86	35,25	19,8	11,78	12,1	260,4

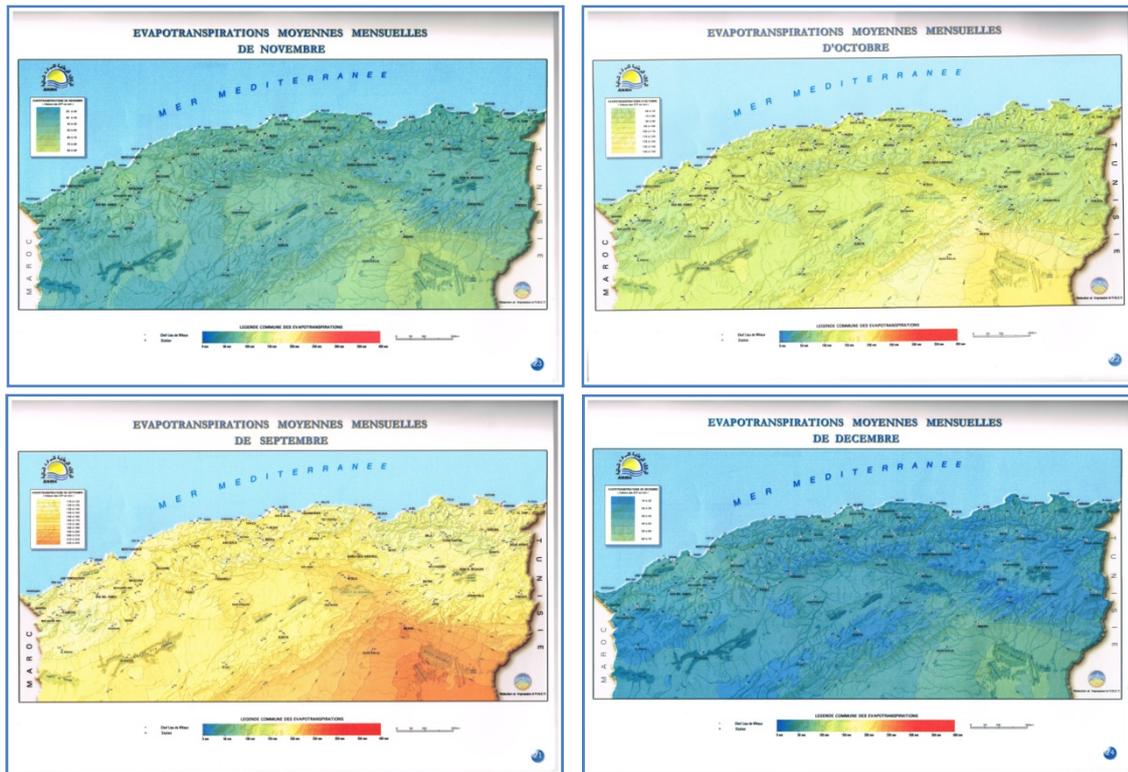
## Annexes II

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80

# Annexes III



## Annexes III



	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	An
Douar Makli	130	93	45	35	40	50	90	120	150	170	190	180	1293
Baraki	136	85	54	43	46	60	95	125	154	177	196	182	1353

## GR1A Douar Makli – Rocher Des Pigeons

## Calage

Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé
1973	982,1	1293	583,962	495,96
1974	709,7	1293	204,84	283,32
1975	974,4	1293	469,05	435,08
1976	612,6	1293	200,86	222,81
1977	679	1293	226	224,09
1978	666,2	1293	218,87	223,94
1979	950,5	1293	333,5	412,05
1980	622,5	1293	249,00431	226,34
1981	672,8	1293	149,59	221,53
1982	512,8	1293	162,48	139,69
1983	567,2	1293	147,098	151,07
1984	883,6	1293	338,39	351,57
1985	642,9	1293	267,53	231,79
1986	741,7	1293	443,06	537,60
1987	513,7	1293	150	146,57
1988	646,6	1293	210	193,95
1989	418,4	1293	119,22	94,64
1990	558,6	1293	150	136,85

## Validation

Année	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé
1991	827,9	1293	450	383,91
1992	590,1	1293	200	195,53
1993	557,6	1293	165,897	154,12
1994	687,3	1293	335	222,70
1995	708,8	1293	340	250,74
1996	274,8	1293	95,2625354	47,66
1997	732	1293	236,188771	214,42
1998	600	1293	273,439142	191,41
1999	426,4	1293	144,6	94,16
2000	428,4	1293	174,724399	80,62

## GR2M Douar Makli – Rocher Des Pigeons

## Calage

Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé
Janv-73	2,4	40	18	16,00
Févr-73	157,2	50	45,17	22,73
Mars-73	317,2	90	246,6	54,00
Avr-73	108,1	120	70,49	80,00
Mai-73	18,2	150	35,2	107,14
Juin-73	5,4	170	7,022	125,65
Juil-73	0,4	190	4,89	144,40
Août-73	0	180	2,7	135,00
Sept-73	114,2	130	6,38	88,95
Oct-73	31,5	93	5,87	56,53
Nov-73	17,6	45	5,8	19,29
Déc-73	209,9	35	26,3	12,89
Janv-74	31,8	40	12,8	16,00
Févr-74	47,4	50	25,3	22,73
Mars-74	112,4	90	43,5	54,00
Avr-74	56,4	120	25,6	80,00
Mai-74	65,3	150	16,6	107,14
Juin-74	28	170	9,79	125,65
Juil-74	0	190	3,6	144,40
Août-74	0	180	2,9	135,00
Sept-74	21,2	130	4,25	88,95
Oct-74	216,5	93	11,8	56,53
Nov-74	128,6	45	32	19,29
Déc-74	2,1	35	16,7	12,89
Janv-75	82,7	40	21,4	16,00
Févr-75	237,6	50	130	22,73
Mars-75	84,9	90	62,8	54,00
Avr-75	56,2	120	27,8	80,00
Mai-75	87,3	150	20,6	107,14
Juin-75	22,5	170	11,3	125,65
Juil-75	18,6	190	5,7	144,40
Août-75	0	180	3,97	135,00
Sept-75	33,4	130	2,93	88,95
Oct-75	18,8	93	3,3	56,53
Nov-75	277,2	45	33	19,29
Déc-75	55,2	35	28,9	12,89
Janv-76	48,9	40	22,6	16,00

## Annexes IV

Févr-76	9,9	50	15,1	22,73
Mars-76	50,6	90	10,49	54,00
Avr-76	89,1	120	14,8	80,00
Mai-76	51,9	150	10,7	107,14
Juin-76	3,2	170	5,33	125,65
Juil-76	0,8	190	3,58	144,40
Août-76	10,5	180	3,01	135,00
Sept-76	36,8	130	3,97	88,95
Oct-76	107,1	93	5,49	56,53
Nov-76	61,5	45	8,79	19,29
Déc-76	142,3	35	31	12,89
Janv-77	121,7	40	7,29	16,00
Févr-77	25,4	50	10	22,73
Mars-77	83,8	90	22,3	54,00
Avr-77	197,2	120	53,4	80,00
Mai-77	118,7	150	19,4	107,14
Juin-77	3,5	170	7,86	125,65
Juil-77	0	190	2,21	144,40
Août-77	1,3	180	1,36	135,00
Sept-77	5,2	130	2,81	88,95
Oct-77	1,8	93	3,09	56,53
Nov-77	108,4	45	3,27	19,29
Déc-77	12	35	2,8	12,89
Janv-78	63,9	40	6,52	16,00
Févr-78	174,5	50	24,4	22,73
Mars-78	140,9	90	74,72	54,00
Avr-78	33,1	120	20,6	80,00
Mai-78	15,3	150	14	107,14
Juin-78	2,5	170	7,5	125,65
Juil-78	0	190	5,82	144,40
Août-78	0,4	180	3,79	135,00
Sept-78	12,6	130	2,26	88,95
Oct-78	142	93	11,6	56,53
Nov-78	53,5	45	8,3	19,29
Déc-78	27,5	35	6,39	12,89
Janv-79	150	40	65	16,00
Févr-79	73,7	50	22,5	22,73
Mars-79	85,1	90	37,99	54,00
Avr-79	174,6	120	32,6	80,00
Mai-79	44,8	150	46,3	107,14
Juin-79	0,2	170	21	125,65
Juil-79	0	190	12,5	144,40

## Annexes IV

Août-79	0,7	180	7,34	135,00
Sept-79	101,7	130	7,32	88,95
Oct-79	69,1	93	6,8	56,53
Nov-79	154,5	45	24,5	19,29
Déc-79	96,1	35	18,7	12,89
Janv-80	28,3	40	18,35	16,00
Févr-80	64,3	50	24,36	22,73
Mars-80	62,8	90	24,33	54,00
Avr-80	71,5	120	20,84	80,00
Mai-80	25,8	150	8,01	107,14
Juin-80	2,8	170	4,72	125,65
Juil-80	0	190	3,21	144,40
Août-80	19,4	180	1,07	135,00
Sept-80	0,7	130	1,24	88,95
Oct-80	19,2	93	1,49	56,53
Nov-80	86,3	45	2,19	19,29
Déc-80	241,4	35	89,74	12,89
Janv-81	188,9	40	143,14	16,00
Févr-81	169,7	50	127,3	22,73
Mars-81	48,5	90	23,8	54,00
Avr-81	25,2	120	10,5	80,00
Mai-81	93,2	150	12,2	107,14
Juin-81	1,2	170	6,7	125,65
Juil-81	0,3	190	3,35	144,40
Août-81	0,1	180	3,17	135,00
Sept-81	6,2	130	6,52	88,95
Oct-81	49,7	93	4,5	56,53
Nov-81	8,3	45	3,55	19,29
Déc-81	81,5	35	13,3	12,89
Janv-82	0,3	40	26	16,00
Févr-82	55,9	50	13,7	22,73
Mars-82	61	90	13,2	54,00
Avr-82	1,2	120	9,85	80,00
Mai-82	5,7	150	6,13	107,14
Juin-82	0	170	3,7	125,65
Juil-82	5	190	2,65	144,40
Août-82	4	180	2,5	135,00
Sept-82	45,7	130	4,1	88,95
Oct-82	93,2	93	8,45	56,53
Nov-82	157,4	45	23,8	19,29
Déc-82	83,4	35	48,4	12,89
Janv-83	113,5	40	14,7	16,00

## Annexes IV

Févr-83	109,5	50	38,86	22,73
Mars-83	35,6	90	21	54,00
Avr-83	73,1	120	20	80,00
Mai-83	99,5	150	20,5	107,14
Juin-83	10	170	9,97	125,65
Juil-83	0	190	6,498	144,40
Août-83	0	180	6,13	135,00
Sept-83	0	130	1,62	88,95
Oct-83	18,8	93	1,46	56,53
Nov-83	37,7	45	1,44	19,29
Déc-83	69,5	35	4,92	12,89
Janv-84	88,3	40	40	16,00
Févr-84	52,7	50	31,7	22,73
Mars-84	185,3	90	112,7	54,00
Avr-84	38,4	120	37	80,00
Mai-84	153,1	150	34,2	107,14
Juin-84	1,4	170	17,8	125,65
Juil-84	0,3	190	13,5	144,40
Août-84	0	180	7,99	135,00
Sept-84	16,2	130	3,73	88,95
Oct-84	194,8	93	14,8	56,53
Nov-84	26,4	45	7,47	19,29
Déc-84	126,7	35	17,5	12,89
Janv-85	77	40	18	16,00
Févr-85	61,1	50	49	22,73
Mars-85	199,8	90	99	54,00
Avr-85	24,5	120	26	80,00
Mai-85	2,1	150	18	107,14
Juin-85	19,8	170	9,05	125,65
Juil-85	36,8	190	6,29	144,40
Août-85	0	180	4,35	135,00
Sept-85	37,3	130	6,05	88,95
Oct-85	38,6	93	7	56,53
Nov-85	88,6	45	9,5	19,29
Déc-85	57,3	35	15,29	12,89
Janv-86	108,1	40	44	16,00
Févr-86	173,7	50	219	22,73
Mars-86	49,3	90	49	54,00
Avr-86	0	120	23	80,00
Mai-86	14,8	150	10	107,14
Juin-86	18,2	170	7,89	125,65
Juil-86	0	190	4,6	144,40

## Annexes IV

Août-86	1,1	180	2,08	135,00
Sept-86	70,2	130	3,81	88,95
Oct-86	21,3	93	5,2	56,53
Nov-86	82,8	45	8,48	19,29
Déc-86	202,2	35	66	12,89
Janv-87	37,5	40	5,6	16,00
Févr-87	59,4	50	4,9	22,73
Mars-87	74	90	19	54,00
Avr-87	40,5	120	4	80,00
Mai-87	45,4	150	6,2	107,14
Juin-87	11,9	170	3,76	125,65
Juil-87	0	190	2,3	144,40
Août-87	0	180	1,8	135,00
Sept-87	33	130	1,44	88,95
Oct-87	47	93	4,2	56,53
Nov-87	130,3	45	15	19,29
Déc-87	34,7	35	4,87	12,89
Janv-88	12,4	40	13,3	16,00
Févr-88	20,8	50	7,27	22,73
Mars-88	48,5	90	20,6	54,00
Avr-88	130,2	120	21,2	80,00
Mai-88	18	150	13,3	107,14
Juin-88	18,9	170	4,4	125,65
Juil-88	2,2	190	1,31	144,40
Août-88	0	180	3,24	135,00
Sept-88	71,5	130	4,66	88,95
Oct-88	10,9	93	4	56,53
Nov-88	36	45	3,9	19,29
Déc-88	277,2	35	172	12,89
Janv-89	51,1	40	4,6	16,00
Févr-89	0	50	3,09	22,73
Mars-89	66,1	90	4,38	54,00
Avr-89	53,9	120	5,18	80,00
Mai-89	135,4	150	46	107,14
Juin-89	2,1	170	21	125,65
Juil-89	30,1	190	17,6	144,40
Août-89	0	180	3,97	135,00
Sept-89	6,2	130	3,1	88,95
Oct-89	18,2	93	3,63	56,53
Nov-89	47,9	45	3,4	19,29
Déc-89	7,4	35	3,27	12,89
Janv-90	96,2	40	21,7	16,00

## Annexes IV

Févr-90	127,4	50	97,4	22,73
Mars-90	95,4	90	99,8	54,00
Avr-90	23,8	120	32,07	80,00
Mai-90	33	150	13,15	107,14
Juin-90	0,6	170	3,32	125,65
Juil-90	0	190	2,78	144,40
Août-90	0	180	2,707	135,00
Sept-90	0,8	130	3,45	88,95
Oct-90	44,6	93	4,38	56,53
Nov-90	30,5	45	1,9	19,29
Déc-90	106,3	35	9,26	12,89

### Validation

Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé
Janv-91	213,7	40	243,3	16,00
Févr-91	27,2	50	18,33	22,73
Mars-91	117,3	90	28,28	54,00
Avr-91	141,8	120	60,2	80,00
Mai-91	105,4	150	30,5	107,14
Juin-91	20,5	170	11,9	125,65
Juil-91	3,7	190	4,56	144,40
Août-91	0	180	2,01	135,00
Sept-91	4,9	130	1,59	88,95
Oct-91	179,1	93	35,8	56,53
Nov-91	9,7	45	9,644	19,29
Déc-91	4,6	35	6,31	12,89
Janv-92	36,6	40	12,9	16,00
Févr-92	50	50	8,63	22,73
Mars-92	24,4	90	12,79	54,00
Avr-92	82,4	120	9,1	80,00
Mai-92	89,5	150	12,5	107,14
Juin-92	0	170	4,02	125,65
Juil-92	0,2	190	3,63	144,40
Août-92	0	180	5,13	135,00
Sept-92	9,5	130	0,67	88,95
Oct-92	72,4	93	1,13	56,53
Nov-92	111,3	45	13,4	19,29
Déc-92	113,8	35	14,8	12,89
Janv-93	152,7	40	75,2	16,00
Févr-93	73,5	50	29,7	22,73

## Annexes IV

Mars-93	0,3	90	19,75	54,00
Avr-93	96,6	120	7,86	80,00
Mai-93	0,4	150	1,85	107,14
Juin-93	0	170	0,979	125,65
Juil-93	0,1	190	0,825	144,40
Août-93	0	180	1,31	135,00
Sept-93	19,9	130	5,07	88,95
Oct-93	28,6	93	6,85	56,53
Nov-93	107	45	7,813	19,29
Déc-93	78,5	35	8,69	12,89
Janv-94	230,5	40	92,9865172	16,00
Févr-94	61,8	50	40,58	22,73
Mars-94	133,5	90	60,5	54,00
Avr-94	16,8	120	17,04	80,00
Mai-94	1,3	150	5,8	107,14
Juin-94	16,4	170	12,6892344	125,65
Juil-94	0	190	5,21683682	144,40
Août-94	14	180	4,13743556	135,00
Sept-94	9,5	130	2,33919144	88,95
Oct-94	102,2	93	13,132081	56,53
Nov-94	39,4	45	6,55862783	19,29
Déc-94	61,9	35	15,0868775	12,89
Janv-95	99,5	40	41,3957865	16,00
Févr-95	182,7	50	100,2	22,73
Mars-95	31,3	90	9,09358339	54,00
Avr-95	231,2	120	100,2	80,00
Mai-95	40,3	150	21,2776653	107,14
Juin-95	13,1	170	11,7268327	125,65
Juil-95	2,4	190	5,7916065	144,40
Août-95	0,1	180	4,38283185	135,00
Sept-95	16,3	130	3,10396363	88,95
Oct-95	30,3	93	3,92066668	56,53
Nov-95	39,1	45	6,51754918	19,29
Déc-95	22,5	35	2,07686233	12,89
Janv-96	14,8	40	8,03903155	16,00
Févr-96	23,1	50	2,61298541	22,73
Mars-96	6,7	90	0,87	54,00
Avr-96	86,6	120	4,2	80,00
Mai-96	19,5	150	16,647887	107,14
Juin-96	2	170	8,4896632	125,65
Juil-96	1,6	190	5,6000166	144,40
Août-96	16,1	180	4,1003613	135,00

## Annexes IV

Sept-96	52,2	130	7,1415109	88,95
Oct-96	38,5	93	4,9712035	56,53
Nov-96	4	45	1,71134766	19,29
Déc-96	9,7	35	2,14	12,89
Janv-97	36,7	40	16,6637415	16,00
Févr-97	50,8	50	21,3959728	22,73
Mars-97	53,8	90	34,0488103	54,00
Avr-97	90,1	120	39,0833196	80,00
Mai-97	173,2	150	50,8592777	107,14
Juin-97	0	170	7,90638942	125,65
Juil-97	0	190	5,21683682	144,40
Août-97	13,8	180	4,14096644	135,00
Sept-97	31,6	130	4,82470104	88,95
Oct-97	68,3	93	8,78900804	56,53
Nov-97	119,6	45	17,540319	19,29
Déc-97	94,1	35	25,719428	12,89
Janv-98	156	40	63,6467505	16,00
Févr-98	108	50	60,1825027	22,73
Mars-98	76,7	90	59,4476856	54,00
Avr-98	13,3	120	17,4685159	80,00
Mai-98	2,4	150	12,841675	107,14
Juin-98	5,6	170	9,539556	125,65
Juil-98	0	190	5,21683682	144,40
Août-98	1,7	180	4,35458479	135,00
Sept-98	18,5	130	3,35138992	88,95
Oct-98	30,2	93	3,90785526	56,53
Nov-98	125,6	45	18,361892	19,29
Déc-98	62	35	15,1198979	12,89
Janv-99	10,8	40	6,46374206	16,00
Févr-99	1,5	50	3,56	22,73
Mars-99	22,6	90	4,52	54,00
Avr-99	34,7	120	23,4913909	80,00
Mai-99	34,1	150	19,8976352	107,14
Juin-99	0,3	170	7,99388049	125,65
Juil-99	2,4	190	5,7916065	144,40
Août-99	0	180	4,38459729	135,00
Sept-99	21,2	130	3,65504947	88,95
Oct-99	21,1	93	2,74201562	56,53
Nov-99	89,7	45	13,4461474	19,29
Déc-99	188	35	63,05	12,89
Janv-00	154,5	40	105,2	16,00
Févr-00	59,4	50	27,227514	22,73

## Annexes IV

Mars-00	1,3	90	12,28	54,00
Avr-00	42,3	120	11,45	80,00
Mai-00	17,8	150	14,26	107,14
Juin-00	0	170	7,90638942	125,65
Juil-00	0	190	5,21683682	144,40
Août-00	1	180	4,36694288	135,00
Sept-00	3,7	130	1,5	88,95
Oct-00	36,8	93	3,87	56,53
Nov-00	72,7	45	11,04	19,29
Déc-00	38,9	35	3,4	12,89

## GR1A Baraki

## Calage

<b>Année</b>	<b>Pluie (mm)</b>	<b>ETP (mm)</b>	<b>Débit (mm)</b>	<b>Débit simulé</b>
1979	857,9	1353	346,24	387,35
1980	629,3	1353	235,69	243,66
1981	581	1353	154,0896	190,24
1982	284,8	1353	50,23	50,43
1983	492,6	1353	100,024	107,01
1984	755,1	1353	252,31	283,33
1985	576,4	1353	152,059	200,81
1986	740,6	1353	297,4718	284,08
1987	548,2	1353	180,36	183,02
1988	541,7	1353	158,24	159,53
1989	335,6	1353	70,88	65,10
1990	463	1353	100,14	98,79
1991	585,4	1353	200,02	174,31
1992	533,3	1353	489,12	354,26
1993	512,4	1353	175,1862	142,46

## Validation

<b>Année</b>	<b>Pluie (mm)</b>	<b>ETP (mm)</b>	<b>Débit (mm)</b>	<b>Débit simulé</b>
1997	703,5	1353	300,1	237,17
1998	581,3	1353	210,23	198,32
1999	470,3	1353	128,136	126,00
2000	430,7	1353	100,22	97,29
2001	401,5	1353	90,55	81,54
2002	648,7	1353	199,85	203,91
2003	671,7	1353	262,88	247,64
2004	610,6	1353	223,14	212,33
2005	596,9	1353	187,66	197,48
2006	558,1	1353	190,01	173,73
2007	674,3	1353	229,33	238,68

## GR2M Baraki

## Calage

Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé
Janv-79	157,2	46	74,2	19,96
Févr-79	28	60	23,12	30,00
Mars-79	94,5	95	29,54	58,23
Avr-79	122,5	125	23,9	84,46
Mai-79	9,4	154	31,5	110,82
Juin-79	0,4	177	4,58	132,19
Juil-79	0	196	4,58	150,06
Août-79	4,7	182	1,36	136,88
Sept-79	80,6	136	2,35	94,37
Oct-79	114	85	5,84	49,83
Nov-79	194,3	54	60,2	25,58
Déc-79	52,3	43	30,2	17,95
Janv-80	52,1	46	22,5	19,96
Févr-80	58,2	60	19,48	30,00
Mars-80	44,8	95	11,71	58,23
Avr-80	45,6	125	12,3	84,46
Mai-80	21,8	154	5,1	110,82
Juin-80	5	177	3,34	132,19
Juil-80	0	196	3,34	150,06
Août-80	16	182	0,484	136,88
Sept-80	0,5	136	1,26	94,37
Oct-80	74,1	85	0,921	49,83
Nov-80	80,4	54	1,334	25,58
Déc-80	230,8	43	56,8	17,95
Janv-81	177,1	46	120,4	19,96
Févr-81	111,2	60	58,2	30,00
Mars-81	24	95	24,1	58,23
Avr-81	17,4	125	12,5	84,46
Mai-81	60,1	154	12,68	110,82
Juin-81	15,7	177	6,02	132,19
Juil-81	0	196	6,02	150,06
Août-81	0	182	2,905	136,88
Sept-81	2,8	136	0,8266	94,37
Oct-81	87,7	85	1,358	49,83
Nov-81	14,9	54	1,13	25,58
Déc-81	70,1	43	3,5	17,95
Janv-82	0	46	1,589	19,96

## Annexes IV

Févr-82	51,9	60	1,06	30,00
Mars-82	10,3	95	0,996	58,23
Avr-82	4,6	125	5,94	84,46
Mai-82	4	154	1,31	110,82
Juin-82	0	177	3,649	132,19
Juil-82	1,4	196	3,649	150,06
Août-82	1,5	182	0,25	136,88
Sept-82	5	136	2,24	94,37
Oct-82	4,3	85	5,39	49,83
Nov-82	112,4	54	2,28	25,58
Déc-82	89,4	43	39,7	17,95
Janv-83	115,1	46	30,57	19,96
Févr-83	71,2	60	30,24	30,00
Mars-83	55,2	95	19,5	58,23
Avr-83	26	125	13,24	84,46
Mai-83	83	154	8,59	110,82
Juin-83	15	177	5,49	132,19
Juil-83	0	196	6,49	150,06
Août-83	0	182	1,2	136,88
Sept-83	0	136	0,92	94,37
Oct-83	11,8	85	0,65	49,83
Nov-83	35,2	54	0,52	25,58
Déc-83	80,1	43	4,95	17,95
Janv-84	83,2	46	9,2	19,96
Févr-84	36	60	7,99	30,00
Mars-84	168,5	95	45,27	58,23
Avr-84	13,1	125	12,77	84,46
Mai-84	67	154	9,54	110,82
Juin-84	1	177	8,67	132,19
Juil-84	0	196	2,21	150,06
Août-84	0,2	182	0,826	136,88
Sept-84	20,6	136	0,118	94,37
Oct-84	194,9	85	22,378	49,83
Nov-84	45,8	54	14,2	25,58
Déc-84	124,8	43	17,08	17,95
Janv-85	72,5	46	29,85	19,96
Févr-85	55,3	60	23,4	30,00
Mars-85	144,6	95	50,98	58,23
Avr-85	29	125	16,26	84,46
Mai-85	1,1	154	5,46	110,82
Juin-85	10,9	177	1,83	132,19
Juil-85	44,2	196	1,83	150,06

## Annexes IV

Août-85	0	182	0,377	136,88
Sept-85	31,2	136	1,53	94,37
Oct-85	22,1	85	1,8	49,83
Nov-85	115,5	54	6,506	25,58
Déc-85	50	43	6,306	17,95
Janv-86	96,6	46	29,7	19,96
Févr-86	106,9	60	39,8	30,00
Mars-86	25,2	95	33,8	58,23
Avr-86	0	125	12,05	84,46
Mai-86	17,9	154	5,65	110,82
Juin-86	10,6	177	1,73	132,19
Juil-86	35,8	196	1,73	150,06
Août-86	0	182	0,873	136,88
Sept-86	105,7	136	0,0118	94,37
Oct-86	31,5	85	4,92	49,83
Nov-86	135,3	54	15,2	25,58
Déc-86	175,1	43	46,4	17,95
Janv-87	41,9	46	5,01	19,96
Févr-87	55,6	60	4,877	30,00
Mars-87	50,2	95	12,6	58,23
Avr-87	26,4	125	5	84,46
Mai-87	20	154	4,54	110,82
Juin-87	32,2	177	2,05	132,19
Juil-87	0	196	2,05	150,06
Août-87	0	182	0,673	136,88
Sept-87	80,8	136	0,897	94,37
Oct-87	70,9	85	1,79	49,83
Nov-87	108,9	54	6,09	25,58
Déc-87	61,3	43	4,64	17,95
Janv-88	32,2	46	8,19	19,96
Févr-88	23,4	60	4,66	30,00
Mars-88	24,9	95	6,63	58,23
Avr-88	125,1	125	12,4	84,46
Mai-88	2,9	154	4,74	110,82
Juin-88	2,9	177	2,196	132,19
Juil-88	2,1	196	2,196	150,06
Août-88	29	182	0,85	136,88
Sept-88	35	136	1,51	94,37
Oct-88	16	85	1,1218	49,83
Nov-88	56,5	54	2,42	25,58
Déc-88	191,7	43	38,1	17,95
Janv-89	65,6	46	30,58	19,96

## Annexes IV

Févr-89	0	60	7,58	30,00
Mars-89	50,8	95	3,63	58,23
Avr-89	63,3	125	7,03	84,46
Mai-89	45,9	154	12,74	110,82
Juin-89	6	177	1,204	132,19
Juil-89	20,5	196	1,204	150,06
Août-89	0	182	1,216	136,88
Sept-89	26,5	136	1,01	94,37
Oct-89	13,6	85	1,41	49,83
Nov-89	20,6	54	1,724	25,58
Déc-89	22,8	43	2,1	17,95
Janv-90	51,9	46	1,11	19,96
Févr-90	111,1	60	20,12	30,00
Mars-90	39	95	12,4	58,23
Avr-90	37,6	125	8,4	84,46
Mai-90	18,6	154	3,1	110,82
Juin-90	6,7	177	2,26	132,19
Juil-90	0	196	2,26	150,06
Août-90	0	182	1,239	136,88
Sept-90	6,1	136	0,991	94,37
Oct-90	37,3	85	0,932	49,83
Nov-90	48,5	54	1,02	25,58
Déc-90	106,2	43	17,1	17,95
Janv-91	156,4	46	70,2	19,96
Févr-91	33	60	18,2	30,00
Mars-91	58,1	95	19,8	58,23
Avr-91	75,1	125	15,4	84,46
Mai-91	56,8	154	10,5	110,82
Juin-91	22,4	177	4,333	132,19
Juil-91	2,3	196	4,333	150,06
Août-91	0	182	1,228	136,88
Sept-91	2,3	136	1,09	94,37
Oct-91	108,5	85	13,108	49,83
Nov-91	52,4	54	4,34	25,58
Déc-91	18,1	43	4,85	17,95
Janv-92	23,8	46	9,506	19,96
Févr-92	60,7	60	3,62	30,00
Mars-92	31	95	6,63	58,23
Avr-92	66,8	125	4,08	84,46
Mai-92	47,9	154	12,7	110,82
Juin-92	0	177	1,417	132,19
Juil-92	2,7	196	1,417	150,06

## Annexes IV

Août-92	1,4	182	1,287	136,88
Sept-92	4,9	136	1,003	94,37
Oct-92	78,9	85	2,4208	49,83
Nov-92	133,1	54	14,548	25,58
Déc-92	82,1	43	11,46	17,95
Janv-93	116,2	46	109,1	19,96
Févr-93	46,7	60	29,87	30,00
Mars-93	1,1	95	6,2352	58,23
Avr-93	65,1	125	4,35	84,46
Mai-93	5,5	154	1,39	110,82
Juin-93	0	177	1,239	132,19
Juil-93	0	196	1,239	150,06
Août-93	0	182	1,133	136,88
Sept-93	28,3	136	1,23	94,37
Oct-93	39,3	85	1,78	49,83
nov-93	102,8	54	3,93	25,58
déc-93	107,4	43	13,69	17,95

### Validation

Mois	Pluie (mm)	ETP (mm)	Débit (mm)	Débit simulé
Janv-97	27,9	46	7,88	19,96
Févr-97	45,1	60	7,53	30,00
Mars-97	50,1	95	10,3	58,23
Avr-97	67,1	125	13,3	84,46
Mai-97	150,2	154	29,09	110,82
Juin-97	0	177	6,06	132,19
Juil-97	0	196	6,06	150,06
Août-97	2	182	1,16	136,88
Sept-97	48,6	136	6,38	94,37
Oct-97	41,9	85	6,97	49,83
Nov-97	185,5	54	15,1	25,58
Déc-97	85,1	43	29,9	17,95
Janv-98	116,8	46	45,5	19,96
Févr-98	145,7	60	92,8	30,00
Mars-98	83,2	95	44,01	58,23
Avr-98	10,4	125	9,24	84,46
Mai-98	0	154	3,38	110,82
Juin-98	5,7	177	1,66	132,19
Juil-98	0	196	1,66	150,06
Août-98	1,5	182	1,11	136,88
Sept-98	10,5	136	1,92	94,37
Oct-98	29,2	85	1,74	49,83

## Annexes IV

Nov-98	116,1	54	10,5	25,58
Déc-98	62,2	43	10,25	17,95
Janv-99	9,2	46	9,65	19,96
Févr-99	2,7	60	3,57	30,00
Mars-99	15,1	95	2,51	58,23
Avr-99	21	125	2,04	84,46
Mai-99	24,3	154	1,818	110,82
Juin-99	0	177	20,6	132,19
Juil-99	0	196	1,25	150,06
Août-99	0	182	1,818	136,88
Sept-99	44,9	136	1,59	94,37
Oct-99	14,7	85	2,56	49,83
Nov-99	163	54	6,08	25,58
Déc-99	175,4	43	55,3	17,95
Janv-00	135,4	46	80,2	19,96
Févr-00	93,1	60	52,45	30,00
Mars-00	1,9	95	12,33	58,23
Avr-00	31,9	125	0,59	84,46
Mai-00	10,8	154	1,678	110,82
Juin-00	0,7	177	0,673	132,19
Juil-00	0	196	0,673	150,06
Août-00	0,5	182	0,66	136,88
Sept-00	13,3	136	2,57	94,37
Oct-00	33,7	85	2,4	49,83
Nov-00	68,1	54	6,44	25,58
Déc-00	41,3	43	2,22	17,95
Janv-01	28,1	46	6,09	19,96
Févr-01	22,8	60	3,28	30,00
Mars-01	33,9	95	6,63	58,23
Avr-01	64,3	125	3,23	84,46
Mai-01	7,5	154	1,13	110,82
Juin-01	0,8	177	1,25	132,19
Juil-01	1,8	196	1,25	150,06
Août-01	24,4	182	1,13	136,88
Sept-01	65,4	136	1,7	94,37
Oct-01	45,3	85	1,145	49,83
Nov-01	53	54	7,026	25,58
Déc-01	54,2	43	3,247	17,95
Janv-02	182,7	46	50,25	19,96
Févr-02	102,3	60	54,21	30,00
Mars-02	20,1	95	16,2	58,23
Avr-02	78,8	125	15,21	84,46
Mai-02	13	154	5,88	110,82
Juin-02	0	177	2,2	132,19
Juil-02	8,2	196	3,74	150,06

## Annexes IV

Août-02	2,9	182	1,66	136,88
Sept-02	7,4	136	0,65	94,37
Oct-02	24	85	0,77	49,83
Nov-02	93,4	54	1,469	25,58
Déc-02	115,9	43	73,32	17,95
Janv-03	109,3	46	36,07	19,96
Févr-03	39,8	60	19,87	30,00
Mars-03	84,5	95	22,13	58,23
Avr-03	57,7	125	11,3	84,46
Mai-03	115,5	154	22,03	110,82
Juin-03	38,1	177	7,62	132,19
Juil-03	0	196	7,62	150,06
Août-03	0	182	1,23	136,88
Sept-03	25,4	136	2,44	94,37
Oct-03	37,4	85	2,43	49,83
Nov-03	48,2	54	7,61	25,58
Déc-03	115,8	43	13,9	17,95
Janv-04	86,3	46	16,14	19,96
Févr-04	119,7	60	38,28	30,00
Mars-04	49,8	95	42,25	58,23
Avr-04	24	125	10,64	84,46
Mai-04	1,9	154	3,48	110,82
Juin-04	0	177	2,007	132,19
Juil-04	0,4	196	2,007	150,06
Août-04	1,5	182	1,59	136,88
Sept-04	2,3	136	1,169	94,37
Oct-04	33,6	85	1,7	49,83
Nov-04	125	54	6,27	25,58
Déc-04	166,1	43	18,56	17,95
Janv-05	141,2	46	77,12	19,96
Févr-05	103,2	60	49,78	30,00
Mars-05	25,3	95	20,14	58,23
Avr-05	2,6	125	6,44	84,46
Mai-05	55	154	4,4	110,82
Juin-05	0	177	2,9	132,19
Juil-05	0	196	1,936	150,06
Août-05	13,8	182	1,59	136,88
Sept-05	0,9	136	1,7	94,37
Oct-05	53,9	85	2,83	49,83
Nov-05	123,7	54	3,24	25,58
Déc-05	77,3	43	15,24	17,95
Janv-06	22,2	46	9,2	19,96
Févr-06	60,9	60	12,21	30,00
Mars-06	130,8	95	33,35	58,23
Avr-06	59,3	125	20,1	84,46

## Annexes IV

Mai-06	2,8	154	6,23	110,82
Juin-06	10,5	177	3,743	132,19
Juil-06	0	196	1,54	150,06
Août-06	12,6	182	1,71	136,88
Sept-06	24,4	136	0,86	94,37
Oct-06	4,1	85	0,6	49,83
Nov-06	24,8	54	0,55	25,58
Déc-06	205,7	43	25,99	17,95
Janv-07	21,3	46	14,57	19,96
Févr-07	21,8	60	8,23	30,00
Mars-07	52,4	95	8,17	58,23
Avr-07	19,3	125	5,42	84,46
Mai-07	55,9	154	4,58	110,82
Juin-07	2,6	177	2,54	132,19
Juil-07	11,6	196	1,25	150,06
Août-07	0	182	3,306	136,88
Sept-07	26,4	136	0,68	94,37
Oct-07	115,6	85	3,044	49,83
Nov-07	247,1	54	78,75	25,58
Déc-07	100,3	43	60,2	17,95

[1] **Laborde L.P. 2003.** Eléments d'hydrologie de surface. Université de Nice Sophia Antipolis. Laboratoire d'analyse spatiale. Nice.

[2] **MUSY, A. and HIGY, C., 2004.** Hydrologie : Tome 1, Une science de la nature. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 314 p.

[3] **(Andry 1998),** Pourquoi les rivières débordent-elles ? "Les Petites Pommes du Savoir". Editions Le Pommier, 63 p.

[4] **Coulibaly et al. (1999)** Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. Journal of Hydrology, 230, 244-257.

[5] **YANG, X. 1993.** Mise en point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie – débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel ; Thèse de Doctorat spécialité science et technique de l'environnement, 22 p

[6] **MOULIN, L. 2007.** Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux : Application aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques; Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (Agro ParisTech), 18- 19 p

[7] **Chérifi. S, 2001.** Application de modèle GR2M sur le bassin de la Soummam et de l'Isser, thèse de Magister, ENP, Alger.

[8] **Assaba, 2004.** La connaissance des pluies mensuelles au service de la modélisation hydrologique des apports mensuels en eau de surface : application à l'Algérie du Nord, au sud de la France et a la corse. Thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis.

[9] **Kauark-Leite, L.A. et Nascimento, N.O. (1993).** Développement, utilisation et incertitudes des modèles conceptuels en hydrologie. Séminaire Eaux - Environnement n° 3, Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosystèmes, Paris, 191-219.

[10] **Michel, C. (1989).** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.

- [11] **Refsgaard, J.C. et Abbott, M.B. (1996).** The role of distributed hydrological modelling in water resources management - Chapter 1. In: Distributed Hydrological modelling, M. B. Abbott et J. C. Refsgaard (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-16.
- [12] **(Stoker, Issacson et Troesch, 1996),** numerical solution of flood protection and river regulation problems (Ohio-mississippi floods), Institute of mathematical science, New York univ.
- [13] **Clarke, R.T. (1973).** A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, **19**, 1-20.
- [14] **Ambroise, B. (1998).** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. \*H\*G\*A\* (Ed.), Bucarest, 200 p.
- [15] **Perrin, C. et Littlewood, I.G. (2000).** A comparative assessment of two rainfall-runoff modelling approaches: GR4J and IHACRES, Proceedings of the Liblice Conference (22-24 September 1998), V. Elias and I.G. Littlewood (Eds.), IHP-V, Technical Documents in Hydrology n° 37, UNESCO, Paris, 191-201.
- [16] **Salas, J.D. (1993).** Analysis and modeling of hydrologic time series. Chapter 19. In: Handbook of Hydrology, D. R. Maidment (Ed.), McGraw Hill, 1412 p.
- [17] **Weeks, W.D. et Boughton, W.C. (1987).** Tests of ARMA model forms for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, **91**, 29-47
- [18] **Rodriguez, J.Y., Sempere-Torres, D. et Obled, C. (1989).** Nouvelles perspectives de développement dans la modélisation des pluies efficaces par applications de la méthode DPFT. IAHS Symposium, Baltimore, IAHS Publication n° 181, 235-244.
- [19] **Rodriguez, J.Y., Sempere-Torres, D. et Obled, C. (1991).** Extension of lumped operational rainfall-runoff approach models to semilumped modelling: the case of the DPFT-ERHUDIT approach - Chapter 43. Proceedings of the International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Salford, 14-17 August 1989.
- [20] **Duband, D., Obled, C. et Rodriguez, J.Y. (1993).** Unit hydrograph revisited: an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification. *Journal of Hydrology*, **150**, 115-149.
- [21] **Tsykin, E.N. (1985).** Multiple nonlinear statistical models for runoff simulation and prediction. *Journal of Hydrology*, **77**, 209-226.

[22] **Pinault, J.L., Pauwels, H., Fritsche, V. et Cann, C. (1997).** Mechanisms affecting streamflow and stream water quality: a new spectral analysis of time-series approach. IHP-V, Technical Documents in Hydrology n° 14, UNESCO, Paris, 77-84.

[23] **Crawford, N.H. et Linsley, R.K. (1963).** A conceptual model of the hydrologic cycle. IAHS Publication n° 63, 573-587.

[24] **Schermerhorn, V.P. et Kuehl, D.W. (1968).** Operational forecasting with the SSARR model. IAHS Publication n° 80, 317-328.

[25] **Beven, K.J. et Kirkby, M.J. (1979).** A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, **24**(1), 43-69.

[26] **Cormary, Y. et Guilbot, A. (1973).** Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation. IAHS Madrid Symposium, IAHS Publication n° 108, 265-279.

[27] **EDIJATNO et MICHEL C., 1989.** Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2, 113-121p. **Makhlouf, Z. (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 p.

[28] **Makhlouf et Michel, 1994), Makhlouf, Z. et Michel, C. (1994).** A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.

[29] **Kabouya, M. et Michel, C. (1991).** Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, **4**(4), 569-587.

[30] **Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlouf, Z. et Michel, C. (1999).** GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, **44**(2), 263-277.

[31] **(Perrin et al. 2001), Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001).** Long-term low flow forecasting for French rivers by continuous rainfall-runoff modelling, Meeting of the British Hydrological Society on Continuous River Flow Simulation. BHS Occasional Paper n° 13, Wallingford, UK, 5th July 2001, 21-29.

[32] **Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. et Rasmussen, J. (1986).** An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen 'SHE'. *Journal of Hydrology*, **87**, 45-77.

[33] **Beven, K. (1987).** Towards a new paradigm in hydrology. *Water for the future : Hydrology in Perspective, Proceedings of the Rome Symposium, April 1987, IAHS Publication n° 164*, 393-403.

[34] **Morel-Seytoux, H.J. et Al Hassoun, S. (1989).** The unsaturated component of SWATCHe: a multiprocess watershed model for runoff generation and routing. In: *Unsaturated flow in hydrologic modeling - Theory and practice*, H. J. Morel-Seytoux (Ed.), Kluwer Academic Publ., 413-433.

[35] **Kuchment, L.S., Demidov, V.N., Naden, P.S., Cooper, D.M. et Broadhurst, P. (1996).** Rainfall-runoff modelling of the Ouse basin, North Yorkshire: an application of a physically based distributed model. *Journal of Hydrology*, **191**, 323-342.

[36] **Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. et Bergström, S. (1997).** Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, **201**, 272-288.

[37] **ANRH, Agence National des Ressources Hydraulique.**

[38] **ITAF, Institut de Technologie d'Arboriculture Fruitier.**

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

[40] **Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C. et Anctil, F., 2004.** Locating the sources of lowpass behaviour within rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 40(11),W11101, doi:10.1029/2004WR003291.

[41] **Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C., 2005a.** Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

[42] **Oudin, L., Michel, C. et Anctil, F., 2005b.** Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology* 303(1-4), 275- 289.

**[44] Rojas-Serna, C., 2005.** Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), ENGREF (Paris), France, 319 pp.

**[45] Mouelhi, S., 2003.** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

**[46] Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V., 2006a.** Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.

**[47] Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V., 2006b.** Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.

## SOMMAIRE

Introduction générale .....	01
<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>	
Introduction .....	03
I.1. L'hydrologie.....	04
I.2. Le cycle hydrologique.....	04
I.3. Composantes du bilan hydrologique.....	06
I.3.1. Précipitations .....	06
I.3.2. Ecoulement total .....	06
I.3.3. Evapotranspiration potentielle.....	07
I.4. Réponse hydrologique d'un bassin versant .....	08
I.5. Prévision des crues .....	11
I.5.1. Définition de la prévision des crues .....	11
I.5.2. Outils de prévision .....	12
I.7. Modélisation pluie débit .....	14
I.7.1. Définition d'un modèle .....	14
I.7.2. Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit .....	15
I.8. Mise en œuvre des modèles .....	17
I.9. Historique d'apparition des modèles hydrologiques .....	17
I.10. Classification des modèles pluie-débit .....	18
I.10.1. les modèles 'boîte noire' (blackbox) .....	19
I.10.2. Les modèles 'à réservoirs', conceptuels ou empiriques .....	22
I.10.3. Modèles fondés sur la physique .....	27
I.11. Choix des modèles .....	27
I.12. Critère de calage des performances d'un modèle hydrologique .....	28
I.12.1. Critère d'erreur quadratique .....	28
I.12.2. Critère d'erreur absolue.....	29
I.12.3. Critère de Nash .....	30
Conclusion .....	31

## **Chapitre II : Présentation de la zone d'étude**

Introduction .....	32
II.1. Aspect géographique .....	33
II.2. Courbe hypsométrique et caractéristiques géomorphologiques .....	35
II.3. Le réseau hydro-climatologique .....	37
II.3.1. Pluviométrie .....	37
II.3.2. Hydrométrie .....	37
II.4. L'hydrographie .....	38
II.5. Le climat .....	40
II.6. Aperçu géologique .....	40
II.6.1. Le Quaternaire.....	40
II.6.2. Le Tertiaire .....	42
Conclusion .....	44

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

III.1. Matériels .....	45
III.1.1. Exploitation des données.....	45
III.1.2. Modèles pluie-débit .....	47
III.1.3. Logiciels et programme utilisées .....	47
III.2. Méthode .....	49
III.2.1. Etude des précipitations.....	49
III.2.1.1. Variation de la pluviométrie annuelle .....	49
III.2.1.1.1. Ajustement des précipitations annuelles .....	50
III.2.1.2. Etude de la pluviométrie mensuelle .....	54
III.2.1.2.1. Calcul des valeurs caractéristiques .....	54
III.2.1.2.2. Répartition mensuelle de la pluviométrie .....	54
III.2.1.3. Etude de la pluviométrie saisonnière .....	56
III.2.2. Etude des débits (Lames écoulées) .....	58
III.2.2.1. Variation des écoulements annuels .....	58
III.2.2.2. Etude statistique des écoulements .....	60

III.2.2.2.1. Ajustement des lames d'eau écoulées annuelles à la loi normale et log normale.....	61
III.2.2.2. Variations mensuelle des lames d'eau écoulées .....	63
III.2.2.3. Variations saisonnière des lames d'eau écoulées .....	64
III.2.3. Etude de la température.....	66
III.2.3.1. Températures annuelles .....	66
III.2.3.2. Température mensuelles .....	67
III.2.4. Etude d'évapotranspiration (ETP) .....	68
III.2.5. Modélisation par corrélation (précipitations-lames écoulées).....	69
III.2.5.1. Corrélation annuelle .....	69
III.2.6. Description des modèles GR .....	73
III.2.6.1. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A ....	74
III.2.6.1.1. Définition.....	74
III.2.6.1.2. Description mathématique .....	75
III.2.6.1.3. Paramètre .....	75
III.2.6.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M .....	76
III.2.6.2.1. Définition .....	76
III.2.6.2.2. Description mathématique .....	76
III.2.6.2.3. Paramètres .....	79

## **Chapitre IV : Résultats et interprétation**

IV.1. Application du modèle GR1A .....	80
IV.1.1. Calage de modèle .....	80
IV.1.2. Validation du modèle .....	84
IV.2. Application du modèle GR2M .....	85
IV.2.1. Calage du modèle .....	85
IV.2.2. Validation du modèle GR2M .....	89
Conclusion générale .....	90
Recommandations .....	91
Références Bibliographiques.	
Annexes.	

### Conclusion générale

Ce mémoire qui s'inscrit dans le cadre de la recherche sur l'évolution des ressources en eau a pour objectif principal d'établir un diagnostic du fonctionnement hydrologique du bassin versant d'Oued El-Harrach. Dans l'optique d'une gestion intégrée de ces ressources, les modèles hydrologiques constituent un outil adapté à la prévision des débits sur les cours d'eau.

L'objet de notre étude étant de simuler la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant pour reproduire au mieux son comportement global face à une série chronologique de données pluviométriques.

Notre site d'étude est le bassin versant d'oued El Harrach, étant un oued majeur dans la Mitidja, possède une longueur de 67 Km et draine une superficie de 1236.28 Km<sup>2</sup>.

Il prend sa source au nord de l'Atlas Blidéen par la confluence de deux oueds principaux, l'oued Okacha et l'oued Mekka du côté de Hammam Melouane (rocher des pigeons). A l'aval, l'oued passe par Baraki et El Harrach avant de se jeter en mer.

Du point de vue morphologique, le bassin est de relief fort ce qui favorise le déclenchement de tous les processus d'abrasion.

D'après les valeurs de la densité de drainage et le coefficient de torrentialité, le bassin versant d'Oued El Harrach présente un drainage relativement faible et n'est pas du type torrentiel. De même pour le temps de concentration des eaux qui est assez long, il témoigne d'un écoulement assez lent, d'où la forme de notre bassin allongée.

La région d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen contrasté avec un hiver pluvieux et humide, un été chaud et sec et de températures moyennes respectives de 11°C et 26.5°C.

Pendant la plus grande partie de l'année les vents enregistrés ont une orientation NNW-SSE.

## Conclusion générale

---

De par la nature perméable des formations géologiques en présence, ce bassin a une bonne capacité de rétention. Grâce à leur bonne qualité de porosité et de perméabilité, les formations alluvionnaires du Quaternaires représentent le meilleur réservoir hydraulique de la région.

La discontinuité de la couverture végétale favorise l'écoulement superficiel, l'irrégularité des débits et à la genèse de fortes crues, surtout sur les terrains à fortes pentes et là où les sols sont très sensibles au ruissellement direct.

L'étude hydroclimatique nous a permis d'évaluer les principaux paramètres climatiques qui constituent les entrées des modèles hydrologiques GR.

L'analyse hydrologique s'appuie sur les données de deux stations pluviométriques, Douar Makli à l'amont et Baraki à l'aval du bassin versant d'Oued El Harrach.

L'examen des séries des précipitations de deux stations pour la période (1972/1973 – 2012/2013) a révélé une pluviométrie moyenne est de l'ordre de 667.52 mm et 612.74 mm correspondant successivement à Douar Makli et Baraki.

Les précipitations saisonnières sont concentrées essentiellement en Hiver et l'automne, et la période sèche est celle de l'été.

Les variations interannuelles de l'écoulement à l'amont du bassin versant d'oued El Harrach montrent un module annuel moyen de 263.598 mm et à l'aval du bassin versant d'El Harrach montrent un module annuel moyen de 188.96 mm.

La détermination de l'évapotranspiration moyenne annuelle par la méthode de THRONTHWAITE est faible par rapport à celle dressée par les ingénieurs de l'ANRH en collaboration scientifiques avec M. Jean Pierre Laborde.

En ce qui concerne la Modélisation par corrélation entre les pluies et lames d'eau écoulées au pas de temps annuel, l'ajustement du nuage de points à partir des essais de régression, a montré qu'il existe une faible corrélation entre la pluie annuelle et la lame d'eau écoulée annuelle. Toutefois, ces corrélations restent non significatives et ne peuvent être utilisées comme modèle de prévision ou de prédiction des écoulements pour l'Oued El Harrach.

## Conclusion générale

---

A cet effet, nous avons opté dans cette étude pour le modèle hydrologique GR, comportant peu de paramètres et pouvant rendre compte du comportement hydrologique de notre bassin.

Ce modèle est de type global, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations, d'ETP, la superficie du bassin versant et le paramètre de sortie qui est constitué par les lames d'eau écoulées.

La modélisation Pluie – Débit par l'application du modèle GR s'avèrent intéressantes et donnent des résultats appréciables comme le montre le tableau récapitulatif ci-dessous.

Les résultats de simulation obtenus par l'application des modèles (GR1A, GR2M) sur le bassin versant d'Oued El Harrach sont satisfaisants.

En effet, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe obtenues ainsi que les valeurs de coefficient de détermination pour les différents pas de temps envisagés sont supérieures à 70% en calage comme en validation, ce qui traduit la performance et la robustesse des modèles GR sur le bassin versant d'Oued El Harrach.

**Tableau récapitulatif des résultats obtenus par l'application des modèles GR (GR1A, GR2M)**

	Nash <sub>moy</sub>	R <sup>2</sup> <sub>moy</sub>	R <sup>2</sup> <sub>moy</sub>	OBS
<b>Application</b>	<b>Calage</b>		<b>Validation</b>	
<b>GR1A</b>	87.8	0.864	0.8975	✓
<b>GR2M</b>	80.5	0.8935	0.8245	✓

## *ABSTRACT*

Each catchment has a collecting function, it collects rain and transforms it into flows at the outlet, this transformation depends on climatic conditions and physical characteristics of the catchment.

The hydrological simulation of a catchment is described as the transformation of the rain flow through the use of a hydrological model.

To this effect, we have chosen in this study for the global hydrologic model GR, developed by Cemagref, containing few parameters and can execute the hydrologic behavior of our catchment.

Our study has been conducted on the catchment of Oued El Harrach, which is a major valley in the Mitidja. We have conducted in a first time to a characterization of some factors in particular the physical, geological and climatic governing the flow, in dealing with the major climatic parameters which constitute the inputs of the hydrological model GR. Then, a hydrological modeling rainfall - outflow has helped achieve the calibration and validation of hydrologic models to annual and monthly periods.

The simulation results obtained by the application of models (GR1A and GR2M) on the catchment of Oued El Harrach are satisfactory, the values of the criterion of Nash-Sutcliffe obtained as well as the values of determination for the different periods of time envisaged are superior to 70% in calibration as well in validation, which reflects the performance and robustness of models GR on the catchment of Oued El Harrach.

Keywords: Catchment, Oued El Harrach, Hydrological model, GR1A, GR2M.