

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR ES SCIENCES**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par : KAMNI Halima née BELARBI

Sujet

**Modélisation et régionalisation de la relation « pluie-débit »
face au changement climatique : Impact sur les ressources en eau.**

Soutenue publiquement, le 07/12/2017, devant le jury composé de :

M. BOUANANI Abderrazak	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. TOUAIBIA Bénina	Professeur	E.N.S.H. Blida	Directeur de thèse
M. BOUMECHRA Nadir	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de thèse
M. BENALI Abdelmadjid	Professeur	Univ. Oran	Examineur
Mme. SOUAG Doudja	Professeur	U.S.T.H.B. Alger	Examineur
M. MEGNOUNIF Abdesselam	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTEUR ES SCIENCES**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par : KAMNI Halima née BELARBI

Sujet

**Modélisation et régionalisation de la relation « pluie-débit »
face au changement climatique : Impact sur les ressources en eau.**

Soutenue publiquement, le 07/12/2017, devant le jury composé de :

M. BOUANANI Abderrazak	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. TOUAIBIA Bénina	Professeur	E.N.S.H. Blida	Directeur de thèse
M. BOUMECHRA Nadir	Professeur	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de thèse
M. BENALI Abdelmadjid	Professeur	Univ. Oran	Examineur
Mme. SOUAG Doudja	Professeur	U.S.T.H.B. Alger	Examineur
M. MEGNOUNIF Abdesselam	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur

Winter. You'll miss it when it's gone

Greenpeace

Remerciements

Je remercie avant tout Allah tout-puissant, de m'avoir guidé toutes les années d'études et de m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.

A l'issue de ce travail, je souhaite remercier tous ceux qui ont participé, directement ou indirectement à son élaboration.

Je souhaite tout d'abord remercier, Madame *Touaibia Bénina*, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Blida, pour avoir accepté d'être la directrice de cette thèse et pour toute l'aide qu'elle m'a apportée pour accomplir ce travail. Elle a su me faire bénéficier de ses connaissances et de son expérience tout en m'accordant une certaine liberté d'évolution.

Je suis vivement reconnaissante à Monsieur *Boumechra Nadir*, Professeur à l'Université de Tlemcen, de l'attention qu'il a bien voulu porter à ce travail de thèse en acceptant d'être le codirecteur. Ses remarques m'ont été indispensables et je le remercie de sa disponibilité à mon égard.

Mes remerciements vont également à Monsieur *Bouanani Abderrazak*, Professeur à l'Université de Tlemcen, de m'avoir fait l'honneur et l'immense plaisir de présider le jury.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à Monsieur *Benali Abdemadjid*, Professeur à l'Université d'Oran, à Madame *Souag Doudja*, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumédiène de Bab Ezzouar, Alger et à Monsieur *Megnounif Abdesselam*, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui ont bien voulu examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Madame *Boukli-Hacene Chérifa*, Maîtres de Conférences classe A à l'Université de Tlemcen, qui a toujours su prendre le temps de m'écouter, de mon conseiller. Je ne saurais trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude, mais qu'elle trouve dans ces quelques lignes une marque de respect et l'expression de mon admiration.

Parmi tous mes collègues de travail, il sera difficile de tous les citer, je tiens à rendre un hommage particulier et à remercier tout spécialement Mme *Baghli Naoual*, Maître Assistant classe A au Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain Temouchent.

Je n'oublierai sans doute pas de remercier Monsieur *Matari Amar*, Chargé de Recherche à l'I.H.F.R à qui j'exprime ma vive et respectueuse gratitude. Je lui serai toujours reconnaissante, il m'a beaucoup appris.

Tous les mots restent faibles pour exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents et à ma petite famille, à mes chères amies, *Amiar Sekina* et *Daoud Rabiaa* pour le soutien et l'aide précieuse qu'elles m'ont apporté durant mes années d'études.

Ce travail est un peu le leur

Résumé
الملخص
Abstract

**Modélisation et régionalisation de la relation « pluie-débit » face au changement climatique :
Impact sur les ressources en eau.**

Résumé

Cette étude consiste à modéliser et à régionaliser la relation pluie-débit sous l'effet de changement climatiques et à analyser leur impact sur les ressources en eau. Les différentes recherches consacrées à l'analyse de la variabilité pluviométrique, en Algérie et particulièrement dans la partie occidentale du pays, montrent l'instauration d'une tendance à la baisse depuis les années 70. Cette dernière s'est répercutée sur les écoulements des Oueds.

Pour parvenir à analyser cette thématique, le travail s'articule autour de deux axes principaux visant (i) à analyser dans un premier temps la dynamique de la transformation de la lame d'eau précipitée en lame d'eau écoulée à l'échelle du bassin versant ; (ii) à exposer l'impact de cette transformation sur les ressources en eau. Le bassin versant de la Tafna est pris comme champ expérimental. L'approche adoptée consiste à analyser la variable hydro-pluviométrique à l'aide des méthodes statistiques, à modéliser, à tester la non stationnarité et à régionaliser la relation pluie-débit.

Les résultats des différentes méthodes statistiques appliquées aux séries de variables pluviométrique et hydrométrique montrent une diminution depuis le milieu des années 1970 et le début des années 1980. Le déficit pluviométrique annuel a atteint des valeurs moyennes de 38,11% durant la période 1941-2006 et 29,39% durant la période allant de 1970 à 2010. Les débits moyens annuels des Oueds quant à eux présentent des déficits moyens de 61,10% entre 1912 et 2000 et 53,13% entre 1973 et 2009. Le modèle conceptuel GR2M a simulé d'une manière acceptable les hydrogrammes observés en donnant des débits calculés, en calage comme en validation, proches par des valeurs supérieures ou inférieures aux débits observés. La régionalisation des paramètres de calage du modèle GR2M en utilisant l'information contenue dans les descripteurs des sous bassins jaugés et en faisant appel à la méthode de régression linéaire a donnée des équations de prédétermination permettant le transfert vers un sous bassin mal jaugé. Le résultat de la régionalisation du modèle est jugé satisfaisant.

Mots-clefs : Bassin de la Tafna ; Pluie-débit ; Variabilité hydro-pluviométrique ; Modélisation conceptuelle ; Régression.

نمذجة وأقلمة علاقة "أمطار-جريان" أمام تغير المناخ: تأثير على الموارد المائية.

المخلص

تعتمد هذه الدراسة على نمذجة وأقلمة العلاقة بين الأمطار وجريان المياه تحت تأثير التغيرات المناخية وتحليل أثرها على الموارد المائية. تظهر مختلف البحوث المكرسة لتحليل التغيرات المطرية في الجزائر وخصوصا في الجزء الغربي من البلاد، سيطرة الاتجاه التنزلي منذ 1970. حيث انعكس هذا الأخير على جريان الأودية.

لتحليل هذا موضوع، استند العمل على محورين أساسيين هادفا (*) في البداية بذلك على تحليل ديناميات تحول كمية الماء المتساقط إلى ماء جار على مستوى مستجمع مائي (**). عرض أثر هذا التحول على الموارد المائية. تم أخذ المستجمع مائي لتافنة كمجال تجريبي. تتمثل الطريقة المعتمد في تحليل المتغير الهيدرومتري باستخدام طرق إحصائية، نمذجة، اختبار عدم الثبات العلاقة و أقلمة علاقة أمطار-جريان.

تشير مختلفة نتائج الطرق الإحصائية المطبقة على سلسلة المتغيرات المطرية و الهيدرومترية أن هذه الأخيرة أخذت في التناقص منذ منتصف 1970 و بداية 1980. العجز السنوي لهطول الأمطار بلغ قيم وسطى 38,11% خلال الفترة 1941-2006 و 29,39% خلال الفترة الممتدة ما بين 1970 و 2010. متوسط التدفق السنوي للأودية بدوره بلغ متوسط عجز 61,10% بين 1912 و 2000، و 53,13% بين عامي 1973 و 2009. النموذج النظري GR2M حاكى بشكل مقبول منحى الجريان الملاحظ معطيا جريان محاكى، في التوتيد كما في التثبيت، قريب بقيم أعلى أو أدنى من الجريان الملاحظ. أقلمة معاملة معايرة النموذج GR2M باستخدام المعلومات الواردة في مواصفات الأحواض الفرعية المقاسة باستخدام أسلوب الانحدار الخطي أعطت التحديد المسبق للمعادلات سمحت بالانتقال الى حوض شبه مقياس. تعتبر نتيجة أقلمة النمذج مرضية.

كلمات المفتاحية: حوض تافنة؛ أمطار- جريان؛ تقارب جريان-أمطار؛ النموذج النظري؛ ارتداد

**Modeling and regionalization of "rainfall-runoff" relation in front of climate change:
Impact on water resources.**

Abstract

This study consists of modeling and regionalizing the rainfall–runoff relation under the effect of climate change and analyzing their impact on water resources. The various researches devoted to the analysis of rainfall variability, in Algeria and particularly in the western part of the country, show a downward trend since the 1970s. The latter was reflected on the runoff of the wadis.

In order to analyze this topic, the work is articulated around two aiming main axes (*i*) to analyze in the first stage the dynamics of the transformation of the precipitated water into water drained at the scale of watershed; (*ii*) to expose the impact of this transformation on water resources. The Tafna basin is taken as an experimental field. The approach adopted is to analyze the hydro-rainfall variable using statistical methods, to model, to test the non-stationarity and to regionalize the rainfall-runoff relation.

The results of the different statistical methods applied to the series of rainfall and hydrometric variables show a decrease since the mid-1970s and early 1980s. The annual rainfall deficit reached average values of 38,11% during the period 1941-2006 and 29,39% during the period from 1970 to 2010. The average annual runoff of the Wadis has average deficits of 61,10% between 1912 and 2000 and 53,13% between 1973 and 2009. The GR2M conceptual model has simulated the observed hydrographs in an acceptable manner by giving calculated flow, in calibration as in validation, by values greater or less than the observed runoff. The regionalization of the calibration parameters of the GR2M model using the information contained in the descriptors of the subgauged sub-basins and using the linear regression method gave predetermination equations allowing the transfer to the ungauged sub-basin. The result of the regionalization of the model is considered satisfactory.

Keywords: Tafna basin; Rainfall–runoff; Hydro-rainfall variability; Conceptual modeling; Regression.

Table des matières

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SIGNES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction	05
I. Quelques réflexions sur la modélisation et la régionalisation hydrologique	06
I.1 Hydrologie et bassin versant : siège complexe de processus hydrologiques	06
I.1.1 Processus et composantes d'écoulement.....	08
I.1.2 Processus identifiés et facteurs influençant les écoulements.....	10
I.1.3 Variabilité hydro-pluviométrique et analyse pluie-débit.....	11
I.2 Modélisation hydrologique	11
I.2.1 Définition du terme modèle.....	11
I.2.2 Critères de qualité d'un modèle.....	14
I.2.3 Critères de performance.....	15
I.2.4 Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit.....	16
I.3 Calage, validation et incertitude d'un modèle	17
I.3.1 Sélection de la structure du modèle.....	17
I.3.2 Analyse de sensibilité.....	18
I.3.3 Calage et validation.....	18
I.3.4 Incertitude.....	19
I.4 Classification des modèles pluie-débit	21
I.4.1 Déterministe ou stochastique.....	22
I.4.2 Global, distribué ou semi-distribué.....	22
I.4.3 Empirique, conceptuel ou théoriques.....	24
I.5 Régionalisation : problématique et motivation	25
I.5.1 Besoin de méthode pour faire face à des bassins versants non jaugés.....	26
I.5.2 Approches de régionalisation en hydrologie.....	26
I.5.3 Limites des approches de régionalisation.....	28

II. État de l'art : Modélisation et régionalisation de la relation pluie-débit	29
II.1 A l'échelle internationale	29
II.2 A l'échelle nationale	32
III. Modélisation et régionalisation de la relation pluie-débit : Modèles et méthode d'application choisis	33
III.1 Choix des échelles de modélisation	33
III.2 Description du modèle hydrologique utilisé	34
III.3 Critère mathématique d'optimisation du modèle : Critère de Nash-Sutcliffe	35
III.4 Evaluation de la performance d'un modèle	35
III.5 Evaluation des incertitudes associées aux valeurs de débits simulés	36
III.6 Caractérisation d'une tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant. Approche des simulations croisées	36
III.7 Descriptions de l'approche de régionalisation utilisée	38
III.7.1 Modèle théorique de la régression simple.....	38
III.7.2 Modèle théorique de la régression multiple.....	39
Conclusion	41

Chapitre II : BASSIN VERSANT ET BASE DE DONNEES

Introduction	43
I. Présentation de la zone d'étude	43
I.1 Géographie du bassin versant de la Tafna	43
I.2 Relief du bassin versant de la Tafna	45
I.2.1 Zones montagneuses.....	45
I.2.2 Zones des plaines et des plateaux.....	46
I.3 Géologie du bassin versant de la Tafna	47
I.3.1 Primaire.....	48
I.3.2 Secondaire.....	48
I.4 Végétation du bassin versant de la Tafna	52
I.5 Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna	53
I.5.1 Haute Tafna.....	55
I.5.2 Moyenne Tafna.....	55
I.5.3 Basse Tafna.....	56
I.6 Hydrogéologie du bassin versant de la Tafna	56
I.7 Aperçu sur les sous bassins du bassin versant de la Tafna	57
I.7.1 Sous bassin versant de Tafna maritime.....	57
I.7.2 Sous bassin versant d'Oued Isser (global).....	57

I.8.3 Sous bassin versant d'Oued Sikkak.....	58
I.8.4 Sous bassin versant de Tafna Boukiou.....	58
I.8.5 Sous bassin versant de Tafna amont	59
I.8.6 Sous bassin versant d'Oued Ouardefou (Boughrara).....	59
I.8.7 Sous bassin versant d'Oued Mouilah.....	59
I.8 Ressources en eau du bassin versant de la Tafna.....	60
I.8.1 Ressources en eaux superficielles du bassin versant de la Tafna.....	60
I.8.2 Ressources souterraines du bassin versant de la Tafna	62
II. Constitution de base de données.....	64
II.1 Présentation des données hydrométéorologiques.....	64
II.1.1 Données pluviométriques.....	64
II.1.2 Données thermométriques.....	67
II.1.3 Données hydrométriques	67
II.2 Critique et analyse des données hydrométéorologiques.....	70
II.2.1 Critique et analyse des données pluviométriques.....	70
II.2.2 Critique et analyse des données thermométriques.....	78
II.2.3 Critique et analyse des données hydrométriques.....	80
II.3 Estimation de l'évapotranspiration.....	82
Conclusion.....	84

Chapitre III : CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE

Introduction.....	86
I. Détection de rupture de stationnarité dans les séries hydro-pluviométriques.....	86
I.1 Détection de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques.....	87
I.1.1 Séries interannuelles pluviométriques.....	87
I.1.2 Séries intra-annuelles pluviométriques.....	90
I.2 Détection de rupture de stationnarité dans les séries hydrométriques.....	95
I.2.1 Séries interannuelles hydrométriques.....	95
I.2.2 Séries intra-annuelles hydrométriques.....	99
II. Etude de la variabilité hydro-pluviométrique.....	102
II.1 Etude de la variabilité interannuelle pluviométrique.....	102
II.2 Etude de la variabilité interannuelle hydrométrique.....	107
III. Etude fréquentielle des séries hydro-pluviométriques	111
III.1 Etude fréquentielle des précipitations annuelles.....	112
III.2 Etude fréquentielle des modules annuels.....	114
IV. Evolution des précipitations et du bilan climatique.....	116

IV.1 Evolution des normes pluviométriques.....	116
IV.2 Evolution des précipitations décennales.....	118
IV.3 Evolution du bilan climatique.....	121
IV.3.1 Bilan climatique annuel.....	121
IV.3.2 Bilan climatique mensuel.....	123
V. Fonctionnement hydrologique.....	124
V.1 Régimes hydrologiques moyens des sous bassins du bassin versant de la Tana.....	125
V.2 Corrélation hydro-pluviométrique des valeurs annuelles.....	126
Conclusion.....	128

Chapitre IV : TENDANCE ET REGIONALISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA

Introduction.....	130
I. Performances et robustesse du modèle hydrologique.....	130
I.1 Performances en phases de calage et de validation du modèle global : GR2M.....	130
I.2 Robustesse du modèle GR2M.....	135
II. Evaluation des incertitudes associées aux valeurs de débits simulés.....	137
III. Identification de tendances de la relation pluie-débit des sous bassins.....	141
IV. Régionalisation du modèle GR2M : Application aux sous bassins de Tafna maritime, d'Isser Sikkak, d'Oued Sebdu (Tafna amont) et de Mouilah aval.....	146
IV.1 Analyse de l'échantillon des paramètres.....	146
IV.2 Choix et analyse de variables explicatives.....	146
IV.3 Recherche de relations entre paramètres du modèle et variables explicatives.....	147
IV.4 Régressions sur les paramètres transformés.....	148
IV.4.1 Paramètre X_1	148
IV.4.2 Paramètre X_2	149
IV.4.3 Vérification directe.....	151
IV.4.4 Simulation des débits dans le bassin versant non ou mal jaugé.....	152
Conclusion.....	152

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	155
--	-----

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXES

- Annexe.1. Retenues collinaires intégrées dans le bassin versant de la Tafna.
- Annexe.2. Stations pluviométriques. Code et position géographique.
- Annexe.3. Stations hydrométriques. Code et position géographique.

- Annexe.4.** Matrice de corrélation. Totaux pluviométriques annuels (1941-2006).
- Annexe.5.** Matrice de corrélation. Totaux pluviométriques annuels (1970-2010).
- Annexe.6.** Matrice de corrélation. Températures moyennes annuelles (1976-2007).
- Annexe.7.** Estimation de l'évapotranspiration.
- Annexe.8.** Tests statistiques de détection de rupture de stationnarité.
- Annexe.9.** Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels par les tests de Pettitt et de Mann-Kendall. Période d'étude (1970-2010).
- Annexe.10.** Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles pluviométriques.
- Annexe.11.** Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles hydrométriques
- Annexe.12.** Etude de la variabilité pluviométrique.
- Annexe.13.** Etude fréquentielle des séries hydro-pluviométriques.
- Annexe.14.** Formation géologique de la wilaya de Tlemcen.

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : BASSIN VERSANT ET BASE DE DONNEES

Tableau II.1	: Distribution du couvert végétal de quelques sous bassins du bassin versant de la Tafna.....	52
Tableau II.2	: Code du bassin et des sous bassins de la Tafna.....	53
Tableau II.3	: Caractéristiques des grands barrages du bassin versant de la Tafna.....	61
Tableau II.4	: Principales caractéristiques des petits barrages du bassin versant de la Tafna.....	62
Tableau II.5	: Ressources souterraines en eau du bassin versant de la Tafna.....	63
Tableau II.6	: Stations retenues. Coordonnées et périodes d'observation et d'étude.....	66
Tableau II.7	: Stations retenues. Coordonnées et périodes d'observation et d'étude.....	67
Tableau II.8	: Stations retenues. Coordonnées, surfaces contrôlées et périodes d'observation et d'étude périodes.....	69
Tableau II.9	: Station de référence, stations de base et leur période de référence.....	72
Tableau II.10	: Caractéristiques statistiques des stations pluviométriques retenues. Totaux pluviométriques annuels.....	78
Tableau II.11	: Caractéristiques statistiques des stations thermométriques retenues. Températures moyennes annuelles (1976-2007).....	80
Tableau II.12	: Caractéristiques statistiques des stations hydrométriques retenues. Débits moyens annuels.....	82

Chapitre III : CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE

Tableau III.1	: Tests statistiques appliqués sur les séries de totaux pluviométriques annuels..	87
Tableau III.2	: Déficit pluviométrique des différentes stations étudiées.....	90
Tableau III.3	: Tests statistiques appliqués sur les séries de totaux pluviométriques saisonniers. Période d'étude (1941-2006).....	91
Tableau III.4	: Tests statistiques appliqués sur les séries de totaux pluviométriques saisonniers. Période d'étude (1970-2010).....	92
Tableau III.5	: Récapitulation des déficits pluviométriques en (%) des différentes stations étudiées.....	93
Tableau III.6	: Tests statistiques appliqués sur les séries de débits moyens annuels.....	96
Tableau III.7	: Déficit hydrométrique des différentes stations étudiées.....	99
Tableau III.8	: Tests statistiques appliqués sur les débits moyens saisonniers.....	99

Tableau III.9	: Récapitulation des déficits hydrométriques en (%) des différentes stations étudiées.....	100
Tableau III.10	: Différentes tendances aux stations pluviométriques de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Zenata et de Béni-Bahdel. Période d'étude (1941-2006).....	104
Tableau III.11	: Différentes tendances aux stations pluviométriques de Pierre du Chat, de Mefrouche, d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet. Période d'étude (1970-2010).....	105
Tableau III.12	: Différentes tendances aux stations hydrométriques de Pierre du Chat et de Remchi. Période d'étude (1912-2000).....	109
Tableau III.13	: Différentes tendances aux stations hydrométriques de Béni-Bahdel et de Pont RN7/A. Période d'étude (1973-2009).....	109
Tableau III.14	: Test de Khi2. Ajustements adéquats.....	112
Tableau III.15	: Valeurs fréquentielles de la pluviométrie annuelle (mm) au niveau du bassin versant de la Tafna.	113
Tableau III.16	: Test de Khi2. Ajustements adéquats.....	114
Tableau III.17	: Valeurs fréquentielles des modules annuels (m ³ /s) au niveau du bassin versant de la Tafna.....	115
Tableau III.18	: Moyennes trentenaires des précipitations annuelles (mm). Période d'étude (1941-2006).....	116
Tableau III.19	: Ecart par rapport à la norme de référence (mm). Période d'étude (1941-2006).	117
Tableau III.20	: Moyennes décennales des précipitations annuelles (mm). Période d'étude (1941-2006).....	118
Tableau III.21	: Ecart par rapport à la moyenne décennale de référence (mm). Période d'étude (1941-2006).....	119
Tableau III.22	: Différentes formations géologiques des sous bassins du bassin versant de la Tafna.....	128

Chapitre IV : TENDANCE ET REGIONALISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA

Tableau IV.1	: Résultats des calages (1976-1992) et des validations (1992-2000) du modèle GR2M aux sous-bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).....	132
Tableau IV.2	: Résultats des calages (1976-1996) et des validations (1996-2006) du modèle GR2M aux sous-bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).....	132
Tableau IV.3	: Débits observés et calculés (mm) par le modèle GR2M.....	135
Tableau IV.4	: Synthèse des performances en calage et en validation du modèle GR2M.....	136
Tableau IV.5	: Performances moyennes et critère de robustesse du modèle GR2M.....	136
Tableau IV.6	: Erreurs calculés en phases de calage et de validation des sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602)	138

Tableau IV.7	: Incertitudes en phases de calage et de validation dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602)	138
Tableau IV.8	: Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm). Sous bassin de la Tafna maritime (1608). Période d'étude (1976-2000)	142
Tableau IV.9	: Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm). Sous bassin d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).....	142
Tableau IV.10	: Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm). Sous bassin d'Oued Sebou (Tafna amont) (1604). Période d'étude (1976-2006).....	142
Tableau IV.11	: Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm). Sous versant de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006)	142
Tableau IV.12	: Matrice des signes. Sous bassin de la Tafna maritime (1608). Période d'étude (1976-2000)	143
Tableau IV.13	: Matrice des signes. Sous bassin d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000)	143
Tableau IV.14	: Matrice des signes. Sous bassin d'Oued Sebou (Tafna amont) (1604). Période d'étude (1976-2006).....	143
Tableau IV.15	: Matrice des signes. Sous bassin de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).....	143
Tableau IV.16	: Matrice de corrélation entre paramètres.....	146
Tableau IV.17	: Variables explicatives des sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdu et de Mouilah aval (1602)	147
Tableau IV.18	: Matrice de corrélation entre variables explicatives.....	147
Tableau IV.19	: Relations entre paramètre transformé $\ln X_1$ et variables explicatives.....	148
Tableau IV.20	: Analyse de la variance et test de significativité correspondant.....	149
Tableau IV.21	: Relations entre paramètre transformé $\ln X_2$ et variables explicatives.....	150
Tableau IV.22	: Analyse de la variance et test de significativité correspondant.....	150
Tableau IV.23	: Comparaison des valeurs du critère de Nash-Stucliffé pour les paramètres calés et calculés. Phase calage.....	151
Tableau IV.24	: Comparaison des valeurs du critère de Nash-Stucliffé pour les paramètres calés et calculés. Phase validation.....	151
Tableau IV.25	: Détermination des paramètres explicatifs et calculés du modèle GR2M. Sous bassin de Boukiou (1605).....	152

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Fig. I.1	: Conceptualisation du cycle hydrologique.....	07
Fig. I.2	: Exemple du bassin versant topographique.....	08
Fig. I.3	: Processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant.....	08
Fig. I.4	: Ruissellement de surface, écoulement hypodermique et infiltration.....	10
Fig. I.5	: Représentation schématique de la modélisation hydrologique pluie-débit.....	12
Fig. I.6	: Schématisation du processus d'identification d'un modèle.....	13
Fig. I.7	: Variables d'un modèle hydrologique.....	13
Fig. I.8	: Procédure (standard) simplifiée pour la modélisation de la relation pluie-débit.....	17
Fig. I.9	: Relation conceptuelle entre le niveau de complexité, la disponibilité des données et la performance du modèle.....	18
Fig. I.10	: Source d'incertitudes liées à la modélisation hydrologique.....	20
Fig. I.11	: Représentation schématiques des modèles hydrologiques globale, semi-distribué et distribué.....	23
Fig. I.12	: Schéma conceptuel du modèle GR2M.....	35

Chapitre II : BASSIN VERSANT ET BASE DE DONNEES

Fig. II.1	: Code et nom des bassins versants de l'Algérie.....	44
Fig. II.2	: Position du bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui.....	44
Fig. II.3	: Cadre géographique du bassin versant de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen.....	45
Fig. II.4	: Grands traits structuraux de la mosaïque de l'Afrique du Nord-Ouest.....	47
Fig. II.5	: Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines.....	49
Fig. II.6	: Bassin et sous-bassins de la Tafna.....	54
Fig. II.7	: Hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin hydrographique de la Tafna selon Strahler.....	54
Fig. II.8	: Carte de répartition du faciès carbonaté dans le bassin versant de la Tafna.....	57
Fig. II.9	: Ressources superficielles. Grands barrages du bassin versant de la Tafna.....	61
Fig. II.10	: Représentation cartographique simplifiée des différentes nappes du bassin versant de la Tafna.....	63
Fig. II.11	: Stations pluviométriques du réseau ANRH. Position géographique.....	65
Fig. II.12	: Stations retenues. Lacunes et périodes d'observations.....	67

Fig. II.13	: Stations hydrométriques. Position géographique.....	68
Fig. II.14	: Méthode du double cumul entre les stations de Bensekrane, de Mefrouche, de Maghnia et d'Oued Chouly et la station de Béni-Bahdel comme station de référence. Totaux pluviométriques annuels.....	73
Fig. II.15	: Méthode du double cumul entre les stations d'Ouled Mimoun, de Pierre du Chat, et de Ghazaouet et la station de Zenata comme station de référence. Totaux pluviométriques annuels.....	74
Fig. II.16	: Station de Béni-Bahdel comme station de référence. Contrôle par la méthode de l'ellipse de Bois des stations présentant des anomalies par la méthode du double cumul. Totaux pluviométriques annuels (1970-2010)	75
Fig. II.17	: Station de Zenata comme station de référence. Contrôle par la méthode de l'ellipse de Bois des stations présentant des anomalies par la méthode du double cumul. Totaux pluviométriques annuels.....	76
Fig. II.18	: Méthode du double cumul entre la station de Mefrouche et la station de Béni-Bahdel comme station de référence avant et après correction des données. Totaux pluviométriques annuels (1970-2010).....	77
Fig. II.19	: Méthode du double cumul entre la station d'Ouled Mimoun et la station de Zenata comme station de référence avant et après correction des données. Totaux pluviométriques annuels (1941-2006).....	77
Fig. II.20	: Méthode du double cumul entre les stations de Béni-Bahdel, de Mefrouche et de Maghnia et la station de Zenata comme station de référence. Températures moyennes annuelles (1976-2007).....	79
Fig. II.21	: Méthode du double cumul entre la station de Remchi et la station de Pierre du Chat comme station de référence. Débits moyen annuels (1912-2000).....	81
Fig. II.22	: Méthode du double cumul entre la station de Pont RN7/A et la station de Béni-Bahdel comme station de référence . Débits moyen annuels (1973-2009).....	81
Fig. II.23	: Ellipse de Bois entre la station de Remchi et la station de Pierre du Chat comme station de référence. Débits moyen annuels (1912-2000).....	81
Fig. II.24	: Ellipse de Bois entre la station de Pont RN7/A et la station de Béni-Bahdel comme station de référence. Débits moyen annuels (1973-2009).....	81
Fig. II.25	: Variations interannuelles de l'ETP (Turc et Thornthwaite) des stations de Béni-Bahdel, de Mefrouche, de Zenata et de Maghnia. Période d'étude (1976-2007).....	83

Chapitre III : CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE

Fig. III.1	: Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata par le test de Pettitt. Période d'étude (1941-2006)	88
Fig. III.2	: Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata par le test de Mann-Kendall. Période d'étude (1941-2006).	89
Fig. III.3	: Déficits et variations des moyennes des répartitions pluviométriques à l'échelle hivernale avant et après rupture.....	94
Fig. III.4	: Déficits et variations des moyennes des répartitions pluviométriques à l'échelle printaniers avant et après rupture.....	95

Fig. III.5	: Etude de la tendance des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi et de Béni-Bahdel par le test de Pettitt.....	97
Fig. III.6	: Etude de la tendance des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi et de Béni-Bahdel par le test de Mann-Kendall.	98
Fig. III.7	: Déficits et variations des moyennes des répartitions hydrométriques à l'échelle hivernale avant et après rupture.....	100
Fig. III.8	: Déficits et variations des moyennes des répartitions hydrométriques à l'échelle printanière avant et après rupture.....	101
Fig. III.9	: Déficits et variations des moyennes des répartitions hydrométriques à l'échelle estivale avant et après rupture.....	101
Fig. III.10	: Variabilité interannuelle des totaux pluviométriques annuels des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata. Période d'étude (1941-2006).....	103
Fig. III.11	: Ecart moyen relatif de la pluviométrie annuelle des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata. Période d'étude (1941-2006).....	106
Fig. III.12	: Variabilité interannuelle des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi, de Béni-Bahdel et de Pont RN7/A.....	108
Fig. III.13	: Ecart moyen relatif des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi, de Béni-Bahdel et de Pont RN7/A.....	111
Fig. III.14	: Ajustement graphique des totaux pluviométriques annuels à la log-normale. Période d'étude (1941-2006).....	113
Fig. III.15	: Ajustement graphique des modules annuels des stations étudiées.....	115
Fig. III.16	: Variations pluviométriques des normes de (1941-1971) à (1971-2001).....	116
Fig. III.17	: Répartition spatiale des écarts par rapport à la norme de référence (mm) des stations étudiées. Période d'étude (1941-2006).....	118
Fig. III.18	: Variations pluviométriques des moyennes décennales des précipitations annuelles....	119
Fig. III.19	: Répartition spatiale des écarts par rapport à la décennale de référence (mm) des stations étudiées. Période d'étude (1941-2006).....	120
Fig. III.20	: Evolution interannuelle du bilan climatique dans les sous de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).....	122
Fig. III.21	: Variation interannuelle en eau de ruissellement dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).....	123
Fig. III.22	: Evolution moyen intra-mensuelle du bilan climatique dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006)	124
Fig. III.23	: Variation mensuelle des lames précipitées /lames écoulées des sous-bassins du bassin de la Tafna.....	125
Fig. III.24	: Corrélation hydro-pluviométrique et variation annuelle des lames précipitées et écoulées. Période d'étude (1970- 2000)	126
Fig. III.25	: Corrélation hydro-pluviométrique et variation annuelle des lames précipitées et écoulées. Période d'étude (1973-2006).....	127

**Chapitre IV : TENDANCE ET REGIONALISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT
DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA**

Fig. IV.1	: Hydrogrammes observés et simulés en phase de calage par le modèle GR2M (1976-1992) aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).....	133
Fig. IV.2	: Hydrogrammes observés et simulés en phase de calage par le modèle GR2M (1976-1996) aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).....	133
Fig. IV.3	: Hydrogrammes observés et simulés en phase de validation par le modèle GR2M (1992-2000) aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).....	134
Fig. IV.4	: Hydrogrammes observés et simulés en phase de validation par le modèle GR2M (1996-2006) aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).....	134
Fig. IV.5	: Relation entre les résidus et les lames d'eau simulées aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).....	137
Fig. IV.6	: Relation entre les résidus et les lames d'eau simulées aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).....	137
Fig. IV.7	: Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de calage aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000)	139
Fig. IV.8	: Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de calage aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).....	140
Fig. IV.9	: Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de validation aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).....	140
Fig. IV.10	: Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de validation aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).....	141
Fig. IV.11	: Distribution empirique des valeurs de la statistique obtenues pour la matrice de sous bassin de Tafna maritime (1608) en appliquant de modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2000).....	144
Fig. IV.12	: Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD obtenues pour la matrice du sous bassin d'Isser Sikkak (1607) en appliquant de modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2000).....	144
Fig. IV.13	: Distribution empirique des valeurs de la statistique obtenues pour la matrice du sous bassin d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) en appliquant de modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2006).....	145
Fig. IV.14	: Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD obtenues pour la matrice du sous bassin de Mouilah aval (1602) en appliquant de modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2006).....	145

Liste des abréviations et des signes

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SIGNES

ABHOCC	: Agence de Bassin Hydrographique Oranie-Chott-Chergui
ABH	: Agence du Bassin Hydraulique
ACP	: Analyse en Composantes Principales
AEP	: Alimentation en Eau Potable
ANAT	: Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire
ANFIS	: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
ANRH	: Agence Nationale des Ressources Hydraulique
AWBM	: Australian Water Balance Model
BAPE	: Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement
BG	: Barrage Grand
CEMAGREF	: Centre d'Etude du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts
CIEH	: Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques.
CIESSA	: Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques
CNES	: Conseil National Economique et Social
CNRS	: Centre National de la Recherche Scientifique
CORPEN	: Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les Phosphates et les Produits Phytosanitaires Provenant des Activités Agricoles
CPCS	: Classification française de la commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
CREC	: Centre de Recherches et d'Etudes de Chatou
DHSVM	: Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
DPFT	: Différence Première de la Fonction de la Transfert
ENGREF	: Ecole National du Génie Rural des Eaux et des Forets
ETP	: Evapotranspiration potentielle
GIUH	: Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph
GPI	: Grand Périmètre Irrigué
GR	: Modèles hydrologiques du Génie Rural
GR1A	: Génie Rural, modèle à 1 paramètre au pas de temps Annuel
GR2M	: Génie Rural, modèle à 2 paramètres au pas de temps Mensuel
GR4J	: Génie Rural, modèle à 4 paramètres au pas de temps Journalier
HBV	: Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning
HMS	: Hydrologie Model System

IHFR	: Institut Hydrométéorologie de Formation et de Recherche
IAHS	: International Association Of hydrological Sciences
IHACRES	: Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow
IHDM	: Institute of Hydrology Distributed Model
IND	: Industrielle
INRA	: Institut National de la Recherche Agronomique
INRS	: Institut National de la Recherche Scientifique
IRR	: Irrigation
IRSTEA	: Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IUH Model	: Instantaneous Unit Hydrograph Model
LJEE	: Le Journal de l'Eau et de l'Environnement
LISAH	: Laboratoire d'étude des Interactions Sol-Agrosystèmes-Hydrosystèmes
MODGLO	: MODèle GLObal
NAM	: Nedbor Afstromnings Model
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
ONM	: Office National de la Météorologie
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer
PAW	: Plan d'Aménagement du Territoire de la Wilaya
PB	: Petit Barrage
PDM	: Probability Distributed Model
PMH	: Petite et Moyenne Hydraulique
PNR	: Projet National de Recherche
RC	: Retenue collinaire
SCS	: Soil Conservation Service
SHE	: Système Hydrologique Européen
SHETRAN	: Système Hydrologique Européen Transport
SLURP	: Simple Lumped Reservoir Parametric
SOGREAH	: Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques
TINS	: Triangular Irregular Networks
TOPKAPI	: Topographic Kinematic Approximation and Integration
TOPMODEL	: TOPography-based hydrological MODEL
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
Xaj	: Xinanjiang model
ZNS	: Zone Non Saturée
ZS	: Zone Saturée
K3	: Coefficient d'irrégularité

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

« Demain peut-être, avant midi, à travers la roche éventrée, nous verrons surgir l'eau des collines cent fois plus précieuse que l'or »

Jean Giono

L'eau est un bien commun et vital. Elle est indispensable pour satisfaire les besoins de l'homme les plus futiles. Toutefois, sa rareté et son inégale répartition géographique engendrent d'une part des conflits juridiques et politiques entre de nombreux pays et d'autre part un potentiel et un enjeu socio-économique très importants. En effet, ce n'est pas un hasard si le mot rival vient du mot rive : le rival, c'est l'habitant de l'autre rive, celui qui pourrait être tenté de prendre plus que sa juste part de ce bien commun essentiel, l'eau (BAPE, 2000).

En Algérie, dans son rapport en 2004, la Commission de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement du Conseil National Economique et Social (CNES), mentionne qu'il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de mètres cubes par an, en réservant 70% à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante. C'est un défi titanesque lorsqu'on sait qu'on mobilise à peine au plus 5 milliards de mètres cubes par an (Masmoudi, 2009). Par conséquent, la réponse à cette délicate formule entre les ressources en eau et la satisfaction des besoins en eau des différents secteurs reste à résoudre. En outre, au-delà des faiblesses et des contraintes auxquelles le secteur de l'eau en l'Algérie fait face, les chercheurs ont pu montrer que ce pays serait probablement touché par les dernières variations climatiques. Ces variations sont traduites par une diminution des précipitations moyennes annuelles, tout en augmentant la probabilité

d'occurrence des événements climatiques extrêmes comportant particulièrement des périodes de sécheresse, qui devenaient au cours du temps, intenses et persistantes.

Pour les hydrologues, dans ces conditions de la non-stationnarité à la fois climatique et anthropique, il y a lieu d'investir dans l'optimisation des méthodes et des moyens disponibles pour améliorer et approfondir les connaissances existantes de la ressource en eau afin d'aider à la gestion et d'orienter au mieux les décisions à prendre. Pour cela, une analyse détaillée de la variabilité hydrométéorologique constitue un impératif présent pour prévoir l'impact négatif des événements extrêmes du climat.

La présente étude, dans le contexte ci-dessus, nous cherchons à vérifier les tendances dans la relation pluie-débit afin d'évaluer leurs variations sur les ressources en eau en prenant comme zone d'étude le bassin versant de la Tafna. Ce bassin, surnommé jadis le château d'eau de l'Ouest Algérien (*ABHOCC, 2006 ; Ghenim et Megnounif, 2013a*) assurait et continue à assurer l'alimentation en eau des différents secteurs socio-économiques dans la région. Pour parvenir à notre objectif primordial, quatre objectifs secondaires sont à accomplir.

1. *Analyse de la variabilité hydro-pluviométrique* à l'aide de méthodes statistiques afin d'apprécier la variabilité temporelle des chroniques hydro-pluviométriques.
2. *Evaluation de la performance et de la robustesse du modèle hydrologique utilisé* à l'échelle des sous bassins du bassin versant de la Tafna.
3. *Mettre en évidence la tendance de la relation pluie-débit* en s'appuyant sur la modélisation hydrologique
4. *Régionaliser les paramètres du modèle pluie-débit* en appliquant la régression linéaire afin de créer des liens entre les paramètres du modèle hydrologique et les variables explicatives des sous-bassins utilisés.

La thèse s'articule autour de quatre chapitres, une conclusion générale et des références bibliographiques :

Le *premier chapitre* est une synthèse bibliographique relative à la notion de *la modélisation et de la régionalisation de la relation pluie débit*, ainsi qu'à la présentation du modèle et de la méthode utilisée ;

Le *deuxième chapitre* est consacré à la présentation du bassin versant. La base de données sera aussi présentée, critiquée et analysée ;

Le *troisième chapitre* repose sur la caractérisation de la variabilité hydro-pluviométrique du bassin versant de la Tafna sur différentes périodes d'études. Cette caractérisation est basée sur des méthodes statistiques ;

Le *quatrième chapitre* aborde l'évaluation du modèle hydrologique conceptuel de la relation pluie-débit, la vérification de la tendance et de la régionalisation des paramètres du modèle.

En *conclusion générale*, une récapitulation des principaux résultats est présentée aussi quelques perspectives des travaux futurs.

Chapitre I

Etude bibliographique

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

« ... chacun avait le sentiment de comprendre grâce aux explications des autres, et de comprendre mieux encore en expliquant aux autres. »

Albert Jacquard idées Vécues, 1989

Introduction

La modélisation de la relation pluie-débit est un sujet de recherche très important pouvant être utilisée pour la planification, le fonctionnement et le contrôle de tout projet de ressources en eau. Dans la plupart des régions arides, en particulier où il y a un manque de données hydrométéorologiques à long terme, la modélisation est devenue un outil convenable pour la gestion des ressources en eau, tant en période humide qu'en période sèche. En outre, les prédictions futures avec les différents scénarii en termes de changements climatiques ainsi que l'environnement peuvent être entrepris par la modélisation pluie-débit (*Al-Ahmadi, 2005*).

Aujourd'hui, la modélisation est devenue une pratique courante dans tous les domaines d'activité dont la raison principale est les limites des techniques utilisées pour mesurer et observer les différentes composantes d'un système hydrologique (*Beven, 2001*). Ainsi, pour fournir aux ingénieurs des outils appropriés pour la gestion de l'eau, l'hydrologue doit identifier les modèles qui représentent le comportement des bassins versants. Toutefois, les problèmes peuvent se poser en tout point d'un réseau hydrographique. Pour y répondre, l'hydrologue doit disposer des données permettant la paramétrisation de modèles pertinents. Seulement, il dispose souvent de données pluviométriques ou pluvio-graphiques qui sont mieux distribuées spatialement que les séries de débit. Dans d'autres cas, les réseaux de mesures déjà existants sont en déclin et de fait, les processus hydrologiques dominants qui gouvernent la réponse de

ces bassins, dits *non jaugés* ou *non instrumentés*, référencés comme *ungauged* et *poorly gauged* dans la littérature, restent donc peu connus. Du coup, le plus simple serait de pouvoir s'appuyer sur des *relations régionales* obtenues en établissant des liens statistiques entre les valeurs des paramètres des modèles hydrologiques et des descripteurs climatiques ou physiques des bassins.

Avant d'aborder en détail les questions qui se rattachent à la notion de la modélisation et de la régionalisation hydrologique de la relation pluie-débit, il semble indispensable de reprendre la présentation des différents processus hydrologiques intervenant dans un bassin versant, de faire une classification des modèles afin de différencier les grands types d'approches de construction de modèles destinés à simuler la transformation de la pluie en débit, ainsi que les principales sources d'erreurs, d'imprécision et d'incertitude. Les différentes méthodologies existantes dans le domaine de la régionalisation des paramètres de modèles pluie-débit ont été présentées. Finalement, une description du modèle et de la méthode utilisée a été donnée.

I. Quelques réflexions sur la modélisation et la régionalisation hydrologique

I.1 Hydrologie et bassin versant : siège complexe de processus hydrologiques

Jadis, en Egypte, 3 000 ans avant Jésus-Christ, l'on disposait des données sur les niveaux des inondations du Nil ce qui, au fond représentait déjà une étude hydrologique rudimentaire (Duvivier, 1955) qui, jusqu'à présent les nilomètres sont présents.

Etymologiquement, l'hydrologie est « *la science qui traite des eaux* », la définition change d'une époque ou d'un hydrologue à l'autre (Perrin, 2000). Selon Penman (1961), l'hydrologie se définit comme « *la science qui répond à la question : Qu'arrive-t-il à la pluie ?* » Selon le glossaire international d'hydrologie (UNESCO, 1975 ; UNESCO-OMM, 1992), l'hydrologie est « *la science qui traite des eaux que l'on trouve à la surface de la Terre, ainsi qu'au-dessus et en dessous, de leur formation, de leur circulation et de leur distribution dans le temps et dans l'espace, de leurs propriétés biologiques, physiques et chimiques et de leur interaction avec leur environnement, y compris avec les êtres vivants* ». Au sens plus strict, c'est la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature (Fig. I.1) (Anctil et al., 2005). Ce cycle est un système fermé impliquant le transfert et la transformation de l'eau (James et Dooge, 1968).

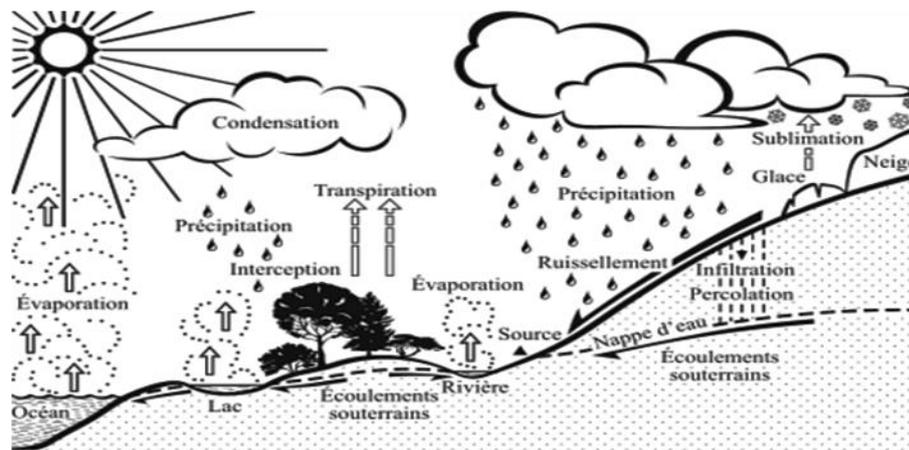


Fig. I.1. Conceptualisation du cycle hydrologique.

Source : Antil et al., 2005.

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 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).

Afin de formuler, à l'échelle locale ou régionale, des lois de conservation correspondant à la partie continentale du cycle de l'eau, il est nécessaire de définir un support géométrique (Castaings, 2007). Étant donné que l'on s'intéresse dans le cadre de cette thèse à l'étude de la transformation de la pluie en débit dans les cours d'eau, la définition du support que constitue le *bassin versant* sera relative à celui-ci. Ainsi, en une section droite d'un cours d'eau, il s'agit de la totalité de la surface qui contribue à l'écoulement de ladite section (Hubert, 2003). L'étendue de cette surface dépend donc de l'endroit où l'on se place sur le cours d'eau (exutoire) et correspond dans la plupart des cas au bassin versant topographique défini par les lignes de crête (Le Xuan, 2008) (Fig. I.2). En outre, ces limites ne correspondent pas toujours aux contours définis par la structure géologique sous-jacente. Ainsi des terres situées en dehors des limites topographiques peuvent être drainées par des couches géologiques qui alimentent le bassin.

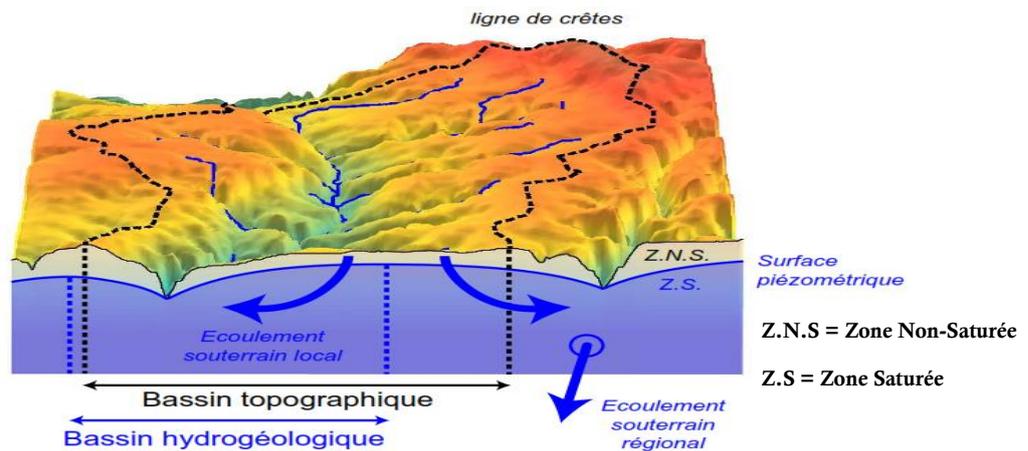


Fig. I.2. Exemple du bassin versant topographique.

Source : *Le Moine, 2008.*

La définition du bassin versant n'est donc pas toujours facile et peut être source d'incertitude dans la démarche de modélisation. A titre d'exemple, les formations karstiques induisent souvent de très fortes différences entre les limites topographique et géologique. Par ailleurs, il faut souligner que le bassin versant est un système vivant, composition complexe hautement hétérogène et en constante évolution. Son analyse fine est éminemment délicate mais source d'une meilleure connaissance. Son analyse globale permet d'en tirer des traits et caractéristiques tout à fait pertinents pour en comprendre le fonctionnement d'ensemble (*Perrin, 2000*).

I.1.1 Processus et composantes d'écoulement

A l'échelle du bassin versant, un nombre important de processus se combinent en fonction des conditions locales, du régime des précipitations ou de la saison. La figure I.3, présente les composantes essentielles du bilan hydrologique sur une vue en coupe d'un bassin versant.

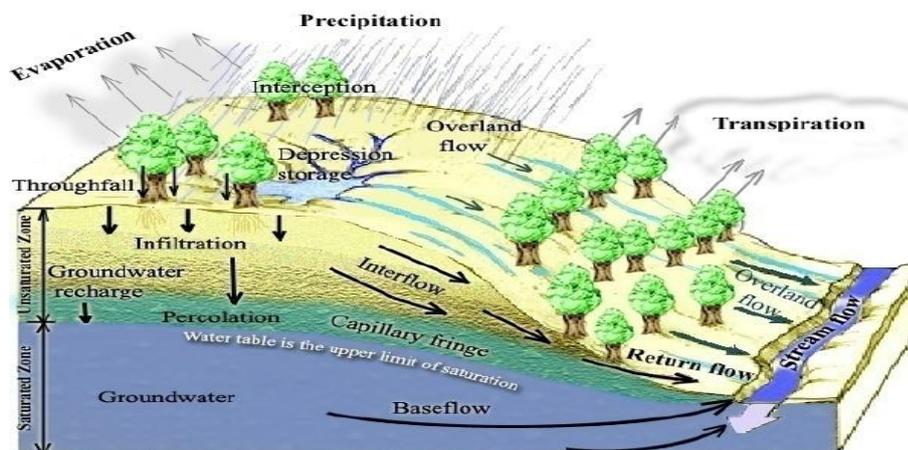


Fig. I.3. Processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant.

Source : *Tarboton, 2003.*

Dans ce qui suit, une description succincte des paramètres du bilan hydrologique afin de mettre en évidence la complexité de la relation pluie-débit :

Les *précipitations*, qui proviennent de manière indirecte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, constituent l'unique source d'alimentation de la partie continentale du cycle de l'eau (Gray, 1972).

L'*interception* est la rétention de la précipitation par la partie aérienne de la végétation. Elle joue un rôle particulier et faiblement visible dans le cycle de l'eau en réduisant le volume d'eau des précipitations qui atteint le sol et alimente les autres processus potentiellement évaporés. Ainsi, elle fait partie des principales causes qu'induisent des différences de production d'écoulement entre un bassin forestier et un bassin dépourvu de végétation (Zannou, 2011). Pour la plupart des modèles hydrologiques l'interception est représentée par un schéma conceptuel d'un réservoir à un ou plusieurs paramètres.

L'*évapotranspiration* englobe tous les phénomènes de transfert de vapeur d'eau à partir de la surface du sol et à travers les stomates des feuilles des végétaux vers l'atmosphère. Elle est une composante essentielle du cycle de l'eau dans la mesure où elle assure le retour d'importantes quantités d'eau vers l'atmosphère à travers un changement d'état.

Le *ruissellement* se produit sur les versants en dehors du réseau hydrographique et l'*écoulement superficiel* désigne la circulation de l'eau en surface dans le réseau hydrographique. La genèse de ces écoulements de surface résulte du dépassement de la capacité d'infiltration d'un sol non saturé (Horton, 1933) ou/et du refus d'infiltration d'un sol saturé (zones contributives saturées d'après Cappus (1960) ; Hewlett et Hibbert (1967) et Dunne et Black (1970)).

Une partie de l'*eau infiltrée* va participer aux écoulements de sub-surface. En effet, lorsque les couches superficielles de sols sont exposées à une averse (*i.e* submersion prolongée), la circulation de l'eau à travers cette zone qualifiée de *zone non saturée* s'effectue principalement de manière verticale sous l'effet de la gravité et des forces de succion. Cependant, la totalité de l'eau infiltrée dans les sols ne circule pas de manière verticale. La stratification des sols associée à la présence de macro-pores dans les couches supérieures permettra à une partie des eaux de cheminer de manière latérale pour constituer l'*écoulement hypodermique* ou *sub-superficiel* (Fig. I.4). Cette composante d'écoulement, dans certains cas qualifiés de nappe perchée temporaire contribue à la saturation des horizons superficiels.

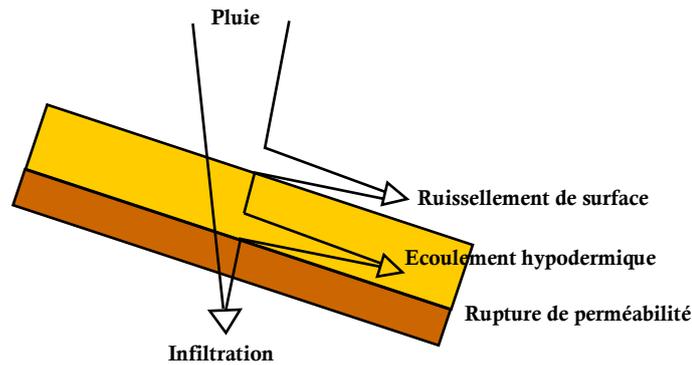


Fig. I.4. Ruissellement de surface, écoulement hypodermique et infiltration.

Source : CORPEN, 1997.

La majeure partie de l'eau infiltrée va lentement rejoindre la nappe pérenne (par gravité, par *percolation* à travers les fissures du socle rocheux) alimentant la rivière après une absence prolongée de précipitations. Cet écoulement siégeant dans des horizons relativement profonds est appelé *écoulement de base* ou *écoulement souterrain*.

En définitive, la combinaison dans le temps et dans l'espace de ces différentes composantes de la partie continentale du cycle de l'eau va constituer la réponse hydrologique d'un bassin versant soumis à des précipitations atmosphériques.

I.1.2 Processus identifiés et facteurs influençant les écoulements

La réponse hydrologique à l'exutoire d'un bassin versant est le résultat le plus souvent de la combinaison de plusieurs facteurs dont un certain nombre (pluviométrie et autres paramètres météorologiques, états de surface, etc.) influence la productivité des écoulements par le bassin (Rodier, 1964 ; Servat et Dezetter, 1991 ; Latron et Gallart, 2008). Évidemment, les activités humaines ont aussi un impact sur les écoulements.

La pente étant le moteur principal des écoulements latéraux de surface et de sub-surface, parmi les caractéristiques du bassin versant, celle dont l'hétérogénéité spatiale est à la fois la plus évidente et la plus influente est la morphologie du bassin. L'étendue de la surface de réception des précipitations, sa forme (allongée ou en éventail). On peut en dire de même de l'ensemble hiérarchisé et structuré des chenaux qui assurent le drainage superficiel permanent ou temporaire (structuration du réseau hydrographique) et de ses attributs (topologie, longueur et pentes caractéristiques, densité) (Castaings, 2007).

L'incroyable variabilité spatiale des propriétés de surface (occupation des sols, végétation) entraîne directement ou indirectement une extraordinaire complexité des processus de surface (ruissellement de surface, évapotranspiration, interception) et de sub-surface (infiltration). La

texture du sol qui est un élément clé de l'hydrodynamique des sols, n'est à l'échelle du versant naturel que l'un des nombreux éléments déterminant l'infiltrabilité (*Le Xuan, 2008*).

Une description précise, des réseaux de drainage et de la variabilité des propriétés hydrodynamiques du sous-sol, rendrait indispensable la description de l'ensemble des caractéristiques agro-pédogéologiques du milieu (profondeur, structure et texture des sols, activité biologique, degré de compactage, fluctuations des propriétés avec la profondeur, etc.). Cette complexité, à l'origine de processus fortement non-linéaires dont la compréhension et la représentation mathématique constituent encore des problématiques de recherche scientifique.

I.1.3 Variabilité hydro-pluviométrique et analyse pluie-débit

La relation « pluviométrie-écoulement », ainsi que sa variabilité spatio-temporelle, est encore mal comprise à l'échelle régionale voire locale. Les principales études ont, jusqu'à présent, été menées à partir des données hydrologiques acquises sur de grands bassins versants (de l'ordre de 10 000 à 100 000 Km²) par des approches indirectes ou conceptuelles du type tests statistiques, calculs des coefficients de tarissement, etc. (*Mahé et Olivry, 1999 ; Mahé et al., 2000*). Cette relation « pluie-débit », traduite par le fait que les baisses de précipitations engendrent des baisses d'écoulement encore plus importantes. L'explication avancée est que la diminution relativement plus importante des débits trouve son origine dans une réduction durable des apports en eau souterraine. La validation de cette hypothèse nécessiterait une analyse des processus physiques à une échelle comparable à celles des observations de surface, c'est-à-dire des données piézométriques disponibles sur plusieurs milliers de kilomètre carré sur la période pluri-décennale des observations de débits (*Kamagaté, 2006*). Mais des éléments de réponse peuvent cependant être apportés par la caractérisation des processus physiques affectant les différents réservoirs hydriques d'un bassin versant représentatif, étudié sur des années à pluviométrie et écoulement contrastés.

I.2 Modélisation hydrologique

I.2.1 Définition du terme modèle

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système physique donné et des différents processus explicatifs de son fonctionnement, la représentation du système peut être physique et reposer sur un modèle réduit du système. Elle est plus souvent mathématique. Mentionnons que par un abus de langage, le terme de modèle est souvent employé à la place de « *système de modélisation* » (*Hingray et al., 2009*).

Dans le cadre de notre étude, nous retenons pour modèles, les outils mathématiques qui sont constitués d'équations algébriques et différentielles qui relient les causes (appelées *variables*) aux

effets (appelés *grandeurs à modéliser*), toutes ces quantités, étant de nature numérique (Dreyfus *et al.*, 2002). Le modèle hydrologique répond à cette définition avec, pour variables, les précipitations, le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration et la variable à modéliser, le débit à la sortie du bassin.

Autrement, on entend par modélisation hydrologique, l'application d'expressions mathématiques et logiques qui définissent les relations quantitatives entre les caractéristiques d'un écoulement (sortie) et les facteurs influant sur ses valeurs (entrées). Et parce que les pluies constituent les variables prépondérantes des modèles hydrologiques, ceux-ci sont souvent tout simplement désignés par modèle *pluie-débit* (Fig. I.5) (Yonaba, 2009).

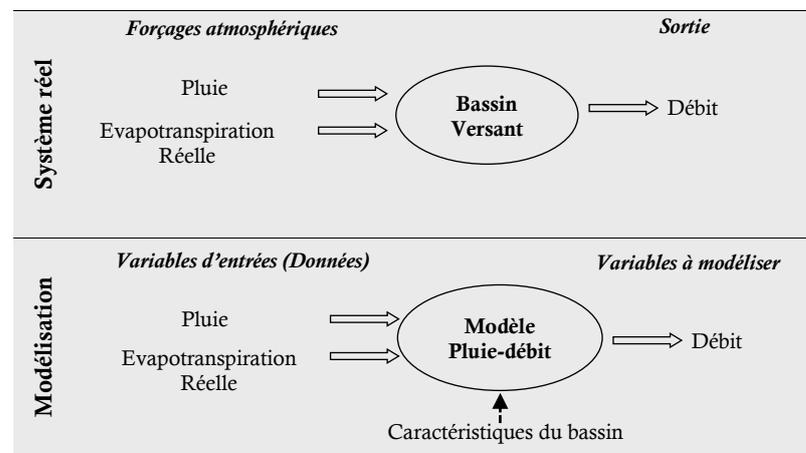


Fig. I.5. Représentation schématique de la modélisation hydrologique pluie-débit.

Source : Gérard, 2010.

Il est essentiel de noter ici, qu'un modèle hydrologique n'a pas pour but de serrer au plus près la réalité des phénomènes qui se déroulent dans un bassin versant, mais de constituer un outil efficace pour résoudre des problèmes pratiques sur les ressources en eau (Jacquet, 1971), telle qu'elle est perçue par le modélisateur. Par ce fait, il est lui-même un instrument de connaissance et de reproduction de connaissance (Nascimento, 1995). Comme l'affirme Bonitzer (1993) « lorsqu'on représente un phénomène par un autre, il faut bien un commencement d'explication théorique pour justifier cette mise en correspondance ». En effet, la complexité infinie de la réalité, d'une part, et les restrictions d'ordre pratique imposées par les questions auxquelles le modèle doit donner des réponses, d'autre part, font qu'un modèle sera toujours une représentation incomplète de la réalité. *Le modèle est donc une image de la réalité modélisée par oubli de nombreuses propriétés jugées non pertinentes pour les questions posées* (Roche, 1988).

La recherche d'un modèle représentant le fonctionnement d'un système (bassin versant) est connue sous la définition de *problème d'identification*. Résoudre le problème d'identification signifie trouver un *algorithme* (une structure formelle) permettant de décrire les lois de comportement supposées régir le fonctionnement du système (Fig. I.6). On appelle cette phase

codage (Rosen, 1991 ; Banks, 1998). Il s'agit de simuler l'évolution spatio-temporelle de certaines *variables pronostiques* ou *de sortie* (e.g. le ruissellement) en réponse à l'évolution spatio-temporelle de certaines *variables de forçage* ou *d'entrée* (e.g. les précipitation), en tenant compte, éventuellement, de l'évolution d'un certain nombre de *variable d'état* ou *variables internes* (e.g. l'état d'humidité du bassin) (Zin, 2002).

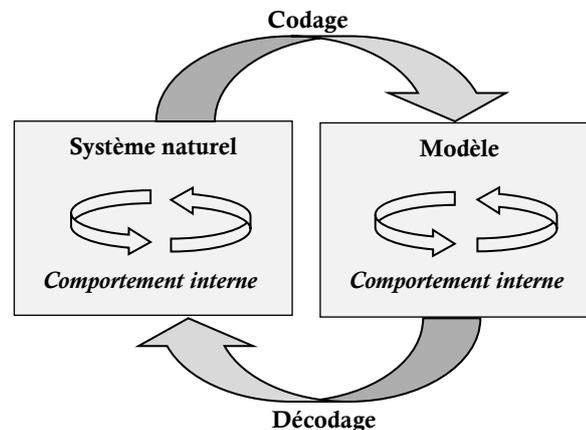


Fig. I.6. Schématisation du processus d'identification d'un modèle.

Source : Gupta et Sorooshian., 1985 ; Rosen, 1991.

Des informations caractéristiques du système étudié sont généralement prises en compte dans les modèles. Il peut s'agir de caractéristiques mesurables (avec une certaine précision) du système, et donc directement utilisables en tant que variables d'entrée du modèle. D'autres caractéristiques spécifiques du système peuvent avoir une nature plus subjective, car relatives à la description formelle que l'on fait du système étudié. Elles constituent donc une projection mathématique de notre connaissance, et sont dépendantes des échelles spatio-temporelles de description du système. Ce sont les *paramètres* du modèle (Le Lay, 2006) (Fig. I.7).

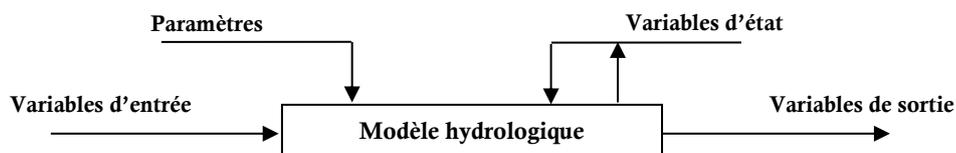


Fig. I.7. Variables d'un modèle hydrologique.

Source : Gaume, 2002.

Le développement d'un modèle hydrologique repose sur trois éléments :

- Le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définissent 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* ;

- 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. Nous nous intéresserons plus particulièrement dans ce travail de recherche à la représentation de la *transformation de la pluie en débit* ;
- Le choix d'une formulation de la réalité. 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 (*Kauark-Leite et Nascimento, 1993*). 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.

D'après Thom (1979), il est possible de construire un nombre infini de modèles sur une réalité particulière. Ce sont les questions posées à priori qui sont les balises capables de retreindre le choix du modélisateur. Il souligne qu'un modèle n'est utile que lorsqu'il donne des réponses satisfaisantes aux questions se trouvant à l'origine de son développement.

I.2.2 Critères de qualité d'un modèle

Lors de l'élaboration d'un modèle, l'ambition de l'hydrologue est d'obtenir un outil le plus performant possible. Il est de coutume d'apprécier la qualité d'un modèle et ses aptitudes selon certains critères tels que la *robustesse* et la *sensibilité*. On souhaite en effet que le modèle ne diverge pas lorsqu'on modifie légèrement la valeur de ses facteurs d'entrée à cause d'erreurs sur les entrées (*robustesse*), mais qu'il soit sensible aux variations significatives des facteurs dont on cherche à simuler les effets, *e.g.* un changement d'occupation des sols (*sensibilité*) (*Chkir, 1994 ; Zin, 2002*).

De même, le *principe de parcimonie* doit être respecté : Parmi les différents modèles pouvant répondre à certains objectifs et hypothèses de travail, il est généralement conseillé de choisir le modèle le plus simple. Cela revient à choisir le modèle comportant le plus petit nombre possible de paramètres (et de relations non linéaires), car il s'agit de quantités non mesurables. Andersson (1992), ainsi qu'Ambroise (1999), rappellent que la complexité d'un système de modélisation ne doit pas être confondue avec la précision de ses résultats. Il s'agit d'un paradoxe bien connu par les hydrologues : si l'on veut représenter plus finement le fonctionnement d'un système, il est nécessaire d'augmenter l'information qu'il faut fournir au modèle, notamment pour la spécification des valeurs de ses paramètres. Etant donné que les observations sont généralement limitées, quand on augmente la complexité du modèle, on augmente aussi ses degrés de liberté, diminuant ainsi sa robustesse et sa performance (*Jakeman et Hornberger, 1993*).

Bergström (1991), Lindström *et al.* (1997) ont discuté la notion de complexité optimale du modèle au regard des données disponibles et des objectifs du modèle. Dix-sept ans plus tard, Fenicia *et al.* (2008) rappellent encore qu'augmenter la complexité du modèle n'améliore pas nécessairement ses performances et mettent en avant la recherche d'un équilibre entre une modélisation trop complexe qui est inapplicable et une modélisation simplifiée à l'excès dans le but de s'adapter aux données, l'empêchant de représenter la complexité du bassin versant. Gupta *et al.* (2008) insistent par ailleurs sur la nécessaire adéquation de la complexité du modèle à la quantité d'information contenue dans les données disponibles.

I.2.3 Critères de performance

En 1982, Linsley déplorait l'accroissement pléthorique du nombre de modèles qui a pour effet de limiter les possibilités de comparaison des résultats des expériences de modélisation. On peut malheureusement faire un constat similaire au sujet des critères de performance : les hydrologues choisissent très souvent des critères qui leur sont propres (ou raffinent des critères utilisés largement par la communauté), ce qui entraîne la même conséquence. Dans leur étude, Dawson *et al.* (2007) proposent un ensemble varié de critères pour l'évaluation de modèles hydrologiques. Parmi ces critères, les critères d'erreur quadratique. Ils se basent sur une fonction suggérée par la régression linéaire, très connue dans le domaine des statistiques, somme des erreurs quadratiques du modèle définie par l'équation I.1 (Dawdy *et O'Donnell*, 1965) :

$$F^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{cal},i})^2 \dots\dots\dots (I.1)$$

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 normaliser la fonction en effectuant une comparaison de F^2 avec ce même critère appliqué à un modèle élémentaire. Ils ont pris comme modèle $Q = \text{cste}$ et ont calé ce modèle élémentaire, ce qui donne $\text{cste} = \bar{Q}_{\text{obs}}$, la moyenne des débits. Pour ce modèle élémentaire, utilisé comme référence, la fonction F^2 devient F_0^2 définie comme suite (Perrin, 2000) :

$$F_0^2 = \sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2 \dots\dots\dots (I.2)$$

Ce qui correspond à la variance des débits observés. Nash et Sutcliffe (1970) construisent ainsi un critère d'efficacité R défini comme la proportion de la variance initiale des débits expliquée par l'équation I.3:

$$R = 1 - \frac{F^2}{F_0^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \dots\dots\dots(I.3)$$

Ce critère adimensionnel (que nous appellerons critère de Nash-Sutcliffe ou critère de Nash), variant dans l'intervalle $]-\infty, 1]$ à 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. Il vaut 1 (ou 100%) si le modèle est parfait (l'erreur du modèle est nulle). 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. Ce critère d'évaluation des modèles est très largement utilisé en hydrologie.

Cependant, est-il nécessaire d'employer une multitude de critères ? En effet, afin de se faire l'idée la plus juste de ses capacités prédictives. Cela suppose d'examiner le modèle sous des angles différents, c'est-à-dire par des critères de performance complémentaires. Cependant, on peut multiplier les critères en raffinant indéfiniment les critères. Outre, le fait que cette démarche diminue les capacités de communication entre hydrologues, il est intéressant de savoir si cela apporte réellement de l'information nouvelle : si plusieurs critères sont employés, il est nécessaire d'évaluer les corrélations entre ces critères (*Weglarczyk, 1998*).

I.2.4 Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit

La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses problématiques centrées sur l'eau. Michel (1989) ; Refsgaard et Abbott (1996) répertorient l'essentiel de ces problématiques à savoir :

- *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) (*Sefton et Howarth, 1998*) ;
- *Prédétermination des débits de crue ou d'étiage* : on désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé) risquent de se produire, et sur quelle durée. 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* (*Moore, 1999*) : 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 ;

- *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. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés. De nombreux auteurs ont étudié ces problèmes en utilisant des modèles pluie-débit. A titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de Cameron *et al.* (1999) et Uhlenbrook *et al.* (1999) sur la prédétermination des crues, ceux de Xu et Vandewiele (1995) et Yang *et al.* (1995) respectivement sur le dimensionnement et la gestion de réservoirs, ou ceux de Da Ros et Borga (1997) et Yang et Michel (2000) sur la prévision des débits.

I.3 Calage, validation et incertitude d'un modèle

Différentes procédures de la modélisation de la relation pluie-débit ont été proposées dans la littérature. Il est cependant possible de trouver une structure commune à l'ensemble des procédures proposées. Elle est composée des étapes suivantes (Fig. I.8) :

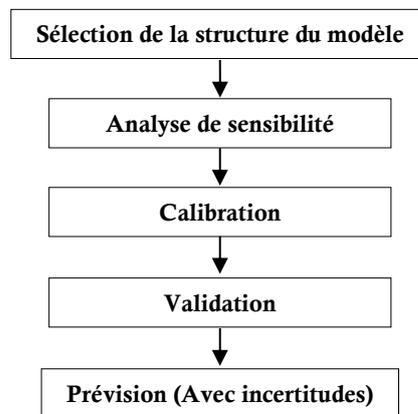


Fig. I.8. Procédure (standard) simplifiée pour la modélisation de la relation pluie-débit.

Source : Wagener *et al.*, 2004.

I.3.1 Sélection de la structure du modèle

Le choix de tel ou tel modèle reste toujours une étape délicate dans la mesure où nous n'avons pas d'idée au préalable des processus hydrologique qui peuvent intervenir dans le bassin. Il n'existe pas de méthode objective pour choisir la structure la mieux adaptée à l'objectif de modélisation et il reste une part de subjectivité dans le choix de cette structure. Par ailleurs, la performance d'un modèle est liée à son niveau de complexité ainsi qu'au nombre de données disponibles. La relation entre ces trois composantes est illustrée par la figure I.9 proposée par Grayson *et al.* (2002).

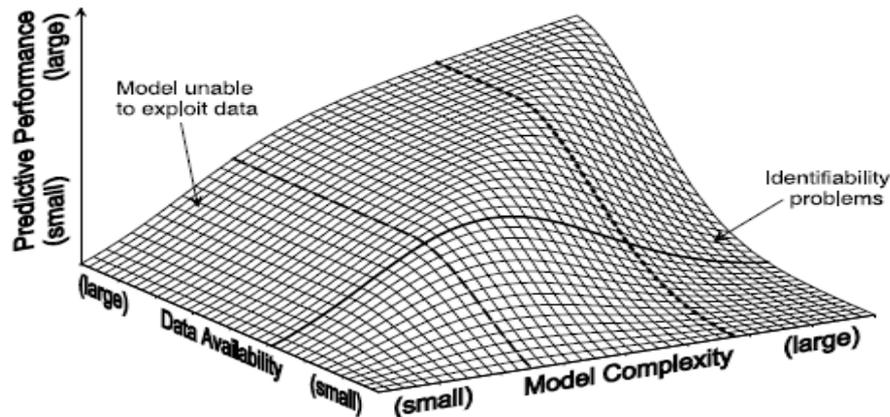


Fig. I.9. Relation conceptuelle entre le niveau de complexité, la disponibilité des données et la performance du modèle.

Source : Grayson *et al.*, 2002.

Pour une quantité de données disponibles (trait plein sur la figure I.9), la performance du modèle passe par un maximum pour une complexité du modèle donnée, c'est le calage optimal. Si le modèle est trop complexe, les paramètres du modèle à déterminer sont trop nombreux par rapport aux données disponibles pour obtenir un calage satisfaisant et la performance du modèle est alors réduite. Inversement, si le modèle est trop simple, il ne peut pas exploiter toutes les informations disponibles et sa performance est moindre. Parallèlement, pour un modèle donné (trait discontinu sur la figure I.9), la performance du modèle est maximale pour une certaine quantité de données disponibles. Si le nombre de données augmente, le modèle doit être plus complexe pour pouvoir exploiter toute la richesse des données disponibles.

I.3.2 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à étudier comment les perturbations sur les entrées du modèle engendrent des perturbations sur la réponse. Les entrées du modèle sont les paramètres, les conditions initiales et aux limites. Cette analyse peut avoir lieu à deux stades différents du processus de modélisation. Elle peut être placée avant l'étape de calibration afin d'identifier les paramètres les *plus importants* par rapport à la performance du modèle. Les paramètres les moins sensibles sont eux généralement fixés à des valeurs adaptées pour réduire la dimensionnalité du processus de calage (Bastidas *et al.*, 1999). L'analyse de sensibilité peut aussi avoir lieu après le processus de calage pour juger si les paramètres ont bien été identifiés ou non.

I.3.3 Calage et validation

Tous les modèles existants nécessitent un calage. Ce calage se fait en modifiant les paramètres, à partir d'une estimation initiale, pour que le modèle ait ses sorties les plus proches possibles de

celles du bassin versant à modéliser. Au sens strict du terme, c'est l'opération qui consiste à trouver les valeurs des paramètres du modèle qui minimisent l'erreur de modélisation. Cette opération peut se faire manuellement ou automatiquement (*Madsen, 2000 ; Cudennec, 2000*).

Une fois le modèle hydrologique implémenté sur un bassin versant donné, se pose ensuite la question de savoir quelle est la capacité du modèle à simuler le présent ou le futur ? C'est l'étape de validation qui doit répondre à cette question. Cette étape consiste à vérifier la reproductibilité des résultats par le modèle et la représentativité des paramètres calés (*Gnouma, 2006*).

Plusieurs schémas de calage et de validation ont été ainsi proposés par la communauté scientifique telle que le schéma de Klemeš (1983). Une explication plus détaillée sur ce schéma peut être trouvée dans la thèse d'Indarto (2002). Deux approches sont très utilisées par les hydrologues :

- Une approche classique de validation qui consiste à choisir aléatoirement une partie des données pour le calage des paramètres du modèle et une seconde partie pour la validation sans changement des valeurs des paramètres. C'est l'étape de *validation interne* qui a pour objectif d'analyser la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres qui le constituent ;
- Une approche basée sur la validation multicritère et multi-échelle appliquée à l'ensemble du bassin. C'est l'étape de *validation externe*. Elle consiste à confronter les résultats du modèle à une réalité. C'est-à-dire concrètement à des données (hydrogrammes mesurés sur des stations intermédiaires, niveaux piézométriques, etc.) qui n'ont pas été utilisées pour le construire. Il importe de bien veiller à ce que la validation externe d'un modèle ne soit pas conduite sur des données qui ont servi à l'établir.

I.3.4 Incertitude

« Nous devons avoir conscience de l'incertitude de nos raisonnements à cause de l'obscurité de leur point de départ » (Bernard, 1865)

Les modèles, par nature, ne sont que le reflet de l'état de nos connaissances d'un système. Or, il convient de reconnaître que cette connaissance est pour le moins incomplète. A cela s'ajoutent les approximations inhérentes à la description mathématique (*i.e* la conceptualisation) de ce système que constituent les modèles. La question de ces incertitudes en modélisation hydrologique est traitée dans ce qui suit, à travers la présentation des principales sources d'incertitudes (Fig. I.10).

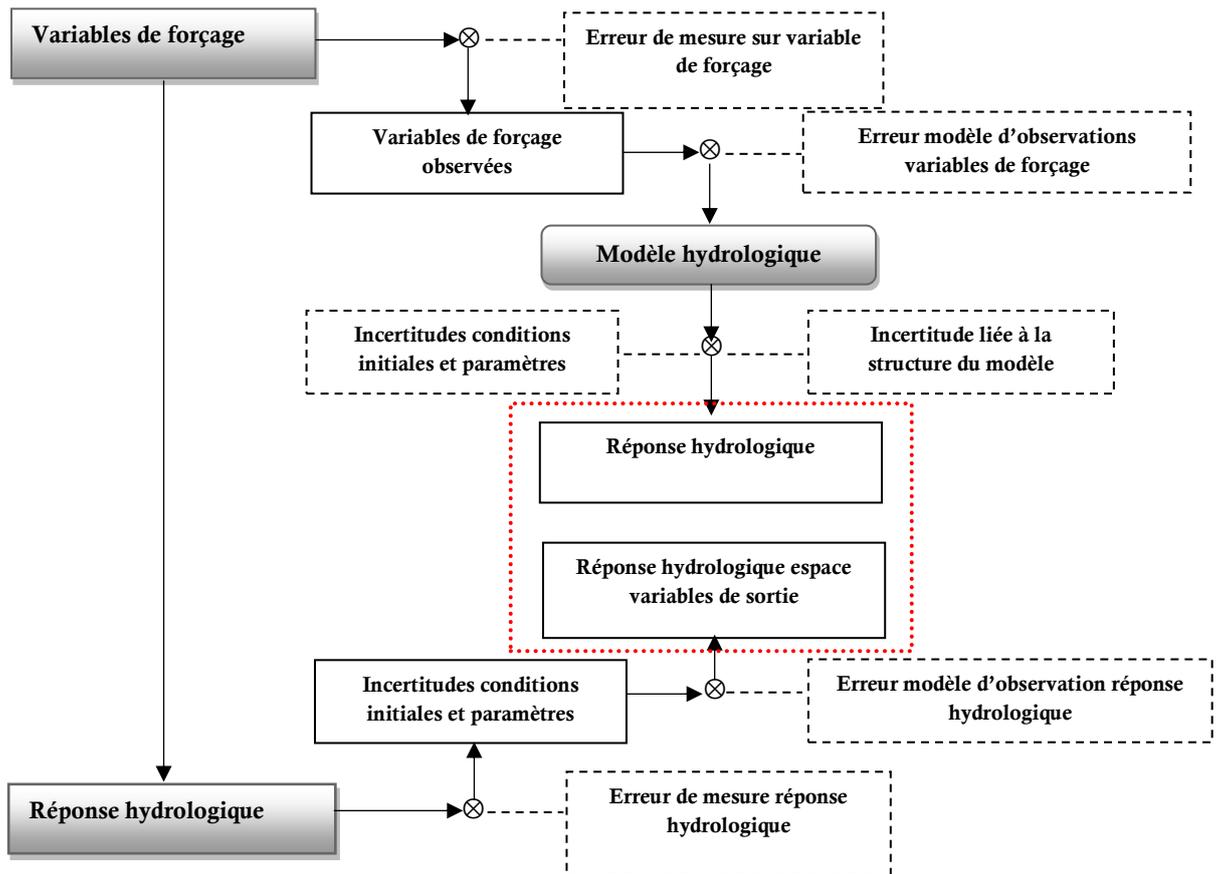


Fig. I.10. Source d'incertitudes liées à la modélisation hydrologique.

Source : Castaings, 2007.

- *Structure du modèle* : Les modèles, y compris les plus complexes, ne sont que de grossières approximations de la réalité, par manque de théorie adéquates ou par incorporation partielle des théories existantes ;
- *Quantité et qualité des données* : Les observations disponibles pour la modélisation sont également une source importante d'incertitude, et ce, qu'il s'agisse de variable de forçage ou de variable pronostiques. De nombreux travaux se sont intéressés à cette source d'incertitudes. Parmi les approches utilisées, on distingue l'analyse de la propagation de perturbations dans les données (Paturel et al., 1995) et l'analyse des effets de la dégradation des données sur les simulations et les paramètres (Andréassian et al., 2001 ; Andréassian et al., 2004 ; Oudin et al., 2005) ;
- *Spécification des paramètres* : Si le rôle du calage est avant tout d'estimer les paramètres inconnus, il est aussi, de façon implicite, à compenser les erreurs liées au modèle ou aux données. Troutman (1983), montre que le processus de calibration transfère ces erreurs dans les paramètres du modèle, sous forme de biais dans leurs valeurs. Par conséquent, le choix de valeurs de paramètres optimales est une étape délicate, source d'incertitudes importantes ;

- *Transfert d'échelles* : La description des processus, telle qu'elle est réalisée dans les modèles hydrologiques, est appliquée à des échelles spatiales variant de quelques Km²(pour les modèles distribués) à la taille du bassin versant (pour les modèles globaux), et des échelles temporelles comprises entre quelques minutes et plusieurs jours. Au contraire, la plupart des techniques de mesure disponibles en hydrologie sont limitées à l'échelle ponctuelle, ce qui pose le problème de leur représentativité à des échelles supérieures : que vaut une conductivité hydraulique à saturation, mesurée sur une colonne de sable de quelques dizaines de cm² à l'échelle d'un bassin versant de plusieurs Km²? Pour effectuer ce transfert d'échelles, plusieurs approches sont possibles :
 1. La recherche d'une équivalence entre les paramètres des modèles et les mesures, par agrégation (*up scaling*) des valeurs locales ;
 2. La mise à l'échelle (*scaling*) des lois ponctuelles ;
 3. La spatialisation des mesures locales.

I.4 Classification des modèles pluie-débit

L'approche de modélisation pluie-débit sont diverses, il existe une pléthore de modèles (Maréchal, 2004). Beven (2001) a mentionné sa tentative d'établir une liste exhaustive de modèles pluie-débit près de 25 ans et son abandon de la tâche quand il a atteint 100 modèles. Cette abondance est une conséquence légitime suite aux différentes approches possibles sur la manière de représenter la réponse d'un bassin versant à des événements pluviométriques.

Il serait hasardeux de vouloir reprendre ici une classification des types de modèles hydrologiques tant il y a presque autant de classifications que d'auteurs qui ont abordé le sujet. Rappelons à titre d'exemples les références suivantes : Singh (1995), Singh et Woolhiser, (2002), Clarke (1973), Beven (1989), Wurbs (1998), Ambroise (1998), Andréassian (2002), Oudin (2004), pour ne citer qu'eux. Nous allons néanmoins rappeler quelques termes récurrents pour justifier notre démarche. Si l'on devait n'utiliser qu'un seul terme pour caractériser un modèle hydrologique, il serait :

- déterministe ou stochastique ;
- global, distribué ou semi-distribué ;
- empirique, conceptuel ou théorique.

Dans la suite, une description détaillée est présentée pour les trois groupes.

I.4.1 Déterministe ou stochastique

Marsily (1994) distingue les modèles qui s'attachent à reproduire des phénomènes observables (les modèles déterministes) de ceux qui décrivent des phénomènes non observables (les modèles stochastiques ou probabilistes) dans lesquels les paramètres qui représentent le milieu ou le phénomène étudié sont décrits par des lois de probabilité. Ces deux types de modèles ne sont pas exclusifs l'un de l'autre : Cernesson (1993) a ainsi associé un modèle stochastique de pluie avec un modèle déterministe de transformation de la pluie en débit.

Un modèle déterministe (*Deterministic model*) s'appuie sur la description du bassin versant et prend en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol, etc.). Les modèles déterministes ont pour application la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages hydrauliques ou pour la prévision des crues, la délimitation des zones inondables, la gestion du territoire, la quantification des impacts potentiels des changements climatiques (*Fouchier, 2010*).

Un modèle stochastique (*stochastic model*) sert à établir des critères de conception d'ouvrages (par exemple, le dimensionnement des évacuateurs de crue) ou à vérifier les performances d'ouvrages existants. Jensen (1993) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Les difficultés rencontrées avec ce type de modèle sont d'une part les incertitudes liées aux extrapolations quand les séries d'observations utilisées sont courtes, et d'autre part l'impossibilité d'étudier, par le biais de ces modèles, les conséquences des modifications des bassins versants (*Michel, 1989*).

I.4.2 Global, distribué ou semi-distribué

Le modèle global (*Lumped model*) (Fig. I.11) décrit le comportement du bassin dans son ensemble à partir des observations faites sur le terrain. Cette approche grandeur nature permet une certaine souplesse en ce sens qu'elle permet de tester différentes hypothèses à partir des données obtenues directement à l'échelle du bassin. On ne cherche pas à aller dans le détail des lois qui régissent le système, mais plutôt à trouver des relations entre les différentes variables du système (*Dooge, 1973 ; Sivapalan et al., 2003*).

L'un des plus graves dangers qui menace cette approche, c'est la tentation de la *théorie unitaire*, du modèle englobant ayant réponse à tout, capable de tout prévoir. De Rosnay (1975) prône donc l'approche systémique opérationnelle comme une des voies permettant d'éviter les dangereux écueils du réductionnisme paralysant et du systémisme englobant. Parmi les modèles globaux qui existent dans la littérature on peut citer : le modèle GR (*Edijatno et Michel, 1989*),

Les modèles GR4J (Perrin, 2000), TANK (Sugawara, 1979), MODGLO (Servat, 1986), GRHUM (Loumagne et al., 1996).

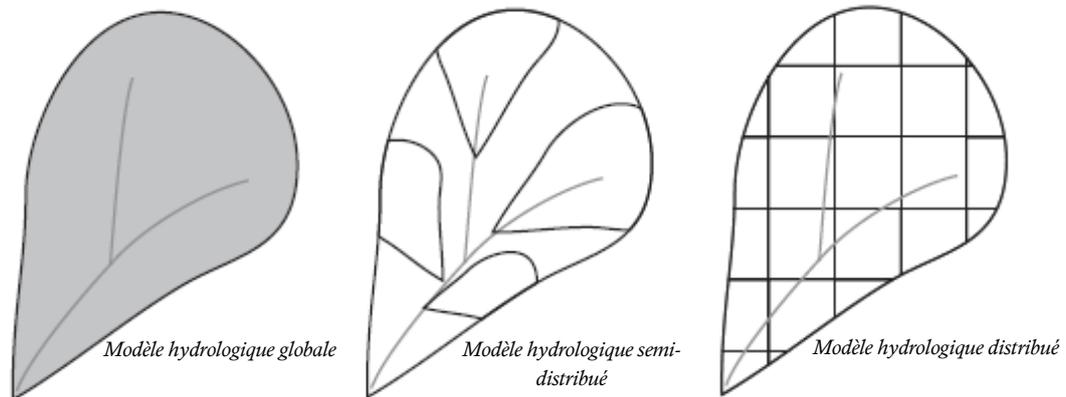


Fig. I.11. Représentations schématiques des modèles hydrologiques globale, semi-distribué et distribué.

Source : Lerat, 2009.

Le modèle distribuée (*Distributed model*) (Fig. I.11) dérive probablement du second précepte de Descartes énoncé dans son célèbre discours de la méthode. Il s'agit « ...de diviser chacune des difficultés que j'examinais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour mieux les résoudre » (Descartes, 1637). Les données sont donc recueillies et traitées sur des unités parcellaires (ou mailles) à petites échelles. L'avantage d'une telle approche est qu'elle permet une description détaillée à petite échelle. S'ensuit une agrégation des informations obtenues sur chaque unité pour avoir la réponse de l'ensemble du bassin. L'approche analytique cherche à ramener le bassin à ses éléments constitutifs les plus simples afin de les étudier en détail et de comprendre les types d'interactions qui existent entre eux. Puis, en modifiant *une variable à la fois*, d'en déduire des lois générales permettant de prédire les propriétés dans des conditions très différentes (De Rosnay, 1975). Néanmoins, ce type de modèle pose de nombreux problèmes. A titre d'exemple, nous pouvons citer le problème de surparamétrisation. Le nombre de paramètres possible est en effet croissant avec l'augmentation du nombre de mailles ou d'unités de modèle (Beven, 1989).

On peut citer en exemple des modèles tels SHE d'Abbott *et al.* (1986), HYDROTEL de Fortin *et al.* (2001), IHDM de Rogers *et al.* (1985), SLURP Model de Kite (1995), TOPKAPI Model de Todini (1995), HMS de Yu (1996), DHSVM de Wigmosta *et al.* (1994) et SHETRAN de Ewen *et al.* (2000).

Le modèle semi-distribué (*semi-distributed model*) (Fig. I.11) est intermédiaire entre les deux précédents. Le bassin est généralement divisé en deux, trois ou quatre sous-bassins analysés individuellement à l'aide d'un modèle global. Les caractéristiques hydrologiques des sous-bassins sont relativement plus homogènes que le bassin pris dans son entier.

I.4.3 Empirique, conceptuel ou théorique

Lorsqu'on parle d'approche empirique (*empirical, lumped model*), il s'agit d'établir des relations entre la grandeur à modéliser et les facteurs qui la déterminent mais on n'est jamais sûr que les facteurs retenus expliquent à eux seuls la grandeur à modéliser. En plus, les facteurs qui déterminent la grandeur à modéliser ne sont pas toujours mesurés ni même souvent tous mesurables : on reste donc dans un cadre statistique (*Dreyfus et al., 2002*). C'est pourquoi on parle souvent de modèles probabilistes. En hydrologie, ces modèles sont pour la plupart globaux. Le modèle empirique ou *boîte noire* est une description paramétrée du processus dont tous les paramètres doivent être déterminés à partir des mesures effectuées. Bâtie essentiellement à partir de l'analyse des données, cette approche fonctionne très bien en interpolation mais est moins appropriée en extrapolation. L'absence d'idée préconçue dans leur construction leur permet une évolution plus rapide vers des réponses efficaces à des problématiques données. Leur développement reste cependant très dépendant de la disponibilité des données. Des exemples de ce type de modèles sont les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks) (*Hsu et al., 1995*), les modèles GR (*Edijando et Michel, 1989 ; Loumagne, 1988*) et le modèle SCS. Ces modèles considèrent généralement le bassin versant comme une entité unique (*Bessiere, 2008*).

Les modèles conceptuels (*conceptual, grey box*) ne se fondent pas sur des lois hydrologiques en quelque sorte. C'est peut-être la raison pour laquelle ils sont appelés conceptuels (*Yang, 1993*). Le modèle conceptuel tente d'intégrer la complexité des processus en essayant de reproduire plus simplement le concept physique du comportement du système. Ambroise (1998) considère le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés (on parle aussi de modèle à *réservoirs*) et qui censés représenter plusieurs niveaux de stockages, suivant une dimension verticale. Ce type de modèle garde un sens physique même s'il ne représente pas une description exacte de l'ensemble des processus en jeu (*Chkir, 1994*). Le GR4J est un exemple de modèle conceptuel, pour des applications en ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs) sur des bassins jaugés et non jaugés.

Les modèles théoriques sont régis par des équations mathématiques paramétrées bien connues. Encore appelés *modèles de connaissance* ou *modèles physiques* (*physically-based, white box*), ils sont fondés sur les principes mécanistes de conservation de la masse, du moment et de l'énergie. Concrètement, les équations qui génèrent ces modèles sont issues des lois de la mécanique des fluides ou de la physique des écoulements d'eau dans les sols (loi de Richards en milieu non saturé, loi de Darcy en milieu saturé et loi de Barré Saint-Venant pour le ruissellement de surface). Ils ont été développés dans l'espoir que la représentation physique de leurs processus était suffisamment réelle pour que leurs paramètres soient directement reliés aux caractéristiques physiques du bassin versant sans processus de calibration (*Todini, 1988*). Par exemple, ces

paramètres sont représentatifs de l'humidité du sol, de la conductivité hydraulique dans la zone non saturée, etc.

Les modèles à base physique utilisent une distribution spatiale basée sur des unités élémentaires : une maille carrée régulière ou irrégulière, des triangles irréguliers TINS (Triangular Irregular Networks) (Ivanov *et al.*, 2004), des tubes de courant (Grayson *et al.*, 1992), des versants ou d'autres types d'unités hydrologiques. Cette distribution spatiale permet de représenter la variabilité spatiale des facteurs géographiques et météorologiques qui déterminent la réponse hydrologique. Le modèle SHE (Abbott *et al.*, 1986) et le modèle TOPKAPI (Liu *et Todini*, 2005) sont les exemples les plus connus. Cependant, les modèles à base physique souffrent d'une extrême demande de données, des problèmes d'échelles et de surparamétrisation.

Pour finir, il ne devrait pas y avoir de *conflits* entre ces différents modèles qui ont été développés à des fins différentes (Bergström, 1991). Ainsi, les modèles théoriques sont plutôt utilisés pour une étude fine des processus hydrologiques tandis que les modèles conceptuels correspondent à une approche quasi statistique, où les paramètres correspondent à une moyenne sur l'ensemble du bassin (Miossec, 2004).

I.5 Régionalisation : problématique et motivation

Pour une planification rationnelle et optimale des ressources en eau, il est nécessaire de disposer d'informations acquises au fil du temps (Euclides *et al.*, 2007). Ceci se fait généralement en utilisant des modèles pluie-débit. Ces modèles sont calibrés en introduisant les précipitations observées et les données d'évapotranspiration, et en ajustant les paramètres du modèle pour estimer (Andrews *et al.*, 2011) et prédire les réponses hydrologiques aux changements d'utilisation des terres et de la variabilité climatique. Toutefois, le problème commun à tous les modèles pluie-débit est qu'ils ont tous besoin d'un certain degré de calibration des paramètres pour obtenir des prévisions fiables (Beven, 2001 ; Wagener *et Gupta*, 2005), procédé dans lequel les paramètres du modèle sont ajustés (manuellement ou automatiquement) jusqu'à ce que les sorties observées et simulées du bassin versant soient aussi proches (Duan *et al.*, 1993 ; Gupta *et al.*, 1998). Même les modèles à base physique exigent habituellement un certain degré de calibration car il est difficile d'estimer les valeurs pour tous les paramètres grâce à des mesures sur le terrain.

Le problème s'accroît quand il s'agit de la prédiction dans des bassins non jaugés ou modifiés de façon directe ou indirecte par diverses activités humaines et/ou aménagements (Yadav, 2007). En effet, dans de nombreux cas, le débit approprié pour caler les paramètres du modèle n'est pas disponible dans les régions d'intérêt (Mers *et al.*, 2006). Certains réseaux de mesures permettant l'acquisition des données hydrométriques sont par ailleurs en déclin pour des

questions de coût et de difficulté d'entretien (Hingray et al., 2009 ; Ouarda et al., 1998), c'est pourquoi, il arrive fréquemment que l'on dispose de peu ou même d'aucune information hydrologique. Mais le problème ne reste pas là, de plus et en dehors des données sur les débits tout simplement peu ou pas enregistrées, il y a de nombreuses raisons à l'absence d'un ensemble de données, telles que le changement dans les caractéristiques des bassins versants (l'urbanisation) (Pandey et Nguyen, 1999), ou de longues périodes de pluies hors saisons produire des rapports non représentatifs. En effet, Il s'agit d'un phénomène courant pour les bassins du monde entier et la prévision dans les bassins non jaugés est actuellement considéré comme l'une des tâches les plus difficile de l'hydrologie des eaux de surface (Goswami et al., 2007).

I.5.1 Besoin de méthode pour faire face à des bassins versants non jaugés

Un bassin non jaugé est l'un des dossiers inadéquats (en termes de quantité et de qualité de données). Par définition, « un bassin non jaugé est un bassin qui a une instrumentation hydrologique insatisfaisante pour permettre le calcul du bilan annuel d'une variable hydrologique d'intérêt (le volume d'eau, les précipitations, la quantité de sédiments, etc.), avec une précision acceptable pour des applications pratiques » (Sivalpalan et al., 2003).

Pour estimer une variable hydrologique (par exemple les débits) dans un *bassin non jaugé*, l'hydrologue se trouve face à une multitude d'outils dépendant de données hydrométriques qui généralement, sont limitées, tant d'un point de vue des mesures elles-mêmes (Mosley, 1981 ; Burn et Boorman, 1993), que d'un point de vue des techniques de mesure. Afin de contourner ce problème, plusieurs chercheurs, (Dalrymple, 1949 in Roy, 1993 ; Burn, 1988 ; Sivalpalan et al., 2003) ont suggéré, comme alternative, la *régionalisation* (ou *analyse fréquentielle régionale*), définie comme une approche de transposition d'information acquises sur bassins jaugés (*donneur*) vers des bassins non jaugés (*receveur*) (Riggs, 1973 in Mosley, 1981 ; Joseph et al., 2007 ; He et al., 2011). Dans le cas d'une transposition de paramètres on parle ainsi de *régionalisation les paramètres* d'un modèle (Merz et Blöschl, 2004). Elle fait généralement appel à des modèles de type conceptuel parcimonieux qui ont un nombre restreint de paramètres facilitant leur application (Crabit, 2010).

I.5.2 Approches de régionalisation en hydrologie

Les approches de régionalisation utilisées en hydrologie comprennent en général deux étapes (Ouarda et al., 1999): (1) *la définition et détermination des régions hydrologiquement homogènes*, c'est-à-dire le regroupement des stations ayant un comportement hydrologique semblable et (2) *l'estimation régionale*, autrement dit le transfert à l'intérieur d'une même région hydrologiquement homogène de l'information des sites jaugés (*donneur*) à un site non jaugé ou partiellement jaugé (*receveur*) pour lequel on ne dispose pas d'information suffisante.

Méthodes de recherche de régions homogènes

Dans la définition des régions homogènes, deux grandes tendances apparaissent dans la littérature : les régions définies par des critères géographiques et les régions définies par des critères de similitude hydrologique (*Khalifa, 2011 ; Randrianasolo, 2012*).

Régionalisation basée sur des critères géographiques : Cette approche est une des plus simples, elle fait l'hypothèse que des bassins proches ont de fortes chances d'avoir une réponse hydrologique semblable, car les caractéristiques physiques et climatiques sont relativement homogènes dans une même région (*Blöschl, 2005 ; Sawicz et al., 2011*).

Régionalisation basée sur des similarités physiographiques, climatiques ou hydrologiques : Elle a pour objectif de transposer des informations d'un bassin jaugé (*donneur*) vers un bassin (*receveur*) non jaugé, considéré comme suffisamment similaire physio-graphiquement (*Oudin et al., 2010*). Les caractéristiques des bassins versants prises en compte sont, dans ce cas, considérées comme attributs représentatifs des processus hydrologiques (*Gottschalk, 1985*).

Une approche combinée : Cette approche consiste à combiner les critères géographiques et les attributs des bassins versants. Chaque site est considéré comme le centre de sa propre région ou zone d'influence. L'identification de cette zone d'influence se base sur la mesure de la distance euclidienne dans un espace multidimensionnel de plusieurs attributs des bassins versants. Le donneur (ou le groupe de donneurs) est celui parmi les voisins qui ressemble le plus au bassin non jaugé. Une fonction de poids peut être définie pour refléter les importances relatives de chaque site par rapport au site cible non-jaugé (*Hundecha et Bardossy, 2004*).

Approches de transfert de l'information régionale

Das la littérature, plusieurs études ont été réalisées afin de distinguer la meilleure approche pour transférer les paramètres régionaux, notamment dans le cas de simulation et de prédétermination des débits dans les bassins non jaugés. Les méthodes fréquemment utilisées sont décrites ci-après (*Khalifa, 2011 ; Randrianasolo, 2012*) :

Méthodes basées sur les relations de régression : Les méthodes de transfert d'information des bassins donneurs vers les bassins receveur les plus courantes dans la littérature sont celles basées sur des régressions statistiques. L'objectif ici est de développer des relations a posteriori entre, d'une part, les caractéristiques des bassins versants et, d'autre part, la variable que l'on cherche à expliquer. Une fois la relation de régression établie, elle est utilisée pour déterminer les paramètres d'un bassin non jaugé à partir de ses attributs physiographiques et climatiques. Cette méthode repose sur deux hypothèses sous jacentes :

1. il est considéré qu'une relation bien fondée existe entre les caractéristiques observables du bassin et les paramètres du modèle ;
2. il est admis que les attributs du bassin choisis pour la régression fournissent des informations pertinentes décrivant le comportement du bassin choisi.

Méthodes de transposition : Une approche dite analogique consiste en une transposition de l'information obtenue sur un ou plusieurs bassins jaugés similaires (d'une similarité physique à définir ou d'une proximité géographique), vers le bassin non jaugé. La valeur de paramètre recherché est alors la moyenne pondérée des valeurs des paramètres des bassins similaires, le poids de chaque bassin étant relatif à sa proximité géographique (les bassins les plus proches ont donc plus de poids). Les informations transposées peuvent cependant être également les paramètres d'un modèle hydrologique : le jeu de paramètres d'un bassin jugé analogue est transposé tel quel au bassin non jaugé (Luyet, 1990 ; Rojas Serna et al., 2006 ; Exbrayat et al., 2011).

Méthodes basées sur la géostatistique : Une troisième approche de transfert d'information vers les bassins non jaugés consiste à utiliser des méthodes d'estimation régionale basées sur la géostatistique (Merz et al., 2000 ; Sauquet, 2006). Cette approche est souvent utilisée pour l'interpolation spatiale des données climatiques (par exemple, les précipitations moyennes ou maximales), mais peut également être appliquée à des variables hydrologiques (des séries de débits) (Sauquet, 2006 ; Archfield et Vogel, 2010). Les techniques de géostatistique les plus courantes sont le krigeage et la pondération selon l'inverse de la distance des paramètres du modèle hydrologique (Parajka et al., 2005 ; Viviroli et al., 2009).

I.5.3 Limites des approches de régionalisation

Bates (1994) conclut, d'après les résultats obtenus dans plusieurs études portant sur la régionalisation de paramètres d'un modèle, que la qualité des simulations obtenues par régionalisation est généralement mitigée. Les raisons invoquées portent essentiellement sur la réelle homogénéité des bassins au sein d'une région et sur les incertitudes liées aux modèles régionaux utilisés pour relier les paramètres d'un modèle à les caractéristiques physiographiques et hydrologiques du bassin versant (Seibert, 1999). En outre, Merz et al., (2006) affirment que la régionalisation peut être fonction de la position géographique ou des caractéristiques du bassin versant. Ils concluent en assurant que les études développées ne permettent pas de trouver de relation satisfaisante entre les paramètres du modèle et les caractéristiques du bassin versant. Arheimer (2005) tire d'ailleurs des conclusions similaires et affirme aussi que l'utilisation des caractéristiques physiographiques en vue d'évaluer les paramètres d'un modèle (dans son cas le modèle HBV) n'est pas concluante. Bergström (2006) montre aussi que les résultats sur les

bassins versants non jaugés sont très dépendants de la qualité des données d'entrée puisqu'aucun calage ne permet pas de pallier la mauvaise qualité de données, donc de bonnes séries de données météorologiques permettent une simulation plus juste des débits sortants. D'autres auteurs supposent quant à eux que les paramètres du modèle sont en fait dépendants des caractéristiques physiques du bassin (*Young, 2006*).

II. État de l'art : Modélisation et régionalisation de la relation pluie-débit

Plusieurs efforts ont été déployés afin de modéliser et de régionaliser la relation pluie-débit. Dans ce qui suit, nous présentons une description globale des travaux réalisés dans ce domaine à l'échelle internationale et nationale.

II.1 A l'échelle internationale

Jarboe et Haan (1974) ont obtenu des relations entre 4 paramètres d'un modèle de bilan d'eau et les caractéristiques (topographie, géologie, etc.) de 17 bassins dans le Kentucky. Les résultats d'application sur six autres bassins non jaugés ont été satisfaisants.

Egbuniwe et Todd (1976) ont réalisé une étude dans deux sous-bassins adjacents du Niger. Les paramètres du modèle Stanford ont été déterminés et calibrés pour le bassin pérenne et jaugé de Kontagora de 4612,76 Km² de surface. Ces paramètres ont été extrapolés pour le bassin intermittent et non jaugé de Malendo de superficie de 9013,16 Km². Les simulations ont été considérées comme encourageantes.

Magette et al. (1976) ont effectué une étude de 21 bassins versants en Virginie, en Caroline du Nord, en Caroline du Sud et au Tennessee, avec des surfaces de 3,8 à 1236 ha. A partir de régressions linéaires et multiples, les données de 5 bassins ont été utilisées pour obtenir 6 paramètres du modèle Stanford. Les simulations ont pu être validées pour prédire les débits de ces 5 bassins non jaugés. Les résultats obtenus ont été variables.

Mazenc et al. (1984) ont étudié l'influence de la physiographie de 17 bassins versants en Bretagne, d'une part sur les paramètres des modèles globaux Amande et Martine respectivement à 8 et 6 paramètres, et d'autre part sur les caractéristiques d'écoulement des bassins. Avec la régression, ils ont déterminé des équations pour les évaluer sur six autres bassins Bretons non jaugés. Les résultats trouvés ont été moins satisfaisants.

Gan et al. (1990) ont estimé le débit moyen annuel pour 81 bassins au Sud-Est de Victoria en Australie en utilisant des régressions faisant intervenir la taille du bassin et des paramètres statistiques de la pluie (pluie moyenne annuelle parmi autres). Ils ont mentionné que les erreurs d'estimation du débit moyen annuel sur les bassins non jaugés, peuvent être calculées à partir des moyennes des erreurs trouvées sur les bassins jaugés.

Vandewiele et al. (1991) ont trouvé des équations régionales pour évaluer le bilan d'eau avec un modèle mensuel. Ils ont considéré des caractéristiques lithologiques (perméabilité du sous-sol) de 60 bassins jaugés, avec des superficies de 16 à 3160 Km² au Nord du Belgique. Les résultats d'applications ont montré que le modèle conceptuel mensuelle est capable de générer des débits mensuels sur seulement 5 bassins non jaugés.

Pour estimer convenablement les apports en eau à l'exutoire des bassins versants de zone de savane soudanaise, *Servat et Dezetter* (1992, 1993) ont étudié 20 bassins dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, avec des surfaces de 100 à 4500 Km². Ils ont déterminé les paramètres des modèles GR3 et CREC, respectivement à 3 et 7 paramètres. Ils ont appliqué des régressions multiples en utilisant des variables physiques et climatiques (reliées à l'usage du sol et à la distribution de la pluie au cours de l'année) afin de régionaliser les paramètres des modèles utilisées pour pouvoir appliquer ces algorithmes en simulation sur des bassins versants non jaugés ou mal connus. Ils ont trouvé que le GR3 a donné de meilleurs résultats grâce à son petit nombre de paramètres.

Pour évaluer l'impact de changement de l'environnement sur les systèmes hydrologiques, *Sefton et al.* (1995) ont relié les caractéristiques physiques de 100 bassins jaugés du Royaume Uni, telles que la superficie, géologie, topographie et climat aux paramètres du modèle IHACRES. Ils ont extrapolé les résultats de ces 100 bassins jaugés, à 8 bassins non jaugés.

Post et al. (1998) ont mentionné l'influence des phénomènes à grande échelle, comme le climat et la végétation, sur le comportement hydrologique de bassins voisins. Ils ont démontré que les simulations de débits peuvent être plus correctes quand on considère un pas de temps plus grand (rendement inter annuel). Ils ont appliqué ces considérations pour obtenir le paramètre de rendement du modèle IHACRES sur 17 petits bassins non jaugés (superficies de 4 à 65 ha) à Victoria en Australie et sur 3 bassins des États-Unis.

Blazkova et Beven (2002) ont utilisé la méthode de Monte Carlo pour estimer les paramètres du modèle TOPMODEL sur un bassin traité comme non jaugé (25,81 Km²), situé dans la République Tchèque, pour estimer la fréquence des inondations. Ils ont trouvé que les résultats se comparent bien, ils semblent donnés des bornes de prévision plus réaliste.

Merz et Blöschl (2004) et *Parajka et al.* (2005) ont simulé les débits sur 308 bassins en Autriche en régionalisant le modèle HBV à 11 paramètres. Dans leur comparaison des approches de régionalisation, ils ont conclu que la régionalisation basée sur la proximité spatiale avec la transposition de toute une série de paramètres offre les meilleures performances du modèle sur les bassins versants non jaugés.

Götzinger et Bardossy (2007) ont utilisé le modèle HVB et quatre approches de régionalisation (la régressions multiples, le krigeage, les réseaux de neurones et le transfert de l'information de bassins versants voisins au bassin étudié) pour simuler les eaux de ruissellement et de recharge des eaux souterraines par jour dans une discrétisation spatiale de six sous-bassins de Neckar situé dans le Sud-Ouest de l'Allemagne. Les résultats ont montré que les quatre méthodes n'ont pas réussi à reproduire le débit dans les régions karstiques et dans les bassins hydrographiques fortement modifiées.

Pour l'utilisation dans l'évaluation de la fréquence des crues, *Kay et al.* (2006) ont comparé la performance des trois méthodes de régionalisation, pour deux modèles conceptuels de six paramètres (PDM et TATE) sur 119 bassins versants au Royaume Uni. Ils ont constaté que la méthode de similitude physique s'adapte un peu mieux que la méthode de régression pour le modèle PDM, tandis que la régression donne de meilleurs résultats pour TATE. Les auteurs ont conclu que le meilleur choix d'une méthode de régionalisation est en fonction du modèle.

Oudin et al. (2008) ont envisagé trois types d'approches pour régionaliser (la régression, la proximité spatiale et la similarité physique) les paramètres de deux modèles pluie-débit (GR4J et TOPMO) appliquées aux données journalières de 913 bassins versants français. Cette comparaison a montré que l'approche de régression est la moins satisfaisante. Ils ont conclu que certaines améliorations pourraient être apportées en combinant la proximité spatiale et la similitude physique.

Makungo et al. (2010) ont appliqué deux modèles, Mike 11 NAM et AWBM sur les sous bassins versant quaternaire du fleuve Nzhelele (Sud d'Afrique). Ils ont utilisé la similarité entre les caractéristiques de bassin afin de garantir une amélioration de l'homogénéité des paramètres hydrologique estimés. Les résultats de la modélisation ont montré que l'approche est assez bonne et peut donc être utilisé pour prédire le débit dans les bassins versants non jaugés pour la planification et de la gestion des ressources en eau.

Pour restituer en site non jaugée et en tout pixel du territoire français des chroniques mensuelles modélisées, à partir desquelles peuvent être extraites les statistiques de débits. *Folton et Arnaud* (2012) ont régionalisé les paramètres du modèle GR2M_{L'eau} sur un large échantillon de bassins (840) répartis sur toute la France. Les deux auteurs ont trouvé que le contrôle de la qualité de la méthode par validation croisée apporte la confirmation que celle-ci fournit une information pertinente non pas uniquement sur les seuls bassins utilisés pour la régionalisation mais sur tout le territoire étudié.

Yao *et al.* (2014) ont mis au point un modèle pluie-débit hybride (Xaj-GIUH) en couplant le modèle Xaj (un modèle largement utilisé pour la prévision et la simulation des crues dans les bassins versants non jaugés en Chine) avec l'hydrogramme unitaire instantané à base géomorphologique (GIUH) pour améliorer les prévisions de crues dans les bassins non jaugés. Les capacités de prévision des crues du modèle de Xaj original et le modèle Xaj-GIUH ont été étudiées et comparées à une échelle de temps horaire dans un bassin versant montagneux avec six bassins situés dans le Sud de la province de l'Anhui, en Chine. Les résultats ont montré que les estimations de débits et les heures de pointe produite par le modèle Xaj-GIUH sont meilleures que ceux produit par le modèle de Xaj original.

Hosseini *et al.* (2016) ont proposé une nouvelle méthode géomorphologique pour dériver la forme complète de hydrogramme unitaire instantané dans les bassins versants non jaugés en calculant le temps moyen après des précipitations intenses. La performance de ce modèle a été testée en simulant les données journalières pluie-débits dans deux bassins versants distincts avec différentes conditions climatiques (humide et semi aride), en Iran. Les résultats ont montré que le modèle proposé est bénéfique pour estimer le temps de réponse après une averse. Ceci peut être utile pour la gestion des crues et la conception de systèmes d'alerte d'inondation dans chaque segment du bassin versant.

II.2 A l'échelle nationale

Kabouya (1990 ; 1991) en se basant sur deux approches de modélisations (linéaire et conceptuelle). Elle a mis au point un modèle mensuel GR3M (un modèle global avec la possibilité d'appliquer à des bassins non jaugés), afin d'évaluer les problèmes de la ressource en eau sur un ensemble de 63 bassins versant dont la taille varie de 70 à 2 000 Km² de l'Algérie septentrionale. Les données sont relatives des périodes d'observation assez courtes (5 à 20 ans environ, très irrégulièrement réparties entre 1947 à 1985) et assez variables d'un bassin à l'autre. Les résultats d'application ont donné de bons sinon meilleurs résultats.

Dechimi *et al.* (2003) ont étudié la modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel par le biais de quatre modèles qui appartiennent à deux catégories, les modèles conceptuels et les modèles de réseaux de neurones et la logique floue. L'application de ces modèles a été effectuée sur le bassin de la Cheffias (Nord-Est Algérien) sur une superficie de 575 Km². Suite à sa robustesse et son pouvoir d'extrapolation non-linéaire, ils ont pu conclure que, le modèle basé sur la logique floue a donné d'excellents résultats, ce qui représente donc une nouvelle approche de la modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel.

Saidouni (2003) a appliqué trois techniques de prévision (la différence première de la fonction de transfert, les réseaux de neurones artificiels et l'analyse en composantes principale) sur les données du bassin versant d'Oued Dis qui s'étale sur 100 Km². Il a conclu que le modèle basé sur l'analyse en composantes principales a démontré sa capacité et son pouvoir prévisionnel des débits engendrés par les crues.

Pour simuler la transformation de pluie en débit sur les bassins versants de Soummam et d'Isser, *Charifi* (2006) a essayé d'exploiter les paramètres de calage du modèle GR2M en utilisant l'information contenue dans les descripteurs des bassins étudiés en faisant appel à des outils de régression linéaire. Les résultats obtenus ont été plus ou moins satisfaisants.

Benikhlef (2008) a utilisé la méthode de régression multiple pour estimer les paramètres du modèle pluie-débit de trois stations hydrométriques du bassin versant de la Tafna. L'examen a permis de montrer la forte dépendance des débits à la pluviométrie, ce qui donnera le pouvoir de prévenir le changement du débit en fonction des scénarii climatiques prévus ;

Zakhrouf (2012) à application des modèles ANFIS aux 4 bassins versant différents de l'Algérie. Les résultats obtenus ont montré que les modèles ANFIS possèdent un meilleur pouvoir prévisionnel. D'après l'auteur, le recours à ces méthodes plus complexes constitue une alternative pleinement justifiée et privilégiée dans le domaine de la gestion prévisionnelle des ressources en eau de surface.

Bakriti (2014) a conclut qu'un modèle semi distribué est le mieux adapté pour un bassin peu instrumenté avec une hétérogénéité spatiale comme celle de l'Est du bassin versant de la Tafna. Ce modèle a été performant pour les sous bassins de Khémis, Béni-Bahdel et Sikkak et moins pour les sous bassins en plaine tel que Maghnia et Zanata.

Baahmed (2015) a utilisé les modèles GR sur les sous bassins de la Macta qui draine une surface de 14000 Km². Les résultats de la modélisation hydrologique au pas de temps pluriannuel ont montré l'existence d'une tendance à la baisse dans les chronologiques des écoulements annuels due, non seulement au climat mais aussi à l'activité anthropique que la région a connu ces dernières années.

III. Modélisation et régionalisation de la relation pluie-débit : Modèle et méthode d'application choisis

III.1 Choix des échelles de modélisation

Deux dimensions définissent la modélisation pluie-débit. La première est *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 (*Nascimento, 1995 ; Perrin, 2000 ; Mouelhi, 2003*). D'après Ardoïn-Bardin (2004), dans ce genre d'étude, la meilleure échelle d'espace choisie est celle du *bassin versant*. La deuxième dimension est *l'échelle de temps*. Du pas de temps horaire jusqu'au pas de temps pluriannuel, il existe de nombreux modèles fonctionnant à chaque pas de temps (*Mouelhi, 2003*). Toutes les échelles spatio-temporelles interviennent dans le processus pluviométrique. Cependant, les résultats obtenus à une certaine échelle pourraient être faussés par des mécanismes d'échelle inférieure, ou s'extrapoleraient mal pour expliquer des résultats à une échelle inférieure (*Kouassi, 2007*). Concernant cette deuxième dimension, le pas de temps *mensuel* a été choisi pour représenter les résultats de ce travail. D'après Gascuel-Odoux *et al.* (1994), Sighomnou (2004) et Javelle (2001), pour l'étude des évolutions d'origines anthropiques ou liées à des variations climatiques, le pas de temps mensuel est adapté à de telles études.

III.2 Description du modèle hydrologique utilisé

La modélisation conceptuelle est beaucoup utilisée ces dernières années dans le contexte de la modélisation hydrologique de bassins versants, sous l'emprise de la variabilité climatique et des actions anthropiques (*Ouédraogo, 2001 ; Ardoïn-Bardin, 2004 ; Sighomnou, 2004 ; Le Lay, 2006*).

La performance sera le critère de base pour choisir les modèles utilisés. La cohérence n'intervient que si les performances des modèles en concurrence pour chaque pas de temps demeurent très proches (*Mouelhi, 2003*). A cet égard, nos choix ont porté sur les modèles globaux GR. Ces modèles, non seulement, ont l'avantage d'être peu consommateurs de données hydrométéorologiques (pluie, évapotranspiration et débit pour le calage). Mais, ils ont démontré leur performance et leur robustesse sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins du monde (*Mouelhi, 2003 ; Ardoïn-Bardin, 2004 ; Kouamé et al., 2013 ; Belarbi et al., 2015 ; Baahmed, 2015*). D'ailleurs, ces modèles ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de sur-paramétrisation et leur confère une bonne robustesse. Dans ce qui suit, vue que la description détaillée des modèles GR est abondante dans la littérature (*Perrin et al., 2007 ; Bouanani et al., 2011 ; Gherissi, 2012 ; Amiar, 2014*). Nous présentons ici succinctement la description du modèle GR conçus pour un pas de temps mensuel.

Description du modèle GR2M

Le modèle GR2M est constitué d'un réservoir de production qui régit la fonction de production, caractérisé par sa capacité maximale, et d'un réservoir (eau gravitaire) qui régit la fonction de transfert (*Kouassi et al., 2012*). Ce modèle mensuel de bilan d'eau contient deux paramètres libres à caler (X_1 et X_2). Le premier paramètre (X_1) représente la capacité maximale du réservoir (sol). Le deuxième paramètre (X_2) représente le paramètre d'échange souterrain au niveau du

réservoir (eau gravitaire) (Perrin *et al.*, 2007) (Fig. I.12). Un nombre de deux paramètres libres dans un modèle conceptuel global est suffisant pour représenter la relation pluie-débit au pas de temps mensuel (Makhlouf *et Michel*, 1994 ; Mouelhi, 2003 ; Kouamé *et al.*, 2013).

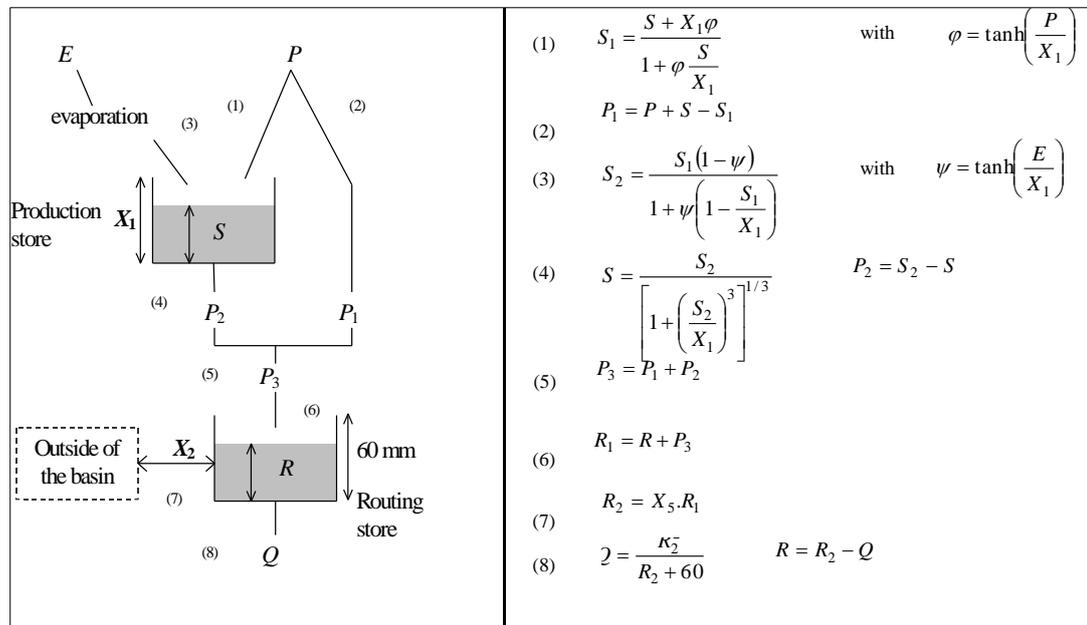


Fig. I.12. Schéma conceptuel du modèle GR2M.

Source : Mouelhi, 2003

III.3 Critère mathématique d'optimisation du modèle : Critère de Nash-Sutcliffe

Plusieurs études comparatives entre différentes formes de critères ont été effectuées et ont montré que le critère de Nash-Sutcliffe s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage (Servat *et al.*, 1989 in Mouelhi, 2003 ; Perrin, 2000). Il a été déjà défini par l'équation I.3 de la section I.2.3 de ce chapitre.

Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash-Sutcliffe est proche de 100%. Ainsi, une performance supérieure ou égale à 60% peut être jugée satisfaisante (Perrin, 2000).

L'analyse des résultats de simulation est portée sur les performances des modèles au calage et à la validation. En effet, les performances au calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation (Perrin, 2000).

III.4 Evaluation de la performance d'un modèle

L'une des techniques les plus utilisées, pour évaluer la robustesse d'un modèle dans des situations les plus proches possibles de celles dans lesquelles il est censé fonctionner, est la

détecter les tendances sur la relation pluie-débit (*Andréassian et al., 2003 in Aït-Mesbah, 2012*). Parmi ces méthodes, l'approche des simulations croisées est utilisée à cause de sa robustesse pour l'étude des tendances dans la relation pluie-débit (*Kouamé et al., 2013*). La description de la méthodologie de cette approche est basée sur les travaux d'*Andréassian et al. (2003)* et *Kouassi (2007)* et *Kouassi et al., 2012*.

Tout d'abord, on découpe la série chronologique en des sous-séries indépendantes de n ans chacune. La méthode proposée part du principe que le calage permet de caractériser le comportement hydrologique du modèle sur la période de calage (de n sous-périodes). En appliquant ensuite le modèle calé sur toutes les autres sous-périodes, c'est-à-dire en gardant les mêmes paramètres, on obtient l'écoulement qu'aurait donné le bassin s'il était resté dans les conditions de la période de calage. En renouvelant cette opération après chaque contrôle, une matrice de tendance est déterminée.

L'analyse de la matrice de simulations croisées se fait de deux manières différentes : une analyse visuelle simple et/ou une analyse statistique utilisant un test de permutation dans le but de caractériser la significativité de la tendance (*Aït-Mesbah, 2012*).

Analyse visuelle

Dans l'interprétation des matrices des simulations, chaque valeur est remplacée par un signe, traduisant une évolution croissante ou décroissante de la variable hydrologique considérée dans le temps. Pour cette étude, la variable cible considérée est le débit liquide moyen mensuel transformé en lame d'eau (mm). A cet effet, chaque valeur du tableau est remplacée par un «+» ou un «-», suivant que les valeurs sont supérieures ou inférieures à la valeur de la diagonale. La valeur située sur la diagonale représente pour chaque ligne la meilleure référence, dans la mesure où il s'agit de la valeur la plus proche de la valeur réellement observée (car prédite par le modèle calé sur la période en question). La comparaison s'effectue ligne par ligne car il est nécessaire de se placer dans des conditions d'égale pluviométrie. Si les « + » sont majoritaires, cela signifie que la variable hydrologique simulée dans le tableau a tendance à croître avec le temps, si les « - » sont majoritaires, l'inverse est vrai (*Andréassian 2002, Andréassian et al. 2003, Kouassi et al. 2012, Aït-Mesbah 2012, Kouamé et al. 2013 ; Belarbi et al., 2017*).

Analyse statistique utilisant les permutations

Pour mieux prendre en compte l'amplitude des changements observés et non seulement leurs sens, nous avons choisi d'appliquer un test conditionnel fondé sur les permutations que nous calculerons sur des demi-matrices croisées de simulations afin d'exploiter une information supplémentaire qui nous permette de mieux interpréter les résultats.

L'hypothèse nulle H_0 du test est : l'absence de tendance. Le principe de ce test est très simple : sous l'hypothèse H_0 , les valeurs de chaque ligne peuvent être permutées librement, les lignes résultantes étant toutes équiprobables. Ainsi, les lignes suivantes sont équiprobables sous H_0 . A partir d'une matrice $n \times n$ réellement observée, on peut donc générer $n! \times (n - 1)! \times (n - 2)! \times \dots \times 3! \times 2! \times 1!$ matrices équiprobables sous l'hypothèse H_0 . On décide de calculer une statistique sur chacune des matrices. Pour cela, on propose de prendre en compte la Somme des Différences avec la valeur de la Diagonale (qu'on appellera SDD) (Parent et al. 2001 ; Vissin, 2007).

III.7 Descriptions de l'approche de régionalisation utilisée

Dans notre cas, nous nous intéressons aux procédés de type régressif qui est la plus couramment appliquée en hydrologie. La méthode utilisée pour établir des liens entre descripteurs du bassin et paramètres du modèle est généralement composée des étapes suivantes (Perrin, 2000 ; Cherifi, 2006) :

1. Sélection d'un jeu de bassins ;
2. Calage du modèle sur chaque bassin (ou chaque bassin-période) pour obtenir les valeurs des paramètres du modèle dans chaque cas ;
3. Sélection d'un ensemble de variables physiques (topographie, morphologie, physiographie, couvert végétal, pédologie, géologie...) ou climatiques (décrivant le régime des pluies ou l'évapotranspiration) qui sont supposées pertinentes relativement à leur influence sur la transformation pluie-débit ;
4. Etablissement de relations entre les paramètres du modèle et les variables explicatives sélectionnées en utilisant des régressions simples ou multiples, dans lesquelles les paramètres et les variables peuvent éventuellement avoir subi des transformations préalables (logarithmique ou puissance par exemple) ;
5. Comparaison (pas toujours réalisée) des résultats du modèle obtenus d'une part avec les paramètres calés et d'autre part avec les paramètres prédéterminés par les équations de régionalisation.

III.7.1 Modèle théorique de la régression simple

On considère le cas de deux variables X (explicative) et Y (à expliquer). Si pour tout individu i , $Y_i = f(X_i)$ et si on observe une valeur X_{n+1} de la variable X sur un nouvel individu, on donnera $f(X_{n+1})$ comme prédiction de la variable Y sur ce même individu.

On cherchera plutôt, dans une famille fixée de fonctions, quelle est celle pour laquelle les Y sont les plus proches des $f(X_i)$. La proximité se mesure en général comme une erreur quadratique moyenne :

$$EQ(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_i))^2 \dots\dots\dots(I.5)$$

On parle alors de régression au sens des moindres carrés. Les différences entre les valeurs observées Y et les valeurs prédites par le modèle $f(X_i)$ s'appellent les résidus. Dans le cas où la régression est linéaire, le plus important en pratique, est celui où l'espérance.

$$E\left(\frac{Y}{X}\right) = \alpha + \beta X \dots\dots\dots(I.6)$$

(Ceci se produit en particulier si X et Y suivent une loi normale à deux dimensions). On a donc :

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \dots\dots\dots(I.7)$$

En prenant, l'espérance des deux membres de la relation $E\left(\frac{Y}{X}\right)$, il vient :

$$E(Y) = \alpha + \beta E(X) \dots\dots\dots(I.8)$$

La droite de régression passe donc par le point de coordonnées $(E(X), E(Y))$. On a :

$$Y - E(Y) = \beta(X - E(X)) + \varepsilon \dots\dots\dots(I.9)$$

Après transformation, l'équation de la droite de régression devient donc :

$$E\left(\frac{Y}{X}\right) - E(Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{V(X)} (X - E(X)) \dots\dots\dots(I.10)$$

$$D'où : Y = E(Y) + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - E(X)) + \varepsilon \dots\dots\dots(I.11)$$

III.7.2 Modèle théorique de la régression multiple

On se limitera au cas de la prédiction dite linéaire, pour laquelle on cherchera les meilleurs paramètres possibles b_0, b_1, \dots, b_p (appelés coefficients de régression) dans la formule (I.12) :

$$Y^* = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p = b_0 + bX + d_a \dots\dots\dots(I.12)$$

Où, Y^* est la valeur prédite, à distinguer de la valeur observée Y.

Les conditions peuvent être exprimées en affirmant que les résidus aléatoires « d_a » relatif aux différents individus « a » doivent tous posséder une même distribution normale de moyenne nulle et de variance constante et qu'ils doivent être indépendants les uns des autres. D'autre part les « p » variables explicatives peuvent être des variables aléatoires dont les valeurs sont observées dans des conditions analogues à celle de la variable dépendante.

Dans le cas particulier de deux variables explicatives. L'équation recherchée est de la forme suivante (Cherifi, 2006) :

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \dots\dots\dots(I.13)$$

Estimation et intervalle de confiance des paramètres ; les coefficients de régression partielle b_1 et b_2 sont donnés par les équations I.14 et I.15:

$$\hat{\beta}_1 = b_1 = \frac{(SPE_{1y} \cdot SCE_2) - (SPE_{12} \cdot SPE_{2y})}{(SCE_1 \cdot SCE_2) - SPE_{12}^2} \dots\dots\dots(I.14)$$

$$\hat{\beta}_2 = b_2 = \frac{(SPE_{2y} \cdot SCE_1) - (SPE_{12} \cdot SPE_{1y})}{(SCE_1 \cdot SCE_2) - SPE_{12}^2} \dots\dots\dots(I.15)$$

Les indices 1 et 2 correspondent aux variables explicatives X_1 et X_2 et Y à la variable expliquée. Avec SPE et SCE sont respectivement somme des produits des écarts aux moyennes et somme des carrés des écarts à la moyenne données par les équations I.16 et I.17 suivantes :

$$SPE = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i) \dots\dots\dots(I.16)$$

$$SCE = \sum_{i=1}^n x_i^2 \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \dots\dots\dots(I.17)$$

La covariance s'écrit :

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i) \dots\dots\dots(I.18)$$

Ordonnée à l'origine :

$$\beta_0 = b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x}_1 + b_2\bar{x}_2 \dots\dots\dots(I.19)$$

La variance résiduelle est donnée par l'équation (II.20) suivante :

$$\hat{\sigma}_{y,12}^2 = \frac{SCE_{y,12}}{n-3} = \frac{1}{n-3} \left(SCE_y \frac{(SPE_{2y}^2 \cdot SCE_1) + (SPE_{1y}^2 \cdot SCE_2) - (2 \cdot SPE_{12} \cdot SPE_{1y} \cdot SPE_{2y})}{(SCE_1 \cdot SCE_2) - SPE_{12}^2} \right) \dots\dots\dots(I.20)$$

Le coefficient de corrélation multiple s'écrit :

$$R = \sqrt{1 - \frac{SCE_{yx}}{SCE_y}} \dots\dots\dots(I.21)$$

Avec ;

SCE_{yx} : Somme des carrés des écarts résiduelle

SCE_y : Somme des carrés des écarts y

Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre le contexte général dans lequel s'inscrivent nos recherches. *La modélisation et la régionalisation de la relation pluie-débit*, discipline de l'hydrologie qui s'intéresse à la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin non jaugé.

Transcriptions mathématiques de cette transformation, les modèles qui ont été développés depuis une quarantaine d'années sont très variés, faisant appel à différentes perceptions du monde réel et répondant à différents objectifs. Notre analyse nous a conduit à identifier trois grandes catégories de modèles, à savoir les modèles *boite noire*, les modèles *à réservoirs* et ceux *fondés sur la physique*. Il existe aujourd'hui un grand nombre de tels modèles, dont la multitude est le reflet des difficultés que rencontre la modélisation dans la représentation du comportement du bassin versant. Ainsi, les objectifs premiers de cette étude bibliographique sont d'exposer la structure et la complexité des modèles sur leurs performances, leur robustesse et leur fiabilité.

Dans le cas de la modélisation de la relation pluie-débit sur des bassins non jaugés, la procédure plus usuelle est le transfert de l'information de bassins versants voisins au bassin étudié qui est généralement réalisé après une régionalisation préalable. Des nombreuses méthodes de régionalisation ont été proposées dans la littérature pour déterminer les paramètres d'un modèle sur les sites non jaugés.

L'étude bibliographique a permis de choisir le modèle le mieux adapté à la zone d'étude avec un intérêt particulier sur l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et l'analyse de la tendance dans la relation pluie-débit. C'est ainsi que le choix s'est porté sur le modèle GR2M. C'est un modèle global, simple et facile à mettre en œuvre. La régionalisation par des procédures de type régressif ont été adoptées et exposées pour explorer ce modèle sur des bassins versants non jaugés.

Chapitre II

Bassin versant et base de données

BASSIN VERSANT ET BASE DE DONNEES

« ...Knowing ignorance is a strength. Ignoring knowledge is a weakness »

Sun Tsu général Chinois

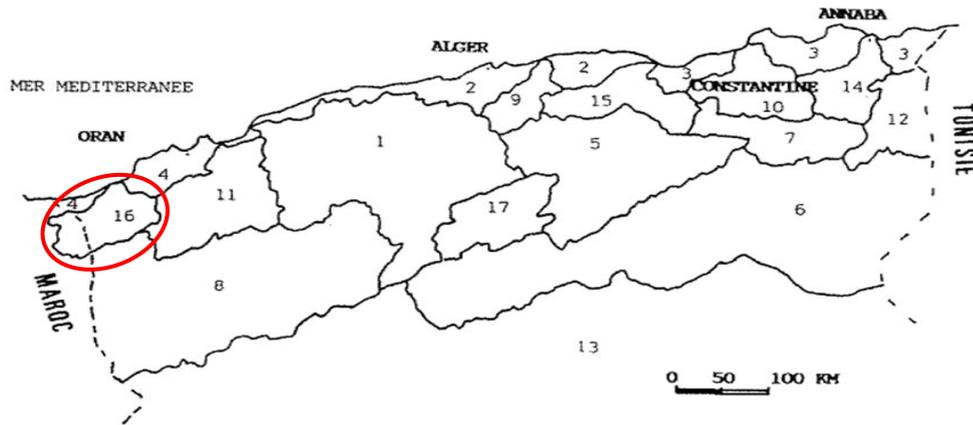
Introduction

Le bassin du versant de la Tafna subit de plein fouet les variations du climat. Ce bassin se révèle, un objet d'étude approprié pour l'analyse de la variabilité hydrométéorologique et de ses effets sur les ressources en eau. Ainsi, dans un premier temps, les éléments du milieu physique du bassin versant de la Tafna, à savoir sa situation géographique, relief, géologie, végétation, hydrologie et hydrogéologie du bassin seront présentés. Cette description sera achevée par une vue d'ensemble sur les potentialités du bassin en matière de ressources en eau. Dans un second temps, le choix, le critère et l'analyse des séries de données seront réalisées afin de caractériser les fluctuations éventuelles au sein de ces séries chronologiques hydrométéorologiques de la zone d'étude.

I. Présentation de la zone d'étude

I.1 Géographie du bassin versant de la Tafna

Situé dans l'extrême Nord-Ouest de l'Algérie, le bassin versant de la Tafna est un bassin transfrontalier d'une superficie de 7245 Km², dont moins du tiers de sa superficie se trouve sur le territoire marocain. Il est limité par 1° et 2° de longitude Ouest et de 34° 5" à 35° 3" de latitude Nord (*Aimé et Remaoun, 1988 ; Yebdri et al., 2007*) (Fig. II.1).



Code	Bassin	Code	Bassin	Code	Bassin
01	Cheliff	07	H. plateaux constantinois	13	Sahara
02	Côtiers algérois	08	H. plateaux oranais	14	Seybouse
03	Côtiers constantinois	09	Isser	15	Soummam
04	Côtiers oranais	10	Kebir Rhumel	16	Tafna
05	Chott Hodna	11	Macta	17	Zahrez
06	Chott Melrhir	12	Medjerdah		

Fig. II.1. Code et nom des bassins versants de l’Algérie.

Source : *Annuaire hydrologique, 71-72.*

Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l’ensemble de l’Oranie-Chott-Chergui (*Bouanani, 2004*). Il est limité par les unités hydrographiques comme le montre la figure II.2:

- Au Nord par le *bassin Côtier Oranais* ;
- Au Sud par le *bassin Chott Chergui* ;
- A l’Est par *Macta* ;
- A l’Ouest par le territoire Marocain

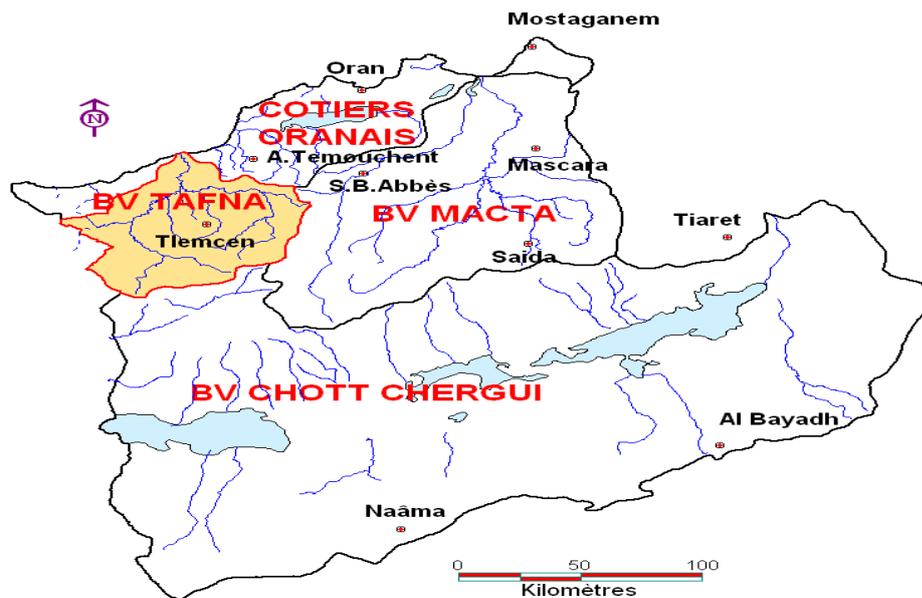


Fig. II.2. Position du bassin versant de la Tafna dans le bassin hydrographique Oranie Chott Chergui.

Source : *Benaini et al., 2012*

Avec une superficie de 5340 Km² sur le territoire Algérien, le bassin versant de la Tafna est dans sa majeure partie, occupé par les communes de la wilaya de Tlemcen (35/53 communes) et quelques communes de la wilaya d'Ain-Temouchent (03/28 communes) (ABHOCC, 2006).

I.2 Relief du bassin versant de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna est caractérisé par un relief diversifié. On distingue les zones suivantes (Fig. II.3) :

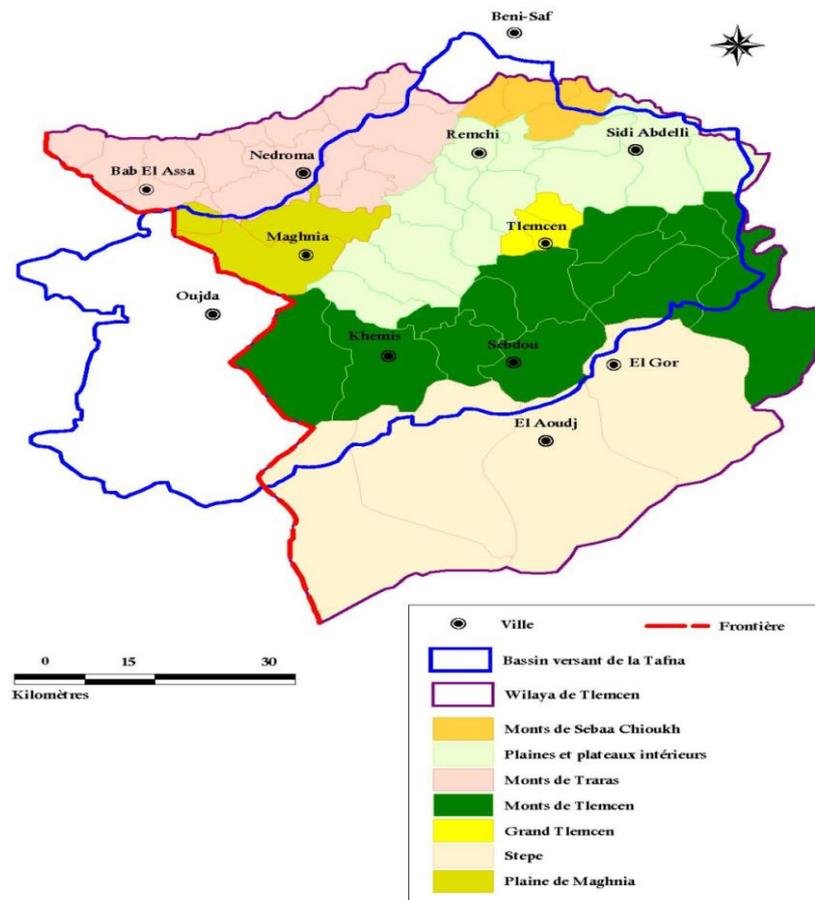


Fig. II.3. Cadre géographique du bassin versant de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen.

I.2.1 Zones montagneuses

Les zones montagneuses entourent le bassin de la Tafna du côté Nord-Ouest, du côté Sud et du côté Nord pour laisser au Centre une zone de plaines et de dépressions. Ces zones sont :

Monts des Trara

C'est une chaîne montagneuse côtière de 1250 Km², d'une altitude moyenne variant de 500 à 1000 m qui occupe le Nord-Ouest de la wilaya de Tlemcen. Les Traras ont une structure plus complexe due aux contrecoups des mouvements alpins (nappes de charriage, chevauchements,

plissements et fractures) à de nombreux remplissages sédimentaires ainsi qu'à des épanchements volcaniques. C'est une montagne dissymétrique : le versant septentrional est plus long que la retombée méridionale, caractérisée par une grande variété lithologique (granites, schistes, divers calcaires, grès, marnes et formations volcaniques) (*Aimé et Remaoun, 1988*).

Monts de Sebaa Chioukh

C'est une chaîne montagneuse de 250 Km², située au Nord-Est de la wilaya de Tlemcen. Elle forme le prolongement du côté Est des monts des Traras avec une altitude moyenne comprise entre 600 et 800 m. Cette chaîne oligocène est soumise aux influences du climat semi aride qui accentue la menace d'érosion avec des pentes qui dépassent les 25% (*Mostefai, 2010*).

Monts de Tlemcen

Ils se situent au Sud de la wilaya de Tlemcen formant la frontière Sud du bassin versant. Les monts de Tlemcen sont les plus hauts reliefs de la région (1848 m au Djebel Tenouchfine) (*Aimé et Remaoun, 1988*). Ils occupent une superficie de 3000 Km² et s'étendent à l'Ouest jusqu'au royaume du Maroc et à l'Est jusqu'à la wilaya de Sidi-Bel-Abbès. Ils ont une structure monoclinale et massive avec une topographie tabulaire entrecoupée de nombreux escarpements et abrupts.

I.2.2 Zones des plaines et des plateaux

Les plaines et les plateaux occupent la partie centrale du bassin enfermée entre les zones montagneuses, on distingue :

Plaine de Maghnia

Elle est limitée au Nord et Nord-Est par les piémonts Sud des Traras, au Sud par les piémonts Nord des monts de Tlemcen et à l'Ouest par un prolongement naturel formé par la plaine des Angad (Maroc). Cette plaine a une grande partie recouverte de limons très fertiles sauf dans sa partie centrale où on note la présence de sols salés. Les sols de la plaine sont limités en profondeur par des croûtes calcaires.

Plaine de Hennaya

Elle se situe au Nord de la commune de Hennaya à une distance de 9,25 Km au Nord de la ville de Tlemcen. Sur une superficie de 28 Km² (*Nebbache, 2012*), elle est limitée par l'Oued Isser au Nord, par les terrains karstiques du jurassique supérieur des monts de Tlemcen au Sud, par l'Oued Sikkak à l'Est et l'Oued Khalouf à l'Ouest (*Baba-Hamed et al., 2005*). Ces sols sont formés par des dépôts d'alluvions récents. Par la position géographique et la structure granuleuse des

sols, la plaine profite de la proximité des points d'eau (cours d'eau, nappe phréatique) pour développer une agriculture irriguée traditionnelle.

Plateau de Zenata Ouled-Riah

Il est situé au Nord-Ouest de la plaine de Hennaya, il est constitué de sols rouges méditerranéens reposant sur des encroûtements ou parfois sur la carapace calcaire, la texture du sol est argilo-limoneuse ;

Plateau Sidi-Abdelli-Ain-Nahala

Il est formé de sols bruns calcaires, leur teneur en argile est de l'ordre de 45%. A la suite de la variation de l'humidité de ces sols, la structure se dilate en été donnant naissance à de larges fentes. La teneur en calcaire dans ces formations est élevée en profondeur (*Adjim, 2004*).

I.3 Géologie du bassin versant de la Tafna

Durant le Mésozoïque, l'évolution géodynamique des bassins sédimentaires à l'échelle du bloc Oranais a permis l'individualisation de plusieurs domaines paléogéographiques (*Marok, 1996*). Ce sont du Nord au Sud (Fig. II.4) :

- *Domaine tello-rifain* : future région des nappes ;
- *Domaine tlemcenien* : les monts des Traras et les reliefs avoisinants ;
- *Domaine des Hautes Plaines oranaises* : monts de Sidi El Abed ;
- *Domaine atlasique* : monts des Ksour ;
- *Domaine saharien* : la plate forme stable appartenant au vrai craton africain.

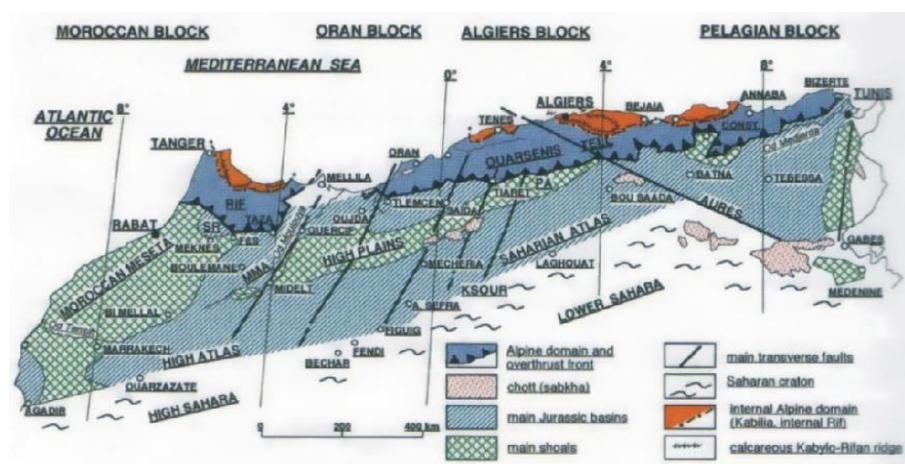


Fig. II.4. Grands traits structuraux de la mosaïque de l'Afrique du Nord-Ouest.

Source : *Elmi et al., 1998*.

Le bassin-versant de la Tafna s'étend sur presque la moitié de l'Oranie Nord-occidentale et comprend deux ensembles structuraux : un ensemble atlasique au Sud et un ensemble alpin au Nord (*Khadidda, 1996*).

De nombreux travaux consacrés à l'étude de la géologie du bassin versant de la Tafna (*Bayle et Ville, 1854; Gentil, 1902; Boudy, 1950; Elmi 1970; Benest, 1985; Bouabdellah, 1991; Benest et Bensalah, 1995*) témoignant de la grande diversité du relief de ce bassin et montrent que cette diversité des formes de terrains est liée à la nature des roches, d'où la diversité de la nature du sol. L'évolution des terrains rencontrés va du Primaire au Plio-Quaternaire.

I.3.1 Primaire

Il affleure dans le bassin de l'Oued Mouilah au niveau des monts de Ghar Roubane à l'Ouest et de Fillaoucen à l'Est. Il est représenté par :

Formations schisto-quartziques d'un âge silurien à dévonien fortement plissées recouvrant une grande partie du bassin. On les retrouve particulièrement à Ghar Roubane et à Djebel Fellaoucène. Cette série est formée d'une alternance de schistes de couleur brunâtre à rougeâtre avec des quartzites très compacts de couleur grisâtre à rougeâtre ;

Granite se situe au Nord-Est immédiat de la ville de Nedroma. Il est de couleur blanchâtre à rosâtre et a une forme elliptique ;

Auréole de métamorphisme : L'intrusion des granites dans les formations schisto-quartzitiques développe une auréole de métamorphisme donnant des cornéennes (ce sont des roches métamorphiques très denses de couleur gris foncé), des schistes à andalousites et des schistes tachetés.

I.3.2 Secondaire

Il occupe une grande partie du bassin versant et forme l'essentiel des monts de Tlemcen. La série lithostratigraphique schématisée par le log de la figure II.5 est représentée par (*Adjim, 2004*) :

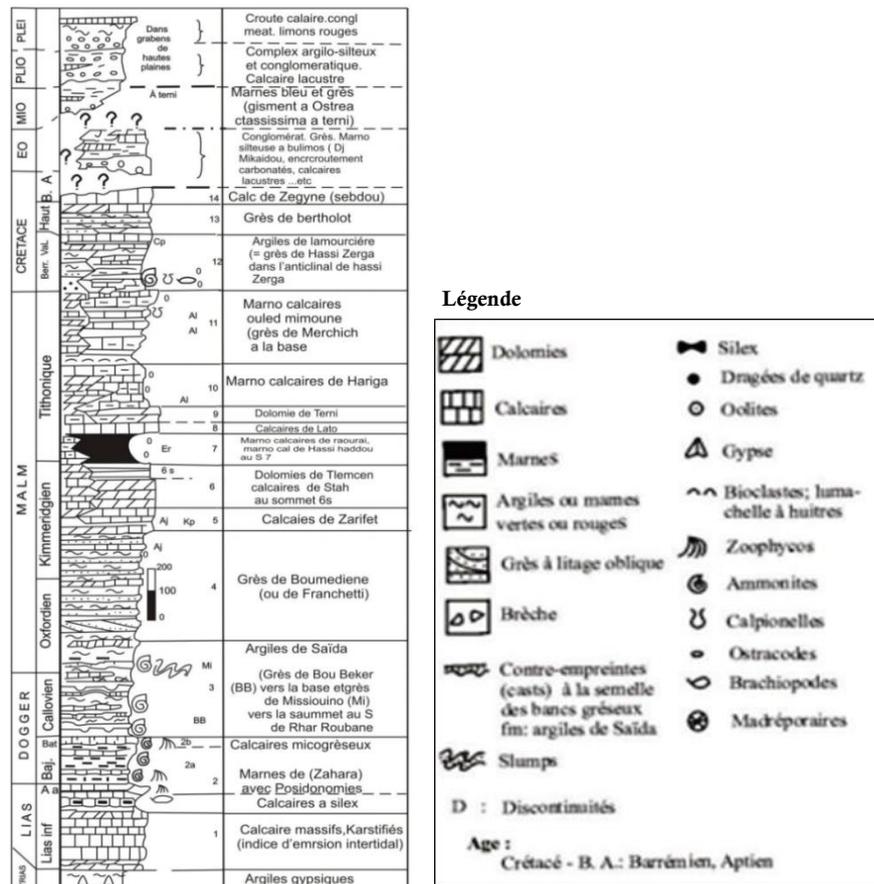


Fig. II.5. Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines.

Source : Benest et al., 1999.

Trias localisé essentiellement au Nord d'Aïn Tellout et dans la région de Béni-Bahdel. Il est constitué par des argiles plus ou moins dolomitiques et gypseuses et des marnes bariolées ;

Jurassique, on distingue :

- *Callovo-Oxfordien (Argiles de Saida)* peut atteindre des épaisseurs de 300 à 500 m présente parfois une transition assez progressive au grès de Boumediene ;
- *Grès de Boumediene* représenté sont particulièrement développés dans les forêts de Zarifet et de Hafir, au Sud-Ouest de Terny et au niveau des cascades de l'Ourit ;
- *Calcaires de Zarifet* surmontent les grès de Boumediene et reposant directement en concordance sur les grès séquaniens formant les falaises des environs de Tlemcen. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 25 m au col de Zarifet ;
- *Dolomies de Tlemcen* constituent l'ensemble des reliefs des monts de Tlemcen ; leur épaisseur varie entre 150 à 200 m, affleurant en bancs massifs au Djebel Tazmouret et au Djorf Deglen ;

- *Marno-calcaire de Raourai* ayant une épaisseur d'environ 400 m. Cette formation est particulièrement bien développée sur le plateau de Terny dans le Djebel Lato, le Djebel El Guen et à l'est d'Aïn Fezza ;
- *Calcaires du Lato* : Ce sont des calcaires massifs passant vers le haut à des calcaires argileux. Leur épaisseur est d'environ 50 m au Djebel Lato ;
- *Dolomies de Terny* ont un aspect massif, cristallin à cryptocristallin, affleurant dans le Djorf Deglen. Ces formations sont développées au niveau des plateaux d'Azaïls, de Terny et près du barrage Mefrouche. Leur puissance est de l'ordre de 100 m dans le plateau de Terny et à Bled El Gliaa au Sud de Ouled Mimoun ;
- *Marno-calcaires de Hariga* est une formation calcérodolomitique devenant marneuse vers son sommet connu sous le nom de calcaires, *marnes et grès de Merchiche*. Cette formation a une épaisseur de 270 m au Bled El Gliaa et leur puissance est de 165 m au Djebel El-Hariga près d'El-Gor ;
- *Marno-calcaires d'Ouled Mimoun* : Il s'agit de calcaires, de marnes et grès de Merchich. La limite inférieure se place à l'apparition des grès de Merchich sur le rebord Sud du plateau de Terny. La limite supérieure est matérialisée par une corniche de calcaire, souvent biodétritique, avec des stratifications obliques.

Crétacé représenté par la série du Crétacé inférieur, on y distingue du bas vers le haut d'*Argiles de Lamoricière* à dominance argilo-gréseuse, nettement calcaire au sommet. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 300 m au Nord d'Ouled Mimoun et les *Grès de Berthelot* caractérisés par une récurrence de la smectite et surtout par l'apparition de chlorite (10 à 15 m).

Tertiaire

- *Eocène* : La formation affleure sur une très faible surface au niveau d'Aïn Berkouk. C'est un ensemble gréseux avec passage de bancs de poudingues. Dans la basse vallée d'Oued Isser près de la confluence avec Oued Tafna, le massif des Sbaa Chioukh est constitué de grès siliceux, jaunâtres à rougeâtres, assez friables à ciment argileux alternant avec des marnes argileuses verdâtres. Ces alternances forment une série de 100 à 150 m d'épaisseur, elles ont été attribuées à l'Eocène supérieur ;
- *Miocène* : on distingue
 1. *Miocène inférieur (Burdigalien)* débute par un niveau de poudingues très durs, à blocs bien roulés, hétérométriques et polygéniques, formés d'éléments calcaires, dolomitiques à ciment calcaire-gréseux très résistants pouvant atteindre 20 m de puissance. La partie supérieure est constituée par des argiles marneuses de teinte

verdâtre au sein desquelles s'intercalent des bancs décimétriques de grès ferrugineux friable formant un ensemble d'une épaisseur pouvant dépasser 100 m. Le Burdigalien affleure surtout de part et d'autre de la Tafna, essentiellement entre la vallée d'Oued Zitoun et Djebel Fillaoucène ;

2. *Miocène moyen (Helvétien)* repose souvent en transgression et en discordance sur le Burdigalien déformé et partiellement érodé. Il est constitué essentiellement par une épaisse série d'argiles marneuses grises ou bleutées dans la masse devenant ocre à l'affleurement. Au sein de cette série, qui peut atteindre 300 m d'épaisseur dans la vallée d'Oued Isser, s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grès jaunes, plus fréquents au sommet de la série. La base de l'Helvétien, en particulier dans le bassin de la Tafna, est marquée par un niveau discontinu de poudingue relativement peu consolidé à ciment argilo-gréseux, bien représenté à 4 Km à l'est de Hammam Boughrara ;
3. *Miocène supérieur (Tortonien)* est formé par des dépôts de grès durs, jaunes or ou citron, mal lités parfois peu consolidés atteignant 20 à 30 m d'épaisseur. Ces grès s'appuient sur des marnes helvétiques et localisées entre Tlemcen et Remchi ou directement sur le Jurassique comme c'est le cas au Nord et au Sud de la plaine de Maghnia. Ce Tortonien peut avoir des faciès différents, argiles plus ou moins sableuses affleurant près de Terny et près d'Aïn Khaled à l'Ouest de Terny.

Plio-quaternaire représenté par des sédiments continentaux d'âge comparables bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes. On y rencontre les faciès suivants :

- *Travertins Villafranchiens* situés en bordure des monts de Tlemcen, ils sont représentés par des travertins fortement consolidés et calcaires lacustres ;
- *Complexe de sédiments Plio-Villafranchiens*, la bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémonts plus ou moins encroûtés et remaniés d'épaisseur très variable mais toujours assez faible ;
- *Des marnes rouges avec peu ou pas de galets*, plus ou moins tufeuses, parfois très épaisses surtout au niveau du bassin d'Oued Abbès ;
- *Anciennes alluvions* allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers ;
- *Limons, sables et graviers récents* qui s'étendent entre Oued Mehaguène et Chaabat El Arneb au Nord-Est de la frontière algéro-marocaine. Les limons sont jaunes en général avec des couches rougeâtres. Les galets se trouvent surtout en lits à la base des limons ;

- *Quelques lambeaux de basaltes interstratifiés*, témoins d'une activité volcanique. Ils sont situés au Nord-Ouest de la plaine de Maghnia dans le bassin d'Oued Mouilah.

En conclusion, le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants à une influence sur la répartition des écoulements superficiels. Suite à son étude, Bouanani (2004) a constaté que presque la totalité de la superficie du bassin versant de la Tafna est occupé par des formations perméables à semi perméables, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface. Néanmoins, l'abondance relative de formations carbonatées karstiques, représentées par les dolomies de Tlemcen et de Terny dans les sous bassins d'Oued Sebdou, d'Oued Sikkak et d'Oued Isser permet sans doute de différencier le comportement hydrologique de ces sous bassins à celui du sous bassin d'Oued Mouilah dont plus de la moitié de la surface est occupée par alluvions plio-quadernaires surmontant les marnes et les grés miocènes au niveau de la plaine de Maghnia. D'après le même auteur, le sous bassin d'Oued Isser peut aussi avoir des comportements différents qui seraient dus à l'abondance relative des marnes et des argiles qui occupent 40% de la surface de ce dernier.

I.4 Végétation du bassin versant de la Tafna

Au niveau du bassin versant de la Tafna, à l'exception du périmètre organisé de Maghnia, les aires d'irrigation sont localisées essentiellement dans les vallées des Oueds tels qu'Oued Isser et Oued Chouly. Les cultures pratiquées sont dominées par des cultures maraichères et quelques vergers d'agrumes et d'arbres fruitiers. Les forêts, les maquis et les broussailles occupent pratiquement toute la bande des monts de Tlemcen et une partie des monts des Traras. Le tableau II.1 rassemble et classe les diverses formes de culture de quelques sous bassins du bassin versant de la Tafna :

Tableau II.1. Distribution du couvert végétal de quelques sous bassins du bassin versant de la Tafna.

Sous bassin	Pourcentage des surfaces de chaque sous bassin					
	Cultures extensives	Couvert forestier dégradé	Couvert forestier normal	Arboriculture	Couvert mort	Prairies et terrains de pacage
Oued Sebdou	16,14	33,84	21,78	01,94	09,62	16,68
Oued Mouilah	21,58	3,58	14,72	0,45	49,43	10,23
Oued Isser	37,19	34,12	13,43	9,19	5,22	0,89
Oued Sikkak	68,63	5,5	4,57	12,74	--	8,56

Source : Mazour, 1992 ; Bouanani, 2004.

- *Cultures extensives* rassemblent toutes les cultures annuelles telles que les céréalicultures, les cultures maraîchères et l'association entre l'arboriculture et le maraîchage ;
- *Couvert forestier dégradé* sont rassemblés sous ce thème les maquis et les forêts claires, les zones en cours de reboisement, les forêts et les maquis dégradés par l'utilisation excessive du sous sol forestier, le pâturage sauvage et irrationnel compromettant la rénovation, le déboisement intégral pour installer d'autres cultures et les effets des incendies ;
- *Couvert forestier normal* représenté essentiellement par les forêts et les maquis denses n'ayant subi aucune dégradation que ce soit par l'action de l'homme (pâturage sauvage, déboisement) ou par l'effet des incendies ;
- *Arboriculture* représentée principalement par les vignobles et l'olivieraie, et les agrumes, vergers et murs en quantité inférieure ;
- *Couvert mort* sont désignés par ce terme tous les terrains sur lesquels n'est présente aucune forme de végétation ou de culture utilisable, rendu nu par l'érosion ou par d'autres formes de dégradation ;
- *Prairies et terrains de pacage* : représentés par les surfaces qui sont utilisées pour la plupart en pâturage direct des animaux, les terres occupées par l'alfa et la lavande.

I.5 Réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna

Le bassin versant de la Tafna est subdivisé en huit sous bassins (Tableau II.2 ; Fig. II.6) :

Tableau II.2. Code du bassin et des sous bassins de la Tafna.

Code du bassin	Bassin	Code de sous bassin	Sous bassin	Oueds
16	Tafna	1601	Mouilah Amont	Mouilah
		1602	Mouilah Aval	Mouilah
		1603	Bouhrara	Mehaguène
		1604	Tafna Amont	Tafna
		1605	Tafna Boukiou	Tafna Boukiou
		1606	Isser Cedra	Isser Cedra
		1607	Isser Sikkak	Isser Sikkak
		1608	Tafna Maritime	Tafna

Source : ABHOCC, 2006.

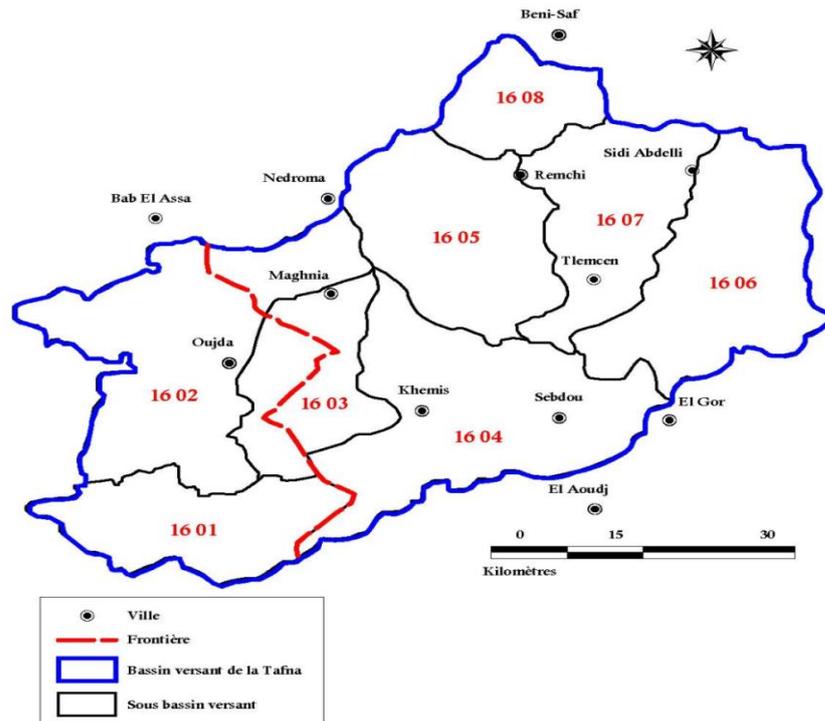


Fig. II.6. Bassin et sous bassins de la Tafna.

Dans son ensemble, le bassin versant de la Tafna présente un chevelu hydrographique dense. Le réseau hydrographique s'organise autour de deux Oueds principaux, l'Isser à l'Est et la Tafna à l'Ouest (Fig. II.7).

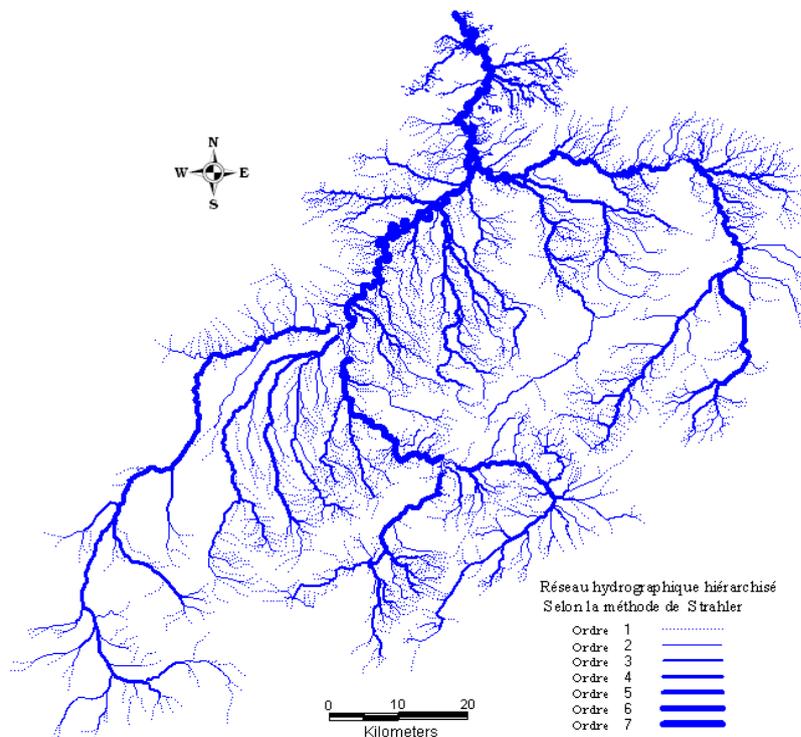


Fig. II.7. Hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin hydrographique de la Tafna selon Strahler.

Source : Benaini et al., 2012

L'écoulement dans les Oueds du bassin versant de la Tafna est caractérisé par une forte dépendance par rapport aux précipitations, une forte irrégularité intra et inter annuelle, des crues à très fort débit instantané à différentes périodes de retours ; pouvant engendrer des inondations et un débit d'étiage très faible à nul, s'étalant du mois de juin jusqu'à septembre (*Dahmani et al., 2002*). Le cours de cet Oued peut se subdiviser en trois parties (*Gentil, 1902 ; Bouanani, 2004 ; Adjim, 2004*) :

I.5.1 Haute Tafna

L'Oued a son origine dans les Ouled Ouriach dans les monts de Tlemcen à 1090 m d'altitude, son écoulement y est d'abord souterrain et son exurgence se trouve sur le rebord en amont de Sebdou, au niveau de la grotte de Ghar Boumaaza, il s'affirme après la jonction d'un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains jurassiques et descendent de crêtes atteignant 1500 m. Ces ramifications se réunissent aux environs de Sebdou à une altitude d'environ 900 m. A partir de cet endroit et jusqu'à Sidi Medjahed, l'Oued suit un cours dans une vallée encaissée creusée dans les terrains jurassiques. Dans cette région montagneuse, l'Oued Tafna reçoit l'Oued Khemis (rive droite) et l'Oued Sebdou (rive gauche).

I.5.2 Moyenne Tafna

En partant de Sidi Medjahed, l'Oued pénètre dans le bassin tertiaire et coule dans une vallée peu profonde dans des terrains plus ou moins argileux. De là, la Tafna suit une direction Nord-Sud jusqu'à Bled Chaab, puis se dirige vers le Nord-Est. Cette partie du bassin tertiaire est sillonnée par de nombreux affluents. Sur la rive gauche, ces affluents sont moins importants que sur la rive droite, seul l'Oued Mouilah qui prend naissance au Maroc est remarquable par son parcours et son débit. Entre Bled Chaab et les gorges de Tahouaret, la Tafna reçoit de nombreux affluents qui prennent naissance dans les Traras. On peut citer l'Oued El Malha, l'Oued Dick Chétibia, l'Oued El Habalet, l'Oued Boukiou et l'Oued Dahmane : Sur la rive droite, la Tafna reçoit les Oueds Boumessaoud, Zitoun, Ksoub, Siouf El Nirouf, Romana, Malah et l'Oued Isser qui est un des importants affluents par son long parcours et par son fort débit. Ce dernier prend naissance dans les terrains jurassiques sur le territoire des Beni-Smiel et s'étend vers l'Est de la région de la Haute Tafna. Celui-ci suit une direction Nord-Est et grossie, au Nord d'Ouled Mimoun par l'Oued Lakhdar (Ex : Chouly) (rive gauche) et l'Oued Aïn Tellout (rive droite). Au Nord de la plaine d'Ouled Mimoun, il traverse la petite plaine d'El Fehoul. A l'extrémité occidentale de cette plaine, il reçoit sur la gauche un cours d'eau assez important, l'Oued Sikkak qui descend du massif de la haute Tafna sous le nom Mefrouche et pénètre dans le bassin tertiaire sous le nom d'Oued Saf-Saf.

I.5.3 Basse Tafna

Le cours s'étend des gorges de Tahouaret jusqu'à la mer, sur une distance rectiligne de moins de 20 Km. Comme dans la vallée moyenne, Oued Tafna serpente dans une plaine étroite qui dessine un arc de cercle dont la flèche est orientée Est-Ouest. Il termine son cours dans une région volcanique pittoresque, montrant fréquemment sur les bords de la basse plaine des colonnes basaltiques. La jonction d'Oued Tafna avec la mer se fait par une seule branche, susceptible de se déplacer dans une petite anse sableuse, gracieusement encadrée par l'îlot de Siga et l'île de Rachgoun.

Les affluents que reçoit la Tafna dans son cours inférieur sont assez peu importants. Ils ont une direction à peu près Est-Ouest. Sur la rive droite, l'Oued Lemba et l'Oued Fed El Ateuch coulent dans une dépression argileuse creusée entre le chaînon des Sebaa Chioukh (chaîne du Tessala) et la chaîne du Djebel Skouna. A signaler seulement sur la rive gauche l'Oued Ben Djelloul qui longe, au Sud, le manteau volcanique de la Basse Tafna.

I.6 Hydrogéologie du bassin versant de la Tafna

L'abondance des failles dans la zone d'étude serait la cause principale du compartimentage des différents systèmes aquifères, elles sont aussi la première source des différentes résurgences existantes dans le bassin versant de la Tafna. Ces accidents tectoniques sont également responsables de la distribution spatialement hétérogène de la majorité de ces systèmes. Ainsi, la structure et la nature lithologique des formations géologiques constituant le bassin de la Tafna ont permis d'individualiser plusieurs types d'aquifères. On retrouve (*Bakreti, 2014*) :

- *Aquifères de type phréatique* caractérisant les formations poreuses (gréseuses) occupant des zones restreintes dans le bassin étudié ;
- *Aquifères Karstiques* le plus souvent perchés dominant les zones de reliefs (Khemis, Tlemcen et Sebdou) ;
- *Aquifères captifs* représentés aussi par les formations carbonatées mais qui passent en profondeur sous les marnes du Serravallien.

La plus grande concentration des formations perméables fortement karstifiées se localise principalement au niveau des sous bassins de la haute Tafna (Fig. II.8) : Khemis, Sebdou ou Béni-Bahdel avec plus de 85%. Les autres formations peu perméables avec absence ou peu de karstification occupent presque 78% de la plaine de Maghnia et Zenata (*Azzaz et al., 2008*).

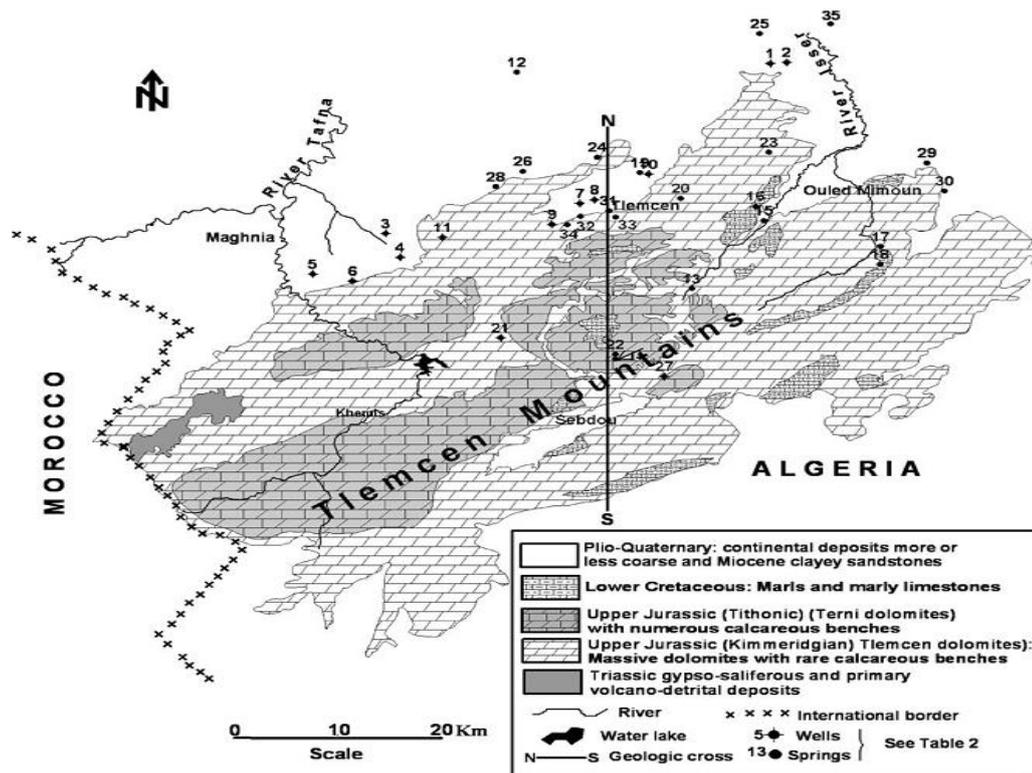


Fig. II.8. Carte de répartition du faciès carbonaté dans le bassin versant de la Tafna.

Source : Azzaz *et al.*, 2008.

I.7 Aperçu sur les sous bassins du bassin versant de la Tafna

I.7.1 Sous bassin versant de Tafna maritime

Le sous bassin versant de Tafna maritime (1608) (Fig. II.6) a une superficie de 392 Km² avec une altitude maximale de 713 m et un périmètre de 116 Km (ABHOCC, 2006 ; Katrouci, 2014). C'est la région la plus basse dans le bassin versant de la Tafna, où toutes les eaux de l'Oued Tafna et ses affluents se collectent.

I.7.2 Sous bassin versant d'Oued Isser (global)

Le bassin versant global d'Oued Isser correspond aux sous bassins (1606) et (1607) du bassin de la Tafna (Fig. II.6). Ce bassin draine dans sa partie amont les formations carbonatées du jurassique jusqu'à Ouled Mimoun. Au-delà, il entaille une gorge profonde dans les marnes du miocène. En amont, Oued Isser reçoit les affluents d'Oued Bouhadi sur sa rive droite et l'Oued Chouly sur sa rive gauche. Sa confluence avec l'Oued Tafna a lieu dans la plaine de Remchi à 80 m d'altitude. Au Nord-Ouest du bassin, les pentes s'accroissent (15% – 30%) (Bouanani, 2004). A son entrée dans le bassin tertiaire, il est grossi au Nord du village d'Ouled Mimoun par l'Oued Chouly (Oued Lakhdar) mais également par l'Oued Ain Tellout sur sa rive droite. Il traverse trois agglomérations bien implantées : Ouled Mimoun, Sidi Abdelli et Bensekrane.

L'aménagement du barrage de Sidi Abdelli a fortement perturbé le débit de l'Oued en aval. Au Nord de la région d'Ouled Mimoun, il traverse la petite plaine d'El Fehoul. A l'extrémité occidentale de cette plaine, il reçoit sur sa rive gauche un cours d'eau assez important qui est l'Oued Sikkak (*Rahmi, 2014*).

I.7.3 Sous bassin versant d'Oued Sikkak

L'Oued Sikkak draine une partie du sous bassin (1607) du bassin versant de la Tafna. Le sous bassin versant de l'Oued Sikkak occupe une superficie de 460 Km² avec un périmètre de 116 Km. Son altitude moyenne est de 475 m. Il est limité :

- Au Sud par les Djebels Nador et Boulaadour ;
- A l'Est par les Djebels Er-Ramlya, Ouakrif et Tabeldaout ;
- A l'Ouest, par le Djebel Teffatisset et le plateau de Zenata ;
- Au Nord par le Djebel Toutlait.

Oued Sikkak prend naissance à 1190 m d'altitude sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen à la source d'Aïn-Rhanous, c'est un affluent de rive gauche de l'Oued Isser avec lequel il conflue au Nord d'Aïn-Youcef. La longueur de son thalweg principal est de 55,7 Km. Il se reforme à partir des sources des cascades d'El-Ourit à 800 m d'altitude et prend le nom d'Oued Saf-Saf jusqu'en aval du village de Saf-Saf puis d'Oued Sikkak à partir de la commune de Chetouane. Il suit d'abord une vallée profonde et encaissée puis continue sur les plaines de Hennaya. L'orientation générale d'Oued Sikkak est Nord-Sud (*Yadi, 1991*).

I.7.4 Sous bassin versant de Tafna Boukiou

Le sous bassin versant de Tafna Boukiou (1605) (Fig. II.6) occupe une superficie de 978 Km² avec un périmètre de 123 Km (*ABHOCC, 2006*). Il est limité à l'Ouest par les monts des traras, au Nord par les montagnes du Djebel dhareddis, au Sud-Ouest par les reliefs du Djebel Fellaoucène qui culminent à 1200 m, tandis qu'à l'Est des plaines basses entourent le bassin à son exutoire vers l'Oued Tafna.

Affluent rive gauche de l'Oued Tafna. L'Oued Boukiou prend sa source sur les hauteurs d'Ouled Chaarbane en amont d'Aïn Kebira non loin de Nedroma à 855 m d'altitude (*Bouguerra et Bouanani, 2016*).

Du point de vue géologique à l'Ouest, un substrat rigide de roches anciennes du Djebel Fellaoucène est caractérisé par des formations schisto- quartziques très compactes du dévonien. Par ailleurs, on rencontre à l'Est des formations du miocène inférieur et moyen avec une alternance de poudingues formés d'éléments calcaires dolomitiques à ciment calcaréogréseux et

des séries argilo-marneuses au sein desquelles s'intercalent des bancs décimétriques de grès ferrugineux friables (*Bouanani, 2004*).

I.7.5 Sous bassin versant de Tafna amont

Le sous bassin versant de Tafna amont (1604) (Fig. II.6) s'étend sur une superficie de 1294 Km². Ce dernier est drainé par les deux oueds principaux :

- *Oued Khemis* : Il prend sa source à une altitude de 1700 m, aux environs du Djebel Dehar Azouj et coule jusqu'à une altitude de 650 m au niveau du barrage Béni-Bahdel (*Boursali, 2016*). Ce sous bassin versant est caractérisé par des pentes assez abruptes dépassant généralement 25% aux abords de l'Oued. À l'Est et l'Ouest du bassin les pentes sont fortes à moyennes (de 3% à 25%) (*Bouanani, 2004*) ;
- *Oued Sebdou* : Il est d'une longueur de 28 Km (*Ghenim et al., 2010*). Il est limité au Nord par les plaines de Maghnia et Hennaya et au Sud par les hautes plaines oranaises. Il est occupé principalement par des montagnes de formation orogénèse alpine dont les sommets culminent à 1465 m d'altitude (monts de Tlemcen). Il se caractérise par un relief abrupt, 49% de sa superficie est à une pente supérieure à 25% (*Megnounif et al. 2003 in Belarbi et al., 2017*).

I.7.6 Sous bassin versant d'Oued Ouardefou (Boughrara)

Le sous bassin versant d'Oued Ouardefou correspond au sous-bassin (1603) (Fig. II.6). C'est un affluent rive droite d'Oued Mouilah. Il se forme au niveau de Maghnia par les affluents d'Oued Mahaguère et d'Oued Aouina. Oued Ouardefou est un cours d'eau temporaire en amont de Maghnia et permanent en aval alimenté principalement et même exclusivement en période d'étiage par les rejets urbains et industriels de la ville de Maghnia, il se jette dans l'Oued Mouilah à une altitude de 290 m (*Taleb, 2004*). A l'Est de cette ville, il rejoint Oued Abbès en portant les eaux industrielles (*Bouklikha, 2011*). Ses principaux affluents sont : Oued Abbès, Oued Aouina.

I.7.7 Sous bassin versant d'Oued Mouilah

Le sous bassin d'Oued Mouilah correspond aux sous bassins (1601) et (1602) (Fig. II.6) dont sa plus grande partie est située en territoire marocain. Le relief assez varié est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées (*Bouanani, 2004*).

Le cours d'eau prend naissance dans la région d'El Abed à 1250 m d'altitude. Il pénètre au Maroc (40 Km au Nord de Oujda) (*Khaouni, 2011*) et prend le nom d'Oued Isly, l'un des plus importants cours d'eau existant dans le couloir Taourirt Oujda (*ABH de la Moulouya, 2010*). Il

redevient permanent en aval près d'Oujda pour s'appeler Oued Bou-Naïm et pénètre en Algérie aux environs de Maghnia sous l'appellation d'Oued Mouilah. La confluence d'Oued Mouilah avec la Tafna se situe à 285 m d'altitude en amont du barrage de Hammam Boughrara, au niveau de Sidi Belkheir (*Dahmni et al., 2002 ; Ghenim, 2001*). Il reçoit sur sa rive droite Oued Ouerdeffou qui forme la réunion des Oueds Abbès, Aouina et Mehaguène (*Terfous et al., 2001 ; Ghenim et al., 2007 ; Ghenim et al., 2008*), et sur sa rive gauche, les Oueds Bou-Selit, Ben-Saria et El Aouedj.

I.8 Ressources en eau du bassin versant de la Tafna

La wilaya de Tlemcen présente la particularité d'abriter la plus grande partie du bassin versant de la Tafna, dont les potentialités lui ont, très tôt, conféré le statut de *réservoir en eau de l'Ouest*. Les ressources en eaux globales de cette wilaya représentent 22,63% des potentialités actualisées de la région Nord-Ouest estimées en période de pluviométrie normale à 1174 Hm³/an (*ANAT, 2009*).

I.8.1 Ressources en eaux superficielles du bassin versant de la Tafna

Avec une superficie de 7245 Km², les potentialités du bassin en eau superficielle en période normales sont évaluées à environ 308 Hm³/an estimé uniquement sur la base des apports des sous bassins mobilisables intégrés au bassin de la Tafna (*ANAT, 2009*). Ce potentiel a toujours représenté l'essentiel de la réserve de la wilaya de Tlemcen et du système hydraulique Ouest. Pour mobiliser cette ressource, des ouvrages hydrauliques ont été implantés au sein du bassin. Ces ouvrages sont constitués de :

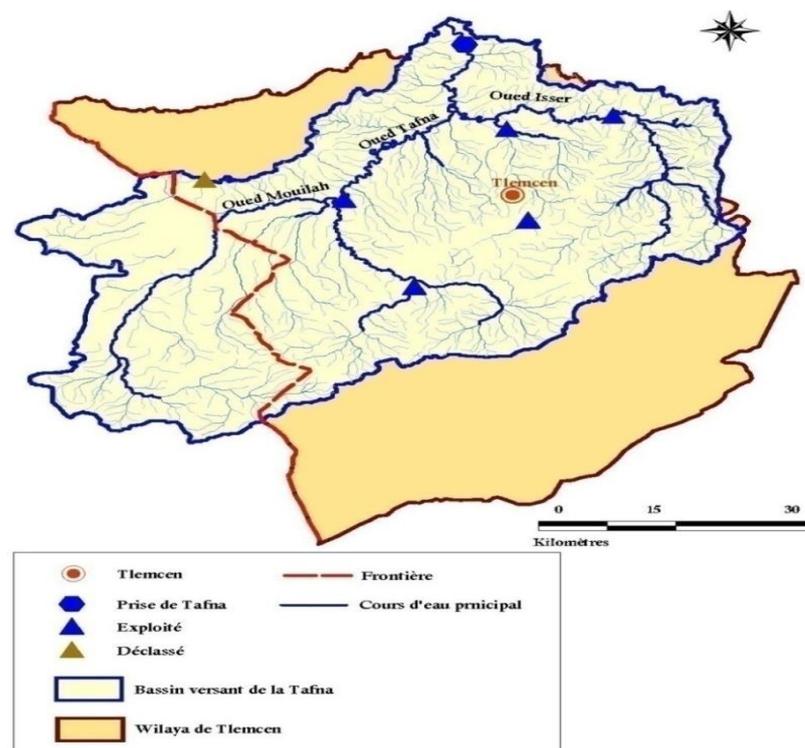
Grands barrages

Jusqu'à l'année 1980, les deux grands barrages Béni Bahdel et Mefrouche arrivaient à subvenir aux besoins de la population locale ainsi qu'à celle de la ville d'Oran. L'accroissement de la population, la diminution non négligeable de la pluviométrie ainsi que le développement socio-économique de la région a poussé les autorités locales à chercher à mobiliser encore plus de ressources en eau. Ainsi, d'autres grands ouvrages ont été réalisés (*Bensaoula et Adjim, 2008*). Actuellement, le bassin versant de la Tafna renferme cinq barrages en exploitation. Ces barrages sont réalisés sur l'Oued Tafna, l'Isser et le Sikkak. Sur l'Oued Tafna on trouve : le barrage de Beni Bahdel et le barrage de Hammam Boughrara. Sur l'Isser : le barrage de Sidi Abdelli et sur le Sikkak : le barrage de Mefrouche et le barrage de Sikkak (Tableau II.3 ; Fig. II.9).

Tableau II.3. Caractéristiques des grands barrages du bassin versant de la Tafna.

Code	1604	1607	1606	1603	1607
Commune	Beni Behdel	Terny	Sidi Abdelli	H. Boughrara	Ain Youcef
Code du barrage	BG1601	BG1602	BG1603	BG1604	BG1605
Nom du Barrage	Beni-Behdel	Mefrouche	Sidi-Abdelli	H. Boughrara	Sikkak
Nom de l'Oued	Tafna	Nechef	Isser	Tafna	Sikkak
Surface du bassin (Km ²)	1016	90	1137	4000	326
Type de Barrage	Multi Voûte	Multi Voûte	Terre	Terre	Terre
Année mise en service	1946	1963	1988	1999	2004
Volume apport (Hm ³ /an)	73,8	18	61	84	25
Volume utile (Hm ³)	47,92	13,99	135,20	149,47	26
Capacité Initiale (Hm ³)	63	15	110	177	27
Capacité levée Mars 2009 (Hm ³)	55,061	15,012	74,898	164,688	25,508
Usage	AEP/IRR	AEP	AEP	AEP	AEP/IRR

Source : ANAT, 2009 ; ABHOCC, 2012.

**Fig. II.9.** Ressources superficielles. Grands barrages du bassin versant de la Tafna.

Petits barrages

Ces ouvrages sont surtout destinés à la mise en valeur agricole. Etant assez importants, ils nécessitent une étude détaillée qui demande beaucoup d'investissements et notamment les

reconnaisances de terrain (*Bensaoula et Adjim, 2008*). Le tableau II.4 donne la liste et quelques caractéristiques des neuf petits barrages implantés au niveau du bassin versant de la Tafna.

Tableau II.4. Principales caractéristiques des petits barrages du bassin versant de la Tafna.

Code	Commune	Code PB	Nom du site	Superficie (Km ²)	Hauteur de la digue (m)	Capacité (Mm ³)	Année mise en service	Etat de l'ouvrage
1607	Amieur	PB1601	Oued Guettara	21,4	14,5	0,3	1990	Moyen
1605	Ouled Riyah	PB1602	Oued Atchane	45,5	18	0,5	1990	Moyen
1603	Zaouia	PB1603	Oued Zouia (Tizi)	27,53	23,6	2	2008	En exploitation
1606	Sidi Abdelli	PB1604	Chaâbat Alia	9,2	0,5	0,4	1980	Moyen
1606	Sidi Abdelli	PB1605	Sid S'Nouci	15,5	13	0,4	1984	Moyen
1607	Sidi Abdelli	PB1606	Oued Tiloua	24,4	18,5	0,35	1990	Moyen
1606	Ouled Mimoun	PB1607	Oued Khalfoun	35,25	16,7	1	2004	En exploitation
1603	Zaouia	PB1608	Oued Aich	45,5	18	0,75	1991	En exploitation
1608	Souk El Tenine (Oulhaça)	PB1609	Oued Bendelloul	27	14,5	0,962	1996	En exploitation

Source : *ABHOCC, 2012*.

Retenues collinaires

Au niveau du bassin versant de la Tafna, toutes les retenues collinaires sont en mauvais état et totalisent une capacité de 3 263 960 m³ pour un volume annuel mobilisé de 389 384 m³ (*ABHOCC, 2006*). Le bilan tiré de cette expérience n'est pas très encourageant. Les raisons de ce semi-échec sont à mettre à l'actif :

- D'une sécheresse persistante qui a fait qu'une bonne partie n'a que très rarement été remplie ;
- Des emplacements pas toujours appropriés. De nombreuses retenues ont été emportées ou totalement envasées lors de la première crue enregistrée ;
- Manque de sensibilisation des fellahs pour l'entretien de ces ouvrages.

L'Annexe.1 donne un état récapitulatif concernant les 56 retenues collinaires implantées au niveau du bassin versant de la Tafna.

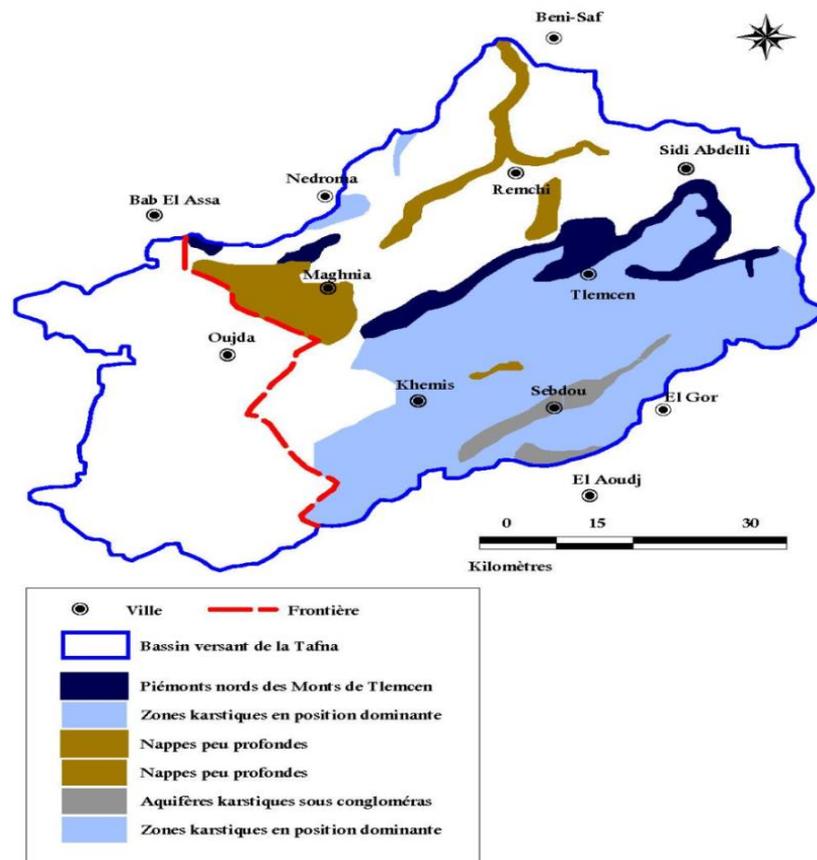
I.8.2 Ressources souterraines du bassin versant de la Tafna

L'approvisionnement des eaux souterraines se fait à partir des forages, des puits et des sources exploités au niveau de l'ensemble des aquifères de la wilaya de Tlemcen et par conséquent du bassin versant de la Tafna. Les trois formations les plus significatives de la Tafna sont la plaine de Maghnia, la plaine alluviale de Tafna et les monts de Tlemcen (Tableau II.5; Fig. II.10).

Tableau II.5. Ressources souterraines en eau du bassin versant de la Tafna.

Nappes et aquifères	Type	Superficie (Km ²)	Potentialités (Hm ³ /an)	Volume Exploité (Hm ³ /an)	Affectations	Observation	Qualité eau
Monts de Tlemcen	Profonde	3070,37	30	24	AEP-IRR	Nombreux puits illicites	Bonne
Plaine de Maghnia	Phréatique	188,82	15	14,15	AEP-IRR- IND	Surexploitation par les puits illicites	Bonne
Monts des Traras	Profonde	291,92	6,5	3	AEP-IRR	N'a pas fait l'objet d'une étude	Bonne
Plaine des Ghossels	Phréatique	36,60	0,8	0,38	AEP – IRR	---	Moyenne
Vallée de la Tafna	Phréatique	178,11	0,6	0,6	AEP-IRR	Prélèvement pour l'irrigation	Moyenne
Total			52,9	42,13	---	---	---

Source : ABHOCC, 2006.

**Fig. II.10.** Représentation cartographique simplifiée des différentes nappes du bassin versant de la Tafna.

La nappe de Maghnia est un système aquifère multicouche à nappe libre, elle est alimentée principalement par les infiltrations des précipitations et par le déversement souterrain des formations jurassiques de Ras Asfour (Deguig, 2009). Sa ressource potentielle est estimée à environ 15 Hm³/an (SOGREAH, 2007). Elle est très largement surexploitée notamment par

le Grand Périmètre Irrigué (GPI) de Maghnia. De nombreux forages, la plupart illicites ont été réalisés pour tenter de compenser le fait que le barrage de Béni-Bahdel, initialement construit pour l'irrigation du Grand Périmètre Irrigué (GPI), est réservé pour l'AEP (SOGREAH, 2007).

Les monts de Tlemcen sont réputés d'avoir une ressource potentielle en eau souterraine important. Ces monts de Tlemcen comprennent de nombreuses sources, généralement exploitées en irrigation traditionnelle. Le débit de nombre d'entre elles a diminué de façon significative ces dernières années, d'autres ont tari avec la diminution de la pluviométrie. Ce phénomène peut être interprété en première approximation par une diminution du niveau piézométrique général de l'aquifère entraînant en premier lieu la diminution des débits des sources qui réagissent comme des trop-pleins. Il est raisonnable de penser que la ressource en eau reste importante malgré la diminution spectaculaire du débit des sources (SOGREAH, 2007).

Pour les systèmes aquifères des monts des Traras. Il s'agit de systèmes monocouches à nappe généralement libre en formations gréseuses ou sableuses.

Le volume global mobilisé à l'échelle de la Tafna à partir de ses aquifères varie selon les sources d'information. Selon ABHOCC (2006), la mobilisation des ressources en eau souterraines au niveau du bassin versant de la Tafna est résumée comme suite

- 84 Forages avec un débit exploité de 957,8 l/s ;
- 157 Puits avec un débit exploité de 212,17 l/s ;
- 22 Sources avec un débit exploité de 73 l/s.

II. Constitution de base de données

Il sera procédé dans cette étape à une présentation, une critique et une analyse des séries pluviométriques, thermométriques et hydrométriques afin de constituer une base de données fiable pour être le support des analyses effectuées par la suite (chapitre 3 et 4). Ces données proviennent de l'Office National de la Météorologie (ONM) et de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH).

II.1 Présentation des données hydrométéorologiques

II.1.1 Données pluviométriques

Le bassin versant de la Tafna est contrôlé par une trentaine de stations pluviométriques répartis à travers huit sous bassins, soit une station pour environ 240 Km² (Ghenim et Megnounif, 2013b) (Annexe.2 ; Fig. II.11).

Si la densité du réseau pluviométrique est conforme aux recommandations de l'organisation mondiale de la météorologie (*Ghenim et Megnounif, 2013b*), la répartition spatiale reste hétérogène où une certaine concentration est remarquée du côté Est et du côté Sud du bassin alors qu'un couloir qui longe la limite Nord-Ouest du bassin semble être un peu dégarni. Ce couloir coïncide à peu près avec les monts des Traras (*Adjim, 2004*).

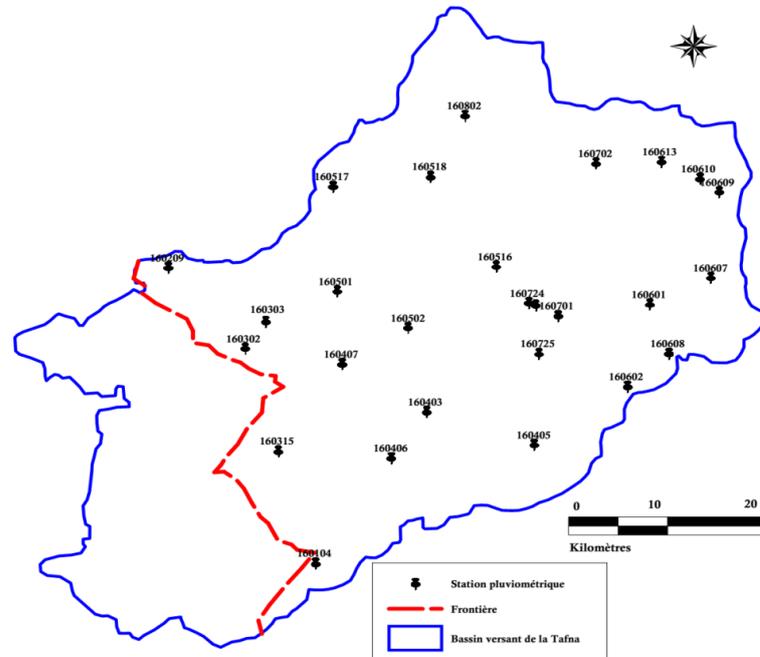


Fig. II.11. Stations pluviométriques du réseau ANRH. Position géographique.

Les stations pluviométriques choisies doivent présenter une chronologie longue pour traduire l'évolution temporelle des précipitations. Par ailleurs, l'historique des stations montre l'impossibilité de sélectionner une période commune longue relative à toutes les stations pluviométriques couvrant le bassin versant de la Tafna. Généralement, la plupart des stations ont été arrêtées pendant la guerre de l'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par un nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autres stations ont été installées à la fin de la décennie soixante lors de la restructuration du réseau algérien (*El-Mahi, 2002 ; Bouanani, 2004*). Ainsi, il est difficile de sélectionner un nombre important de stations sur une longue période de mesure commun. Pour résoudre ce problème, nous avons pris en considération trois critères :

1. *Conserver une répartition homogène des stations de manière à couvrir autant que possible la plus grande superficie du bassin versant de la Tafna ;*
2. *Qualité des données ;*
3. *Taille de la série.*

En se basant sur ces trois critères et selon leurs disponibilités, neuf stations pluviométriques ont été retenues pour l'étude pluviométrique. Généralement, ces stations peuvent être classées en deux catégories :

1. *Stations dotées de séries de données longues et continues* : Les stations du bassin dont les durées d'observations sont relativement longues et continues sont au nombre de quatre seulement. Ce sont celle de Zenata (605310), de Béni Bahdel (160403), d'Ouled Mimoun (160607) et de Bensekrane (160702). Les mesures de ces stations sont continues et sans lacunes ;
2. *Stations dotées de séries de données partielles (lacunaires)* : Le reste des stations disponibles possèdent des séries de mesures de date récente. Dans cette classe, sont rangées les stations de Maghnia (605220), d'Oued Chouly (160601), de Mefrouche (160701), de Pierre de Chat (160802) et de Ghazaouet (040101).

Cependant, comme nous le verrons plus loin, certains traitements se réfèrent à une sélection de période d'observation homogène afin d'assurer une cohérence statistique aux résultats. Ainsi, suite au résultat de cette sélection, nous étions contraints à travailler sur deux périodes. Une première période qui commence de 1941 et s'achève à 2006 et une deuxième période allant de 1970 à 2010. Le tableau II.6 et la figure II.12 regroupent la liste des stations retenues.

Tableau II.6. Stations retenues. Coordonnées et périodes d'observation et d'étude.

Code	Station	Gestion	Equipement	Coordonnée			Période d'observation		Période d'étude
				X(m)	Y(m)	Z(m)	Début	Fin	
605220	Maghnia	ONM	Station climatique	88100	176750	428	1970	2013	1970-2010
160403	Béni-Bahdel	ANRH	Station climatique	115200	165500	660	1941	2014	1941-2006
160601	Oued Chouly	ANRH	PV/ PG auto	149630	181060	747	1970	2010	1970-2010
160607	Ouled Mimoun	ANRH	(**) PV	159000	185100	718	1910	2007	1941-2006
160701	Mefrouche	ANRH	Station climatique	135750	179700	1110	1970	2012	1970-2010
160702	Bensekrane	ANRH	--	142450	204650	247	1910	2006	1941-2006
605310	Zenata	ONM	Station climatique	119670	196626	247	1922	2013	1941-2006
160802	Pierre du Chat	ANRH	PV/ PG auto	123100	213350	60	1968	2010	1970-2010
040101	Ghazaouet	ANRH	--	81138	201365	04	1970	2010	1970-2010

(*) PV/ PG auto : Pluviomètre /Pluviographe automatique (**) PV: pluviomètre

Source : ANRH, 2016.

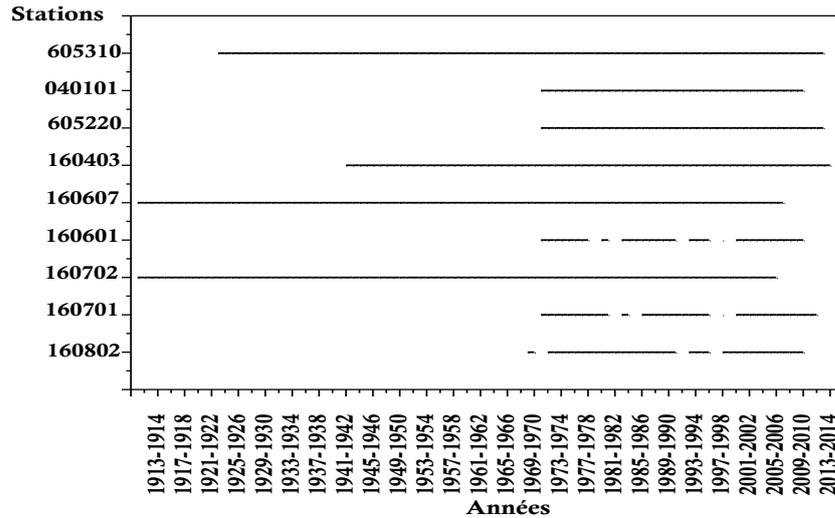


Fig. II.12. Stations retenues. Lacunes et périodes d'observations.

II.1.2 Données thermométriques

Moins disponibles que les données pluviométriques. Nous constituons un jeu de quatre séries complètes des températures moyennes mensuelles et annuelles. Les données des stations de Maghnia (605220) et de Zenata (605310) sont extraites de la base de données de l'Office Nationale de la Météorologie (ONM), alors que les données des stations de Béni-Bahdel (160403) et de Mefrouche (160701) proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH). La position géographique ainsi que les périodes d'observation et d'étude de ces stations sont présentées dans le tableau II.7.

Tableau II.7. Stations retenues. Coordonnées et périodes d'observation et d'étude.

Code	Station	Gestion	Coordonnée			Période d'observation		Période d'étude
			X(m)	Y(m)	Z(m)	Début	Fin	
160403	Béni Bahdel	ANRH	115200	165500	660	1955	2007	1976-2007
160701	Mefrouche	ANRH	135750	179700	1110	1970	2007	1976-2007
605220	Maghnia	ONM	---	---	428	1976	2013	1976-2007
605310	Zenata	ONM	---	---	247	1976	2013	1976-2007

II.1.3 Données hydrométriques

Le réseau hydrographique du bassin versant de la Tafna est contrôlé par une vingtaine de stations hydrométriques réparties de façon plus ou moins homogène (Ketrouci et al., 2012). Ces stations sont gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH) (Annexe.3 ; Fig. II.13).

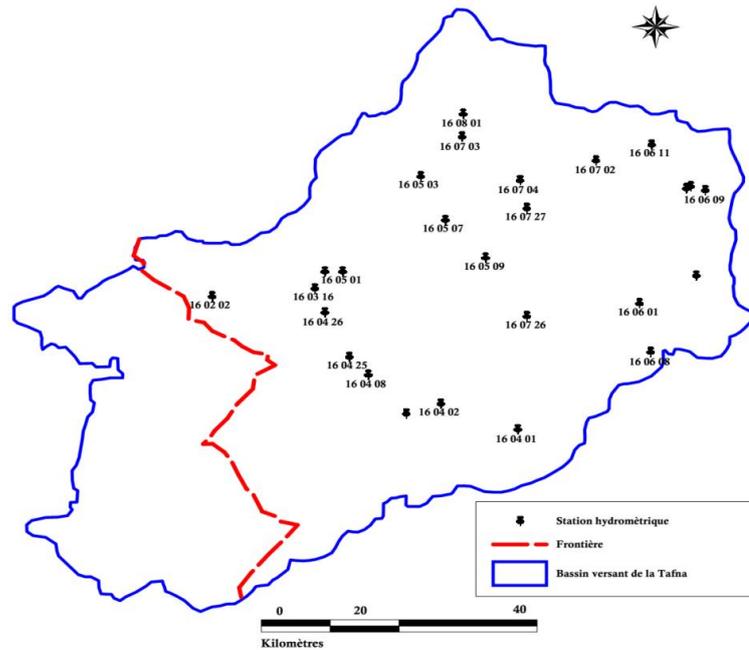


Fig. II.13. Stations hydrométriques. Position géographique.

Après l'indépendance, avec un degré moindre que les stations pluviométriques, les stations hydrométriques ont aussi connues des perturbations dans leur fonctionnement (*Bakreti, 2014*). Sur un total de 26 stations hydrométriques, près de 43% sont installées durant la période 1970-1990. En revanche, avec un taux de 35% ces stations implantées au niveau du bassin versant de la Tafna ont présenté soit des discontinuités dans leurs chroniques soit un coup d'arrêt suite à (*ANRH, 2016*) :

- a. *la détérioration des équipements de mesure* (cas des anciennes stations hydrométriques) ;
- b. *la destruction des équipements suite à des actes malveillants* ;
- c. *la construction des barrages*. Dans ce cas, on cite l'exemple de la station de Sidi Mohammed Bekai (160611) inondée par les eaux du barrage de Sidi Abdelli, ou encore de la station du village Tafna (160426) immergée par le recule des eaux du barrage de Hammam Boughrara qui a atteint son niveau maximum. Alors que l'arrêt définitif de la station de Remchi (160703) le 02/09/2006 vient suite à l'assèchement presque d'Oued Isser après la construction du barrage de Sidi Abdelli puis le barrage de Sikkak ;
- d. *l'arrêt et le transfert de la station*. Dans cette catégorie, on trouve le cas de la station de :
 - i. Bensekrane (160702) arrêtée définitivement le 03/02/2007 et transférée à Sidi Aissa ;
 - ii. Hammam Boughrara (160501) arrêtée le 01/04/1987 et transférée au niveau du village Tafna ;

- iii. Mouilah Pont RN 35 (160504) arrêtée le 17/03/1999 et transférée au niveau du village Legfaf sur Oued Ouerdafou suite à son inondation par les eaux du barrage de Hammam Boughrara ;
- iv. Ain Youcef arrêtée le 01/05/1999 et transférée à 9 km en amont au niveau du gué de la route Hennaya–Amieur, lieu dit Sidi Moussa, suite au projet de construction du barrage de Sikkak.
- e. *l'arrêt des stations hydrométriques des bassins expérimentaux*, telle que la station de Sidi Gourara (03/02/2007), la station de Sidi Heriz (01/05/2006) et la station de Sidi Abdellah Bounakhla (02/12/2006).

Dans cette étude, pour disposer d'un jeu de données suffisamment étoffé pour répondre aux exigences de représentativité nécessaire afin d'assurer une fiabilité des résultats statistiques obtenus, trois aspects importants sont pris en considération au cours de la sélection des stations hydrométriques :

1. *Conserver une répartition homogène des stations de manière à couvrir autant que possible la plus grande superficie du bassin versant de la Tafna ;*
2. *L'utilisation des stations hydrométriques implantées sur les principaux affluents ;*
3. *L'utilisation de chroniques suffisamment longues pour assurer la robustesse des statistiques calculées.*

De même, les observations hydrométriques disponibles nous obligent à départager le travail sur deux périodes. Une première période qui commence de 1912 et s'achève à 2000 et une deuxième période allant de 1973 à 2009. La position géographique, la surface contrôlée ainsi que les périodes d'observation et d'étude de ces stations sont représentées dans le tableau II.8.

Tableau II.8. Stations retenues. Coordonnées, surfaces contrôlées et périodes d'observation et d'étude périodes.

Code	Station	Equipement	Sup (Km ²)	Oued	Coordonnée			Période d'observation		Période d'étude
					X (m)	Y (m)	Z (m)	Début	Fin	
160801	Pierre de Chat	Limnigraphe pneumatique Station automatisée	6900	Tafna	122 925	213 325	75	1910	2000	1912-2000
160703	Remchi	Limnigraphe pneumatique Station automatisée	1935	Isser Sikkak	122 900	208 850	93	1912	2000	1912-2000
160202	Pont RN7/A	Barrage de dérivation Limnigraphe	1820	Mouilah	83 500	182400	420	1973	2009	1973-2009
160402	Béni-Bahdel	Limnigraphe pneumatique Station automatisée	600	Tafna	118 950	163 350	665	1972	2009	1973-2009

II.2 Critique et analyse des données hydrométéorologiques

L'étude de variables hydrométéorologiques repose sur l'homogénéité des séries mesurées (François et al., 1993 in Warin, 1994). Une série chronologique hydrométéorologique homogène est définie comme celle où les variations sont causées uniquement par des variations dans le temps et le climat (Conrad et Pollak, 1950). Toutefois, ces séries sont souvent touchées par des inhomogénéités. En effet, les conditions de mesures dans lesquelles les données hydrométéorologiques sont collectées peuvent changer au cours du temps. Parfois, les causes sont les déplacements des stations, l'utilisation de nouveaux instruments de mesures, le changement de l'opérateur ou l'effet de l'urbanisation autour d'une station de mesure rajoute aux mesures de la température l'effet d'îlot de chaleur urbain (Mateescu, 2011). Par ailleurs, il est fréquent que les chroniques présentent des périodes de données manquantes (panne d'un appareil de mesures, absence de l'observateur non signalée). Dans ce cas, si les trous dans les séries de données sont trop importants et n'apparaissent pas de manière aléatoire dans l'échantillon, l'analyse statistique n'est pas applicable.

II.2.1 Critique et analyse des données pluviométriques

La critique des données pluviométriques est nécessaire, car les séries recueillies sont de taille et de qualité inégales, difficiles à exploiter telles quelles, compte tenu des diverses sources d'erreurs possibles allant des erreurs de manipulation, d'oubli, de transcription (Bodian, 2011). A cet égard, nous avons entamé cette étape par le comblement des lacunes qui a été effectué par l'utilisation de la méthode de la moyenne pondérée, alors que les méthodes du double cumul et des ellipses de Bois ont été utilisées pour vérifier la qualité de nos séries.

Comblement des lacunes par la méthode de la moyenne pondérée

Une des étapes préalables de l'étude a consisté au comblement des lacunes. Avec des périodes d'observations différentes, neuf stations ont été sélectionnées où seulement trois stations révèlent des lacunes ponctuelles au pas de temps mensuel et donc annuel. Les stations concernées sont la station d'Oued Chouly (160601), la station de Mefrouche (160701) et la station de Pierre du Chat (160802). Les lacunes affectent un ou deux mois d'une même année. Les valeurs des mois manquants ont été reconstituées par la méthode de la moyenne pondérée donnée par la formule II.1 (Llamas, 1993 in Adjim, 2004 ; Bouragba, 2006) :

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_x}{P_i} \times P_i \dots \dots \dots (II.1)$$

Où ;

P_x : Valeur du mois manquant de la série x ;

- \bar{P}_x : Moyenne à long terme des précipitations à la station x correspondant au mois manquant ;
- \bar{P}_i : Moyenne à long terme des stations environnantes choisies calée sur la même période sur laquelle à été calculée \bar{P}_x ;
- P_i : Valeur des précipitations correspondant au mois manquant des stations environnantes choisies ;
- N : Nombre de stations environnantes choisies pour compléter la série x.

On admet que l'ensemble des stations sélectionnées obéit à une tendance climatique régionale unique, chacune d'elles n'étant par conséquent qu'une représentation de cette tendance, déformée à la fois par de possibles anomalies locales et par d'éventuelles erreurs d'observation. C'est le principe de pseudo-proportionnalité des totaux pluviométriques entre stations voisins (Kouassi, 2007).

Homogénéisation des séries pluviométriques

Pour mettre en évidence d'une manière relativement simple le contrôle de l'homogénéité, on peut avoir recours à plusieurs méthodes. Dans cette étape de l'application, nous vérifions l'homogénéité des séries pluviométrique en apposant la méthode du double cumul. Le principe de cette méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations, l'une des stations est la station de référence (X) et l'autre la station de base (Y). Il suffit donc de tracer un graphe des quantités (Musy, 2005) :

$$\begin{cases} X(t) = \sum_{i=1}^t x(i) \\ Y(t) = \sum_{i=1}^t y(i) \end{cases} \dots\dots\dots (II.2)$$

Un effet de lissage est obtenu en comparant, au pas de temps choisis (année, saison, mois...) non pas les valeurs observées, mais leur cumul. Il existe alors une relation du type $y_i = a \cdot x_i + b$. Ainsi, si la série testée est homogène, les points obtenus sont alignés selon une droite. Toutefois, si à partir d'une certaine date, on commet une erreur systématique sur Y, les variables x et y seront encore corrélées mais avec des coefficients a' , b' (Laborde, 2000). Dans ce cas, la droite présente une ou plusieurs cassures, cela indique qu'une ou plusieurs ruptures d'homogénéité ont survenu et qu'il y'a lieu de corriger la série avant toute exploitation.

La méthode d'ellipse de Bois (Bois, 1971) a été aussi utilisé pour contrôler les stations qui n'ayant pas donné des résultats satisfaisants avec celle du double cumul. Cette méthode fait l'hypothèse que la station de base Y est liée à la station de référence X par une régression linéaire. La méthode consiste à analyser le cumul des résidus de la régression. Ainsi pour un seuil de probabilité α , un point d'abscisse k ($k = 1, \dots, n$) et d'ordonnée la somme S(k) de k résidus se trouve à l'intérieur d'une ellipse centrée au point $\frac{n}{2}$ et de demi-axe P(k) (l'équation II.3).

$$P(k) = u_{\alpha} \sqrt{\frac{k(n-k)}{(n-1)}} \sigma_{\varepsilon} \dots \dots \dots (II.3)$$

Où, u_{α} est la variable centre réduite de probabilité au non dépassement $\frac{1-\alpha}{2}$, et σ_{ε} est la variance. Il y a α % de chance pour qu'un point représentant un cumul soit en dehors de l'ellipse. Lorsqu'un point du cumul se retrouve en dehors de l'ellipse de seuil de signification α alors l'hypothèse que la station de base Y soit linéairement liée à la station de référence X est rejetée (Bois, 1976 ; Kingumbi, 2006 ; Bois et al., 2007).

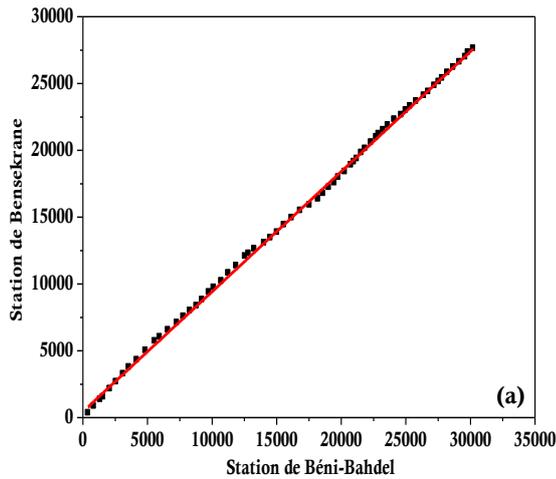
Dans notre cas, nous avons considérée les stations de Beni-Bahdel (160304) et de Zenata (605310) comme station de référence, vu que leurs chroniques sont complètes et longues. En revanche, pour faire un choix plus objectif, nous avons établie une matrice de corrélation (Annexe.4 et Annexe.5) pour rattacher les stations de base à ces deux stations de référence considérées comme homogène (Tableau II.9).

Tableau II.9. Station de référence, stations de base et leur période de référence.

Station de référence	Période de référence	Station de base
Béni-Bahdel	1941-2006	Bensekrane
		Mefrouche
	1970-2010	Oued Chouly
		Maghnia
Zenata	1941-2006	Ouled Mimoun
	1970-2010	Pierre du Chat
		Ghazaouet

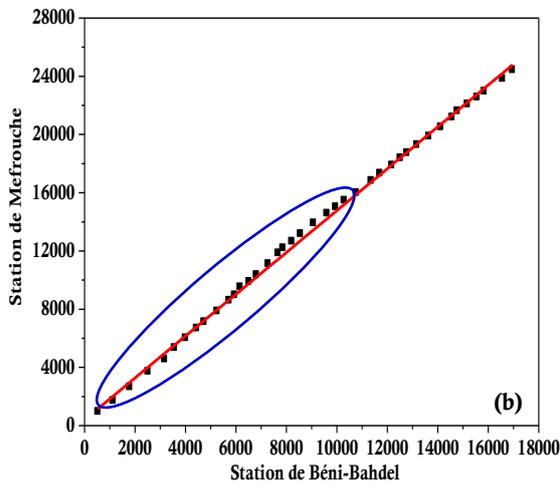
Au préalable, l'examen graphique de la méthode du double cumul entre la série de la station de Béni-Bahdel comme station de référence et les séries des stations de Bensekrane, de Mefrouche, de Maghnia et d'Oued Chouly s'est avéré positif pour la station de Bensekrane et la station de Maghnia (Fig. II.14 (a), (c)), cela signifie que les totaux pluviométriques annuels de ces deux stations peuvent-être considérés comme homogènes sur leur période d'étude respectif. Alors que les résultats d'application de cette méthode montrent la présence des points aberrants dans l'alignement du nuage de points des stations de Mefrouche et d'Oued Chouly (Fig. II.14 (b) et (d)).

Méthode du double cumul entre la station de Bensekrane et la station de Béni-Bahdel

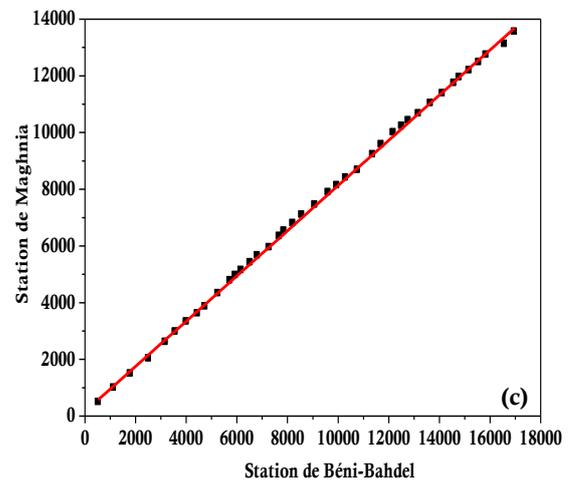


Période de (1941-2006)

Méthode du double cumul entre la station de Mefrouche et la station de Béni-Bahdel



Méthode du double cumul entre la station de Maghnia et la station de Béni-Bahdel



Période (1970-2010)

Méthode du double cumul entre la station d'Oued Chouly et la station de Béni-Bahdel

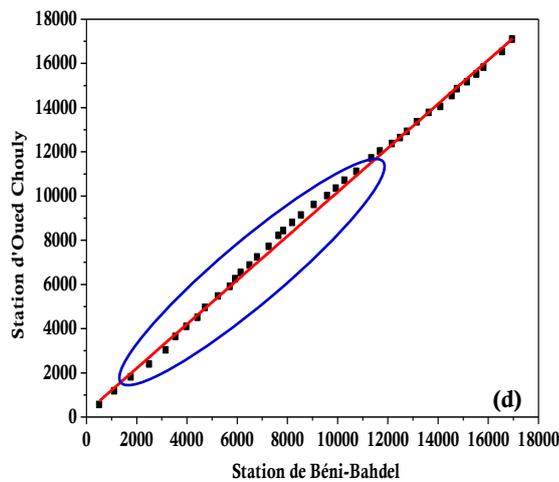
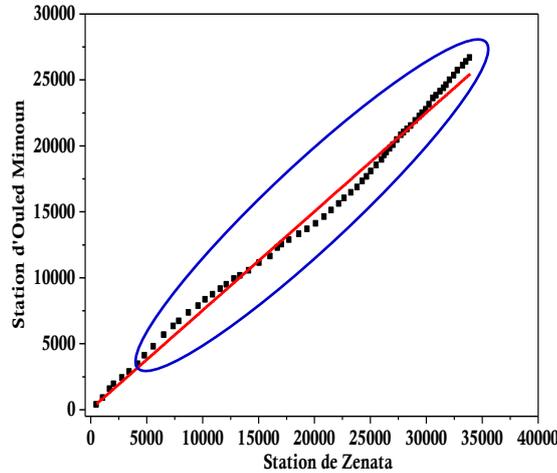


Fig. II.14. Méthode du double cumul entre les stations de Bensekrane, de Mefrouche, de Maghnia et d'Oued Chouly et la station de Béni-Bahdel comme station de référence. Totaux pluviométriques annuels.

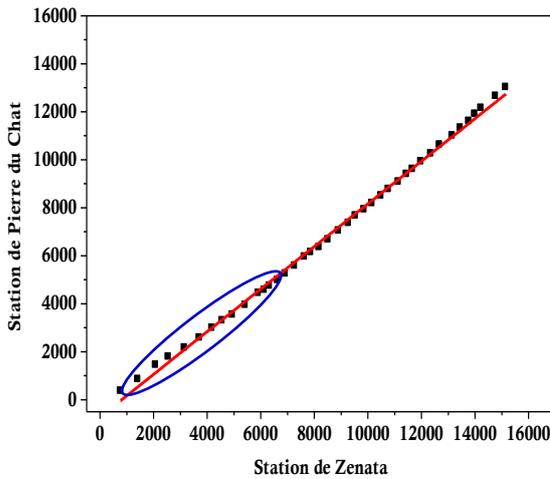
En prenant la station de Zenata comme station de référence, les totaux pluviométriques annuels des stations d'Ouled Mimoun, de Pierre du Chat et de Ghazaouet (Fig. II.15) semblent présenter un défaut d'homogénéité suite à des cassures décelées sur les différentes périodes d'observations.

Méthode du double cumul entre la station d'Ouled Mimoun et la station de Zenata

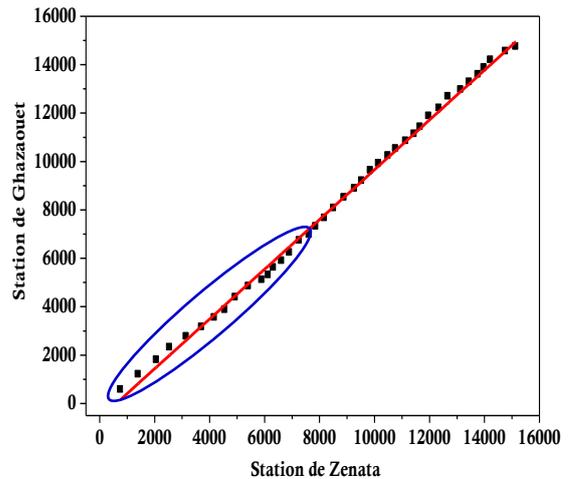


Période (1941-2006)

Méthode du double cumul entre la station de Pierre du Chat et la station de Zenata



Méthode du double cumul entre la station de Ghazaouet et la station de Zenata



Période (1970-2010)

Fig. II.15. Méthode du double cumul entre les stations d'Ouled Mimoun, de Pierre du Chat, et de Ghazaouet et la station de Zenata comme station de référence. Totaux pluviométriques annuels.

La méthode d'ellipse de Bois a été utilisée pour contrôler les stations sur lesquelles nous avons détecté des anomalies en utilisant la méthode du double cumul. Cette méthode a été appliquée à des seuils de signification de 99% et 95%. Les résultats de ce contrôle sont illustrés par les figures II.16 et II.17.

En prenant la station de Béni-Bahdel comme station de référence, seule la station de Mefrouche présente un défaut d'homogénéité aux deux seuils (99% et 95%). La figure II.16 (a) montre qu'au niveau de signification de 99%, la courbe du cumul des résidus présente un éloignement à partir de 1982-1983 et de 1985-1986 jusqu'au 1991-1992. Au seuil de 95%, le tracé obtenu montre que le cumul des résidus présente un grand éloignement de la courbe de contrôle (1975-1976 à 1993-1994). Ainsi la station de Mefrouche est rejetée pour l'hypothèse d'homogénéité.

Au seuil de 99%, la série des totaux pluviométriques annuels de la station d'Oued Chouly peuvent être considérée comme homogène (Fig. II.16 (b)).

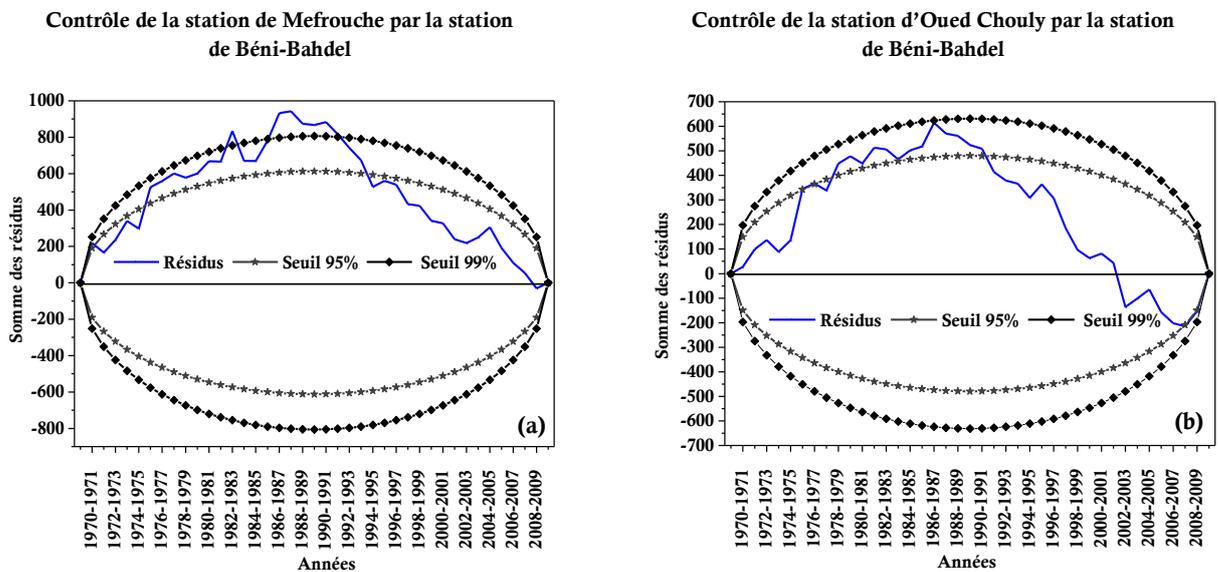
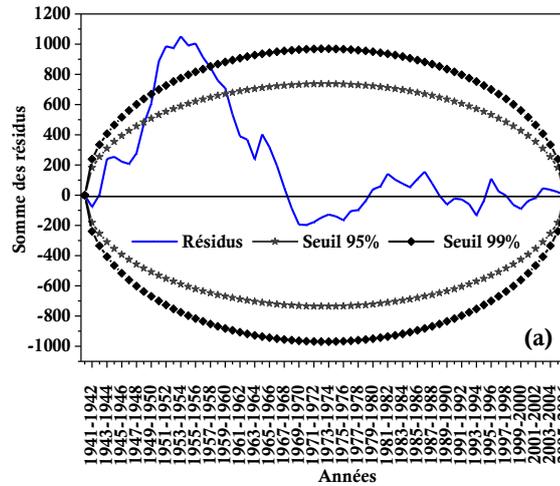


Fig. II.16. Station de Béni-Bahdel comme station de référence. Contrôle par la méthode de l'ellipse de Bois des stations présentant des anomalies par la méthode du double cumul. Totaux pluviométriques annuels (1970-2010).

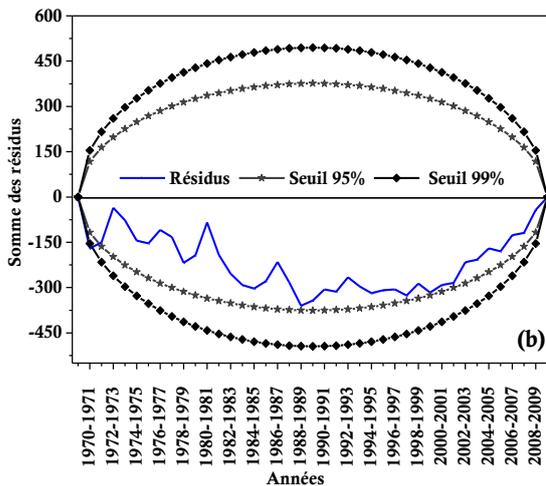
En adoptant la station de Zenata comme station de référence, les tracés obtenus (Fig. II.17 (b) et (c)) montrent que les stations de Pierre du Chat et de Ghazaouet ne présentent pas de défauts d'homogénéité au niveau de signification de 99%. Au seuil de 95% et 99%, la station d'Ouled Mimoun est rejetée pour l'hypothèse d'homogénéité (Fig. II.17 (a)).

Contrôle de la station d'Ouled Mimoun par la station de Zenata

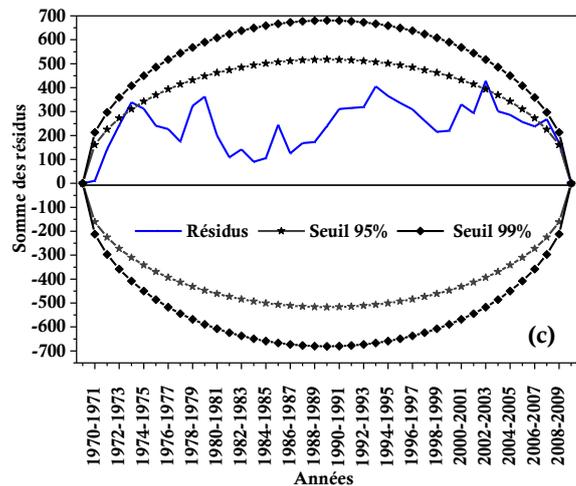


Période (1941-2006)

Contrôle de la station de Pierre du Chat par la station de Zenata



Contrôle de la station de Ghazaouet par la station de Zenata



Période (1970-2010)

Fig. II.17. Station de Zenata comme station de référence. Contrôle par la méthode de l'ellipse de Bois des stations présentant des anomalies par la méthode du double cumul. Totaux pluviométriques annuels.

Nous constatons, que hormis la station d'Ouled Mimoun (1941-2006) et la station de Mefrouche (1970-2010), l'ensemble des stations pluviométriques du bassin versant de la Tafna sélectionnées peuvent être considérés comme homogène. Ainsi, les données des deux stations (Ouled Mimoun et Mefrouche) peuvent être rendue homogènes en effectuant une correction en multipliant les séries des ces stations par le rapport suivant :

$$m = \frac{m_2}{m_1} \dots\dots\dots(II.4)$$

Où m_2 est la pente du segment de la droite représentant les mesures supposées homogènes alors que m_1 correspond à la pente des mesures hétérogènes.

La décision de corriger l'un des tronçons est généralement prise après une connaissance détaillée des circonstances de *l'accident* au cours de l'année qui présente la cassure. Cependant, ne pouvant avoir des informations sur les causes de rupture d'homogénéité mais la solution choisie qui paraît la plus judicieuse est de retenir la période la plus longue comme période de référence et de corriger la période courte sur la base de la période longue (*Dubreuil, 1974*).

L'application de la méthode du double cumul sur les séries des stations d'Ouled Mimoun et de Mefrouche avant et après correction est représentée dans la figure II.18 et II.19.

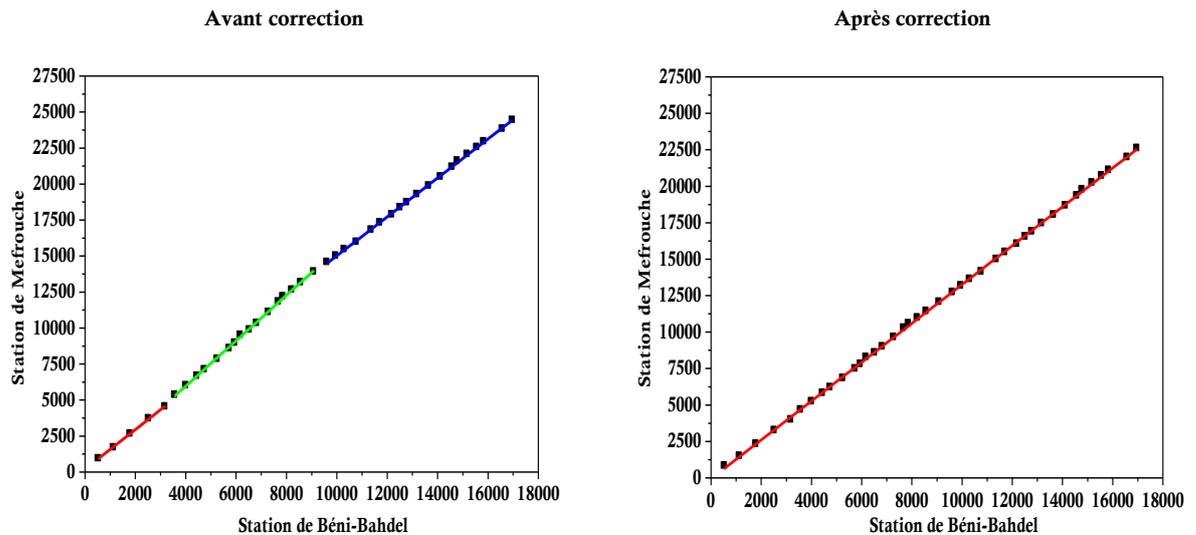


Fig. II.18. Méthode du double cumul entre la station de Mefrouche et la station de Béni-Bahdel comme station de référence avant et après correction des données. Totaux pluviométriques annuels (1970-2010).

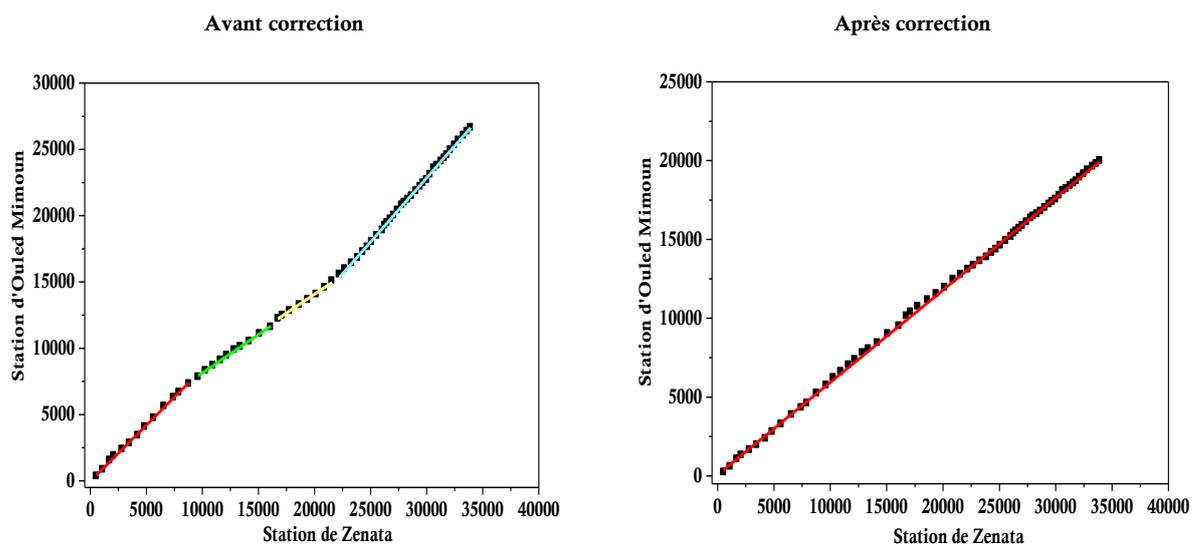


Fig. II.19. Méthode du double cumul entre la station d'Ouled Mimoun et la station de Zenata comme station de référence avant et après correction des données. Totaux pluviométriques annuels (1941-2006).

Caractérisation statistique des séries pluviométriques

Les principaux paramètres statistiques caractérisant les distributions interannuelles des données pluviométriques (mm) des différentes stations retenues sont consignés dans le tableau II.10.

Tableau II.10. Caractéristiques statistiques des stations pluviométriques retenues.
Totaux pluviométriques annuels.

Code	Station	Période d'étude	P _{max} (mm)	P _{min} (mm)	P _{moy} (mm)	S (mm)	C _v
160702	Bensekrane	1941-2006	725,0	184,5	424,8	120,2	0,283
			1964-1965	1944-1945			
160607	Ouled Mimoun		646,5	123,3	307,6	132,8	0,432
			1953-1954	1987-1988			
160403	Béni Bahdel		756,1	187,7	464,8	137,05	0,295
			1967-1968	1987-1988			
605310	Zenata		986	193	521,7	211,7	0,406
			1963-1964	1982-1983			
160802	Pierre du Chat		594,6	135,4	325,5	93,6	0,285
			1972-1973	1981-1982			
160701	Mefrouche		931,4	304,3	565,0	160,9	0,285
			1973-1974	1987-1988			
160601	Oued Chouly	1970-2010	701,1	218,5	426,6	121,4	0,285
			2008-2009	1987-1988			
605220	Maghnia		586,5	173,2	338,8	111,9	0,331
			1974-1975	1982-1983			
040101	Ghazaouet		630,6	198,7	368,7	104,5	0,283
			1971-1972	2009-2010			

S : L'écart type ; C_v : Coefficient de variation.

Les pluies moyennes annuelles sur la période 1941-2006 varient entre 307,6 mm (station d'Ouled Mimoun) et 521,7 mm (station de Zenata) avec une moyenne générale de 429,7 mm. Sur la période 1970-2010, les moyennes annuelles fluctuent entre 325,5 mm (station de Pierre du Chat) et 565 mm (station de Mefrouche) avec une moyenne générale de 404,9 mm. Le rapport entre l'année la plus humide et l'année la plus sèche varie entre 3,1 (station de Mefrouche) et 5,1 (station de Zenata). Nous constatons aussi d'après ce même tableau, que la décennie *quatre-vingts* est la décennie la plus déficitaire sur la Tafna. Le coefficient de variation (C_v) est assez important. La plus forte variabilité est remarquée au niveau de la station d'Ouled Mimoun avec un coefficient de variation égale à 0,432 (1941-2006).

II.2.2 Critique et analyse des données thermométriques

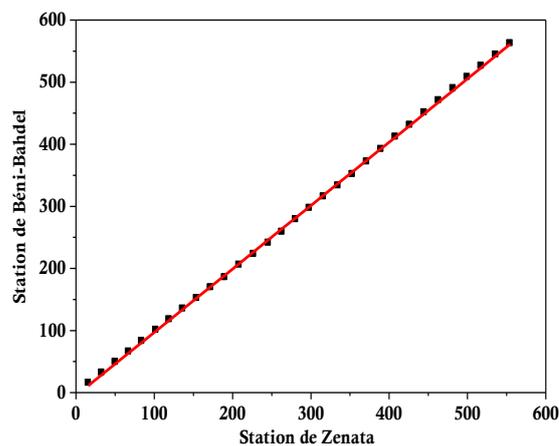
Edifier une base de données thermométrique homogénéisée, dans le but d'accroître la fiabilité d'analyse statistique, nous mène à traiter les séries de températures moyennes annuelles des quatre stations retenues.

Homogénéisation des séries thermométriques

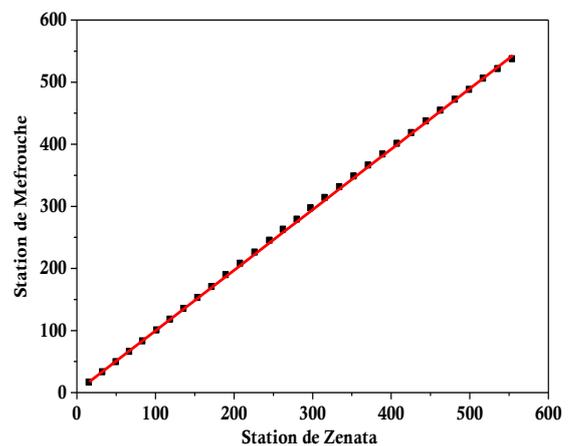
En s'appuyant sur les résultats de la matrice de corrélation (Annexe.6), la station de Zenata (605310) est prise comme station de référence pour s'assurer de la qualité des données des stations de Béni-Bahdel (160403), de Mefrouche (160701) et de Maghnia (605220) sur une période allant de 1976 à 2007. Au cours de cette période ces séries sont complètes.

Nous conservons la même démarche de détection d'inhomogénéité que pour les précipitations. Le résultat d'application de la méthode de double cumul (Fig. II.20) s'est avéré positif pour l'ensemble des stations thermométriques. Une linéarité de la courbe établie entre la station de référence et les stations de base a été remarquée. Par conséquent, on peut conclure que les températures moyennes annuelles des stations de Béni-Bahdel, de Mefrouche et de Maghnia peuvent-être considérées comme homogènes.

Méthode du double cumul entre la station de Béni-Bahdel et la station de Zenata



Méthode du double cumul entre la station de Mefrouche et la station de Zenata



Méthode du double cumul entre la station de Maghnia et la station de Zenata

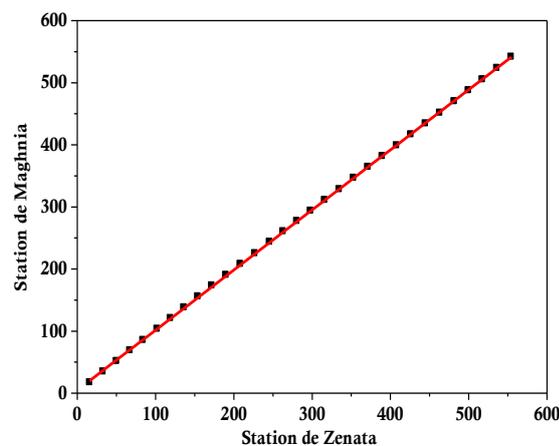


Fig. II.20. Méthode du double cumul entre les stations de Béni-Bahdal, de Mefrouche et de Maghnia et la station de Zenata comme station de référence. Températures moyennes annuelles (1976-2007).

Caractérisation statistique des séries thermométriques

Le résultat de l'analyse descriptive est consigné dans le tableau (II.11). Il s'agit des deux quantiles (le minimum et le maximum), de la moyenne, de l'écart type et de coefficient de variation.

Tableau II.11. Caractéristiques statistiques des stations thermométriques retenues. Températures moyennes annuelles (1976-2007).

Code	Station	T_{moymax} (°C)	T_{moymin} (°C)	T_{moymoy} (°C)	S (°C)	C_v
160403	Béni-Bahdel	20,3 1996-1997	15,6 1976-1977	18,2	1,307	0,072
160701	Mefrouche	18,9 1989-1990	15,5 2005-2006	17,3	0,915	0,053
605220	Maghnia	18,5 2005-2006	16,4 1980-1981	17,5	0,513	0,029
605310	Zenata	18,8 1989-1990	16 1976-1977	17,9	0,683	0,038

S : L'écart type ; C_v : Coefficient de variation.

Les moyennes des températures moyennes annuelles oscillent entre 17,3 °C (station de Mefrouche) et 18,2 °C (station de Béni-Bahdel) avec une moyenne des moyennes de 17,7 °C. Le coefficient de variation C_v ne dépasse pas les 8%, cela signifie que la dispersion des séries thermométriques considérées est faible.

II.2.3 Critique et analyse des données hydrométriques

Selon la disponibilité des données, nous étions contraints à travailler sur deux périodes afin de mieux exploiter nos données. Il s'agit des séries complètes de débits moyens annuels des stations de Pierre du Chat (160801) et de Remchi (160703) sur une période allant de 1912 à 2000 et des stations de Béni-Bahel (160402) et de Pont RN7/A (160202) étalés sur la période 1973-2009.

Homogénéisation des séries hydrométriques

Nous avons gardé la même approche de vérification d'homogénéité que pour les précipitations afin de s'assurer de la qualité des données hydrométriques. Nous avons pris le choix de considérer la station de Pierre du Chat (160801) comme station de référence pour la première période (1912-2000) et la station de Béni-Bahdel (160402) comme station de référence pour la deuxième période (1973-2009). Les figures II.21 et II.22 résument le résultat d'application issu de la méthode du double cumul. Nous constatons donc la présence de points aberrants dans les nuages des points des deux stations testées. Par conséquent, l'hypothèse d'homogénéité des stations hydrométriques est rejetée.

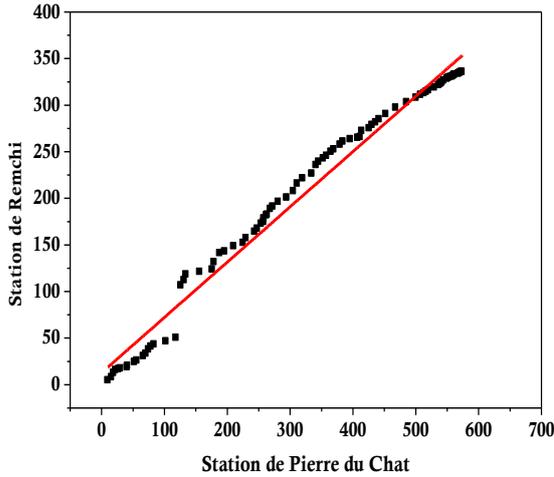


Fig. II.21. Méthode du double cumul entre la station de Remchi et la station de Pierre du Chat comme station de référence. Débits moyen annuels (1912-2000).

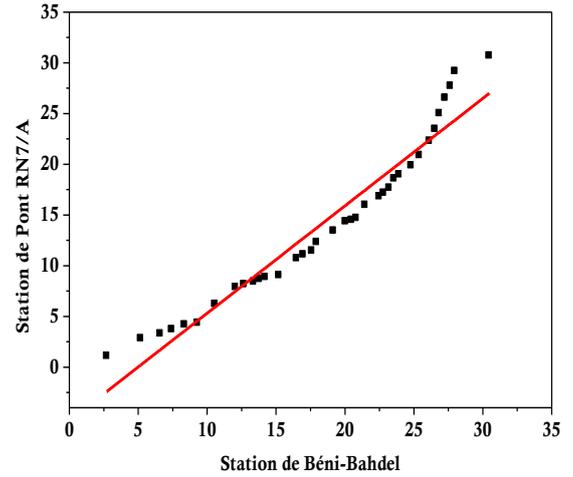


Fig. II.22. Méthode du double cumul entre la station de Pont RN7/A et la station de Béni-Bahdel comme station de référence. Débits moyen annuels (1973-2009).

Suite à ces anomalies détectées sur les séries hydrométriques, la méthode d'ellipse de Bois a été appliquée sur les mêmes données pour vérifier le résultat obtenu par la méthode du double cumul (Fig. II.23 et Fig. II.24). Il faut juste rappeler que cette méthode est une extension de l'idée de la méthode du double cumul en y utilisant des seuils de probabilité de cohérence des données (Bois, 1986) et par la suite, elle remplace avantageusement la méthode du double cumul.

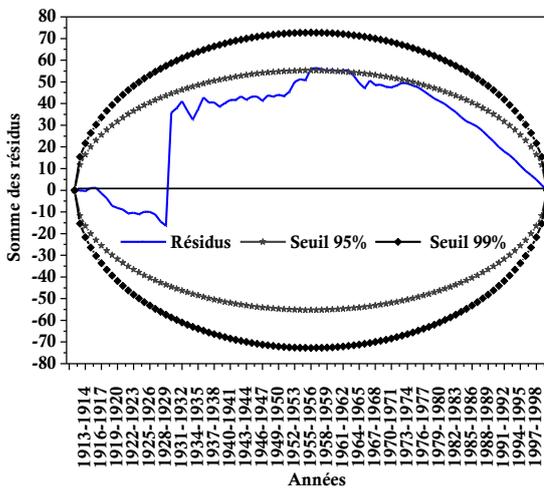


Fig. II.23. Ellipse de Bois entre la station de Remchi et la station de Pierre du Chat comme station de référence. Débits moyen annuels (1912-2000).

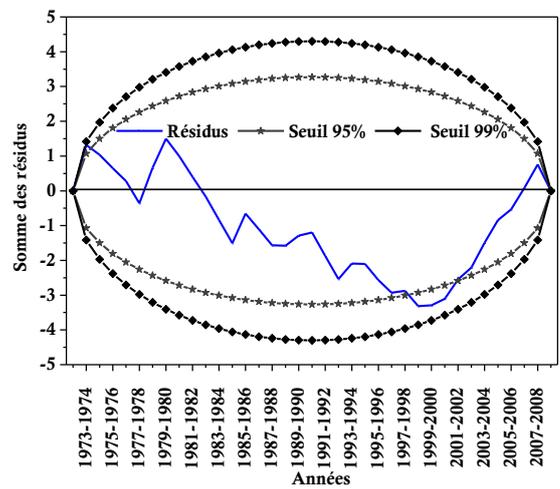


Fig. II.24. Ellipse de Bois entre la station de Pont RN7/A et la station de Béni-Bahdel comme station de référence. Débits moyen annuels (1973-2009).

Aux seuils de signification de 95% et de 99%, le tracé obtenu, entre la station de Remchi et la station de Pierre du Chat comme station de référence, montre que le cumul des résidus qui débute de (0 - 0) et aboutisse à ((1912-2000) - 0) est inclus dans les courbes de contrôles (Fig. II.23). Ceci nous mène à conclure que les débits moyens annuels de la station de Remchi peuvent être considérés comme homogènes.

Au seuil de signification de 99%, en prenant la station de Béni-Bahdel comme station de référence, la série des débits moyens annuels de la station de Pont RN7/A peut être considérée comme homogènes (Fig. II.24).

Caractérisation statistique des séries de données hydrométriques

Les différents paramètres statistiques des débits moyens interannuels sont présentés dans le tableau II.12.

Tableau II.12. Caractéristiques statistiques des stations hydrométriques retenues.
Débits moyens annuels.

Code	Station	Sup (Km ²)	Période d'étude	Q _{moy} max (m ³ /s)	Q _{moy} min (m ³ /s)	Q _{moy} moy (m ³ /s)	Q _{spec} (l/s.Km ²)	S (m ³ /s)	C _v
160801	Pierre de chat	6900	1912-2000	21,87 1932-1933	0,24 1999-2000	6,52	0,95	5,03	0,771
160703	Remchi	1935		9,74 1935-1936	0,07 1999-2000				
160202	Pont RN7/A	1820	1973-2009	1,85 1979-1980	0,15 1992-1993	0,85	0,47	0,47	0,643
160402	Béni-Bahdel	600		2,71 1973-1974	0,31 2004-2005				

Q_{spec} : Débits spécifiques ; S : L'écart type ; C_v : Coefficient de variation

Le résultat d'analyse des débits moyens annuels montre une irrégularité annuelle et interannuelle très marquée. Sur l'ensemble des stations, les lames d'eau écoulées varient énormément d'une année à une autre. En outre, les résultats d'analyse montrent que la décennie 1990, reste la décennie la plus sèche. Par contre, les décennies 1930 (1912-2000) et 1970 (1973-2009) sont excédentaires. Le coefficient de variation C_v varie entre 64% et 74%, cela signifie que la dispersion des séries hydrométriques considérées est très forte.

II.3 Estimation de l'évapotranspiration

Il existe plusieurs formules qui permettent d'estimer l'évapotranspiration (ETP) à partir de différentes mesures climatologiques. Dans cette étude, nous avons utilisé les formules de Thornothwaite et de Turc. La définition de ces deux méthodes est exposée en Annexe.7. Le résultat d'estimation de l'évapotranspiration par ces deux méthodes est illustré par la figure II.25. Elle montre que les totaux d'évapotranspirations annuels estimés par la méthode de Turc

sont supérieurs à ceux estimés par la méthode de Thornthwaite. Outre, le tracé de la droite de régression a mis en évidence une tendance à la hausse sur l'ensemble des stations si non une tendance à la baisse est constatée sur les totaux d'évapotranspirations annuels de la station de Mefrouche calculés par la méthode de Turc. Cela peut être expliqué d'une part par une baisse des moyennes annuelles thermométriques à partir de 1998-1990 et d'autre part par les paramètres entrants dans la formule de cette méthode.

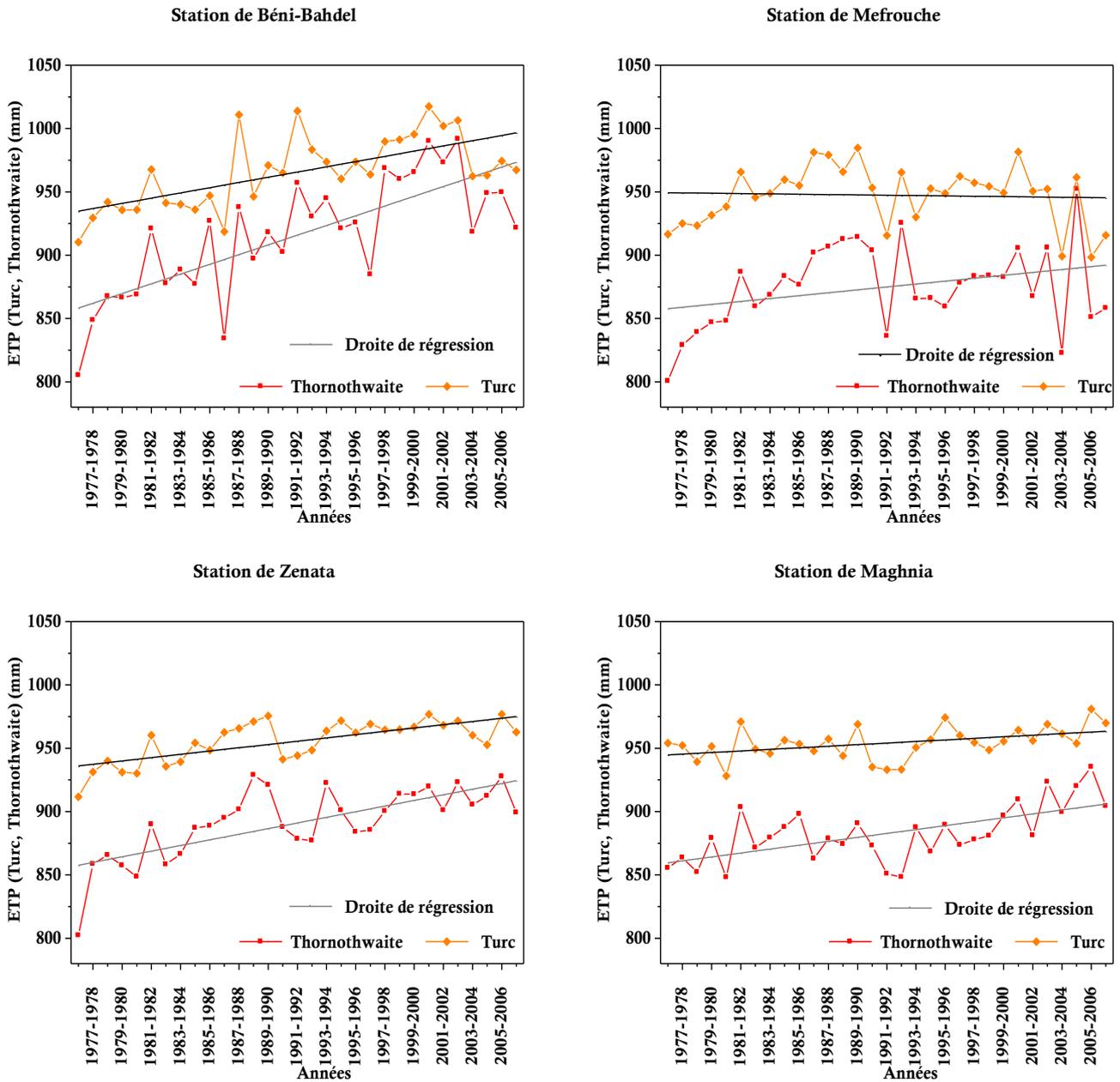


Fig. II.25. Variations interannuelles de l'ETP (Turc et Thornthwaite) des stations de Béni-Bahdel, de Mefrouche, de Zenata et de Maghnia. Période d'étude (1976-2007).

Conclusion

L'esquisse de la situation géographique (espace dans lequel se déroulent les manifestations hydrologiques) de la zone étudiée souligne la diversité des éléments qui la composent. De forme allongée d'orientation Sud-Ouest Nord-Est, le bassin de la Tafna compte huit sous bassins dont un (1601) et une partie de deux (1602 et 1603) sous-bassins appartient au territoire marocain. Il se caractérise par la présence des chaînes montagneuses au Nord et au Sud, entre lesquels s'étend une zone de plaines, formant ainsi une barrière naturelle minimisant la quantité d'eau précipitée sur ces plaines. Son réseau hydrographique est constitué principalement de deux Oueds : l'Isser à l'Est et la Tafna à l'Ouest recevant chacun des affluents descendant des reliefs. L'abondance des failles est la principale cause du compartimentage des différents systèmes aquifères et des différentes résurgences existantes au niveau du bassin de la Tafna. Ce bassin possède ainsi des potentialités en ressources en eau importantes réparties en ressources superficielles et souterraines. Il a été toujours considéré comme étant le principal château d'eau de toute la région hydrographique de l'Oranie.

Après un long et fastidieux travail de collecte, de complément, de critique et d'analyse de données pluviométrique, thermométrique et hydrométrique, nous avons pu construire une base de données. Cette dernière contient neuf stations pluviométriques disposées sur deux périodes une première commence de 1941-2006 et une deuxième allant de 1970 à 2010. De même, sur deux périodes d'étude, une première s'entame de 1912 et s'achève en 2000 et une deuxième commence de 1973 et se termine à 2006, sera notre base des données hydrométriques. En revanche, les données thermométriques contiennent quatre stations couvrant une période allant de 1976 à 2007. Ces données seront la base pour l'élaboration des séries des totaux d'évapotranspirations. Cette base de données sera mise en examen, dans le chapitre 3, afin de caractériser la variabilité hydrométéorologique de cette région.

Chapitre III

Caractérisation de la variabilité hydro- pluviométrique

CARACTERISATION DE LA VARIABILITE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE

« ... Je sais que je ne sais pas ce que je ne sais pas ; j'envie ceux qui sauront d'avantage mais je sais qu'ils auront tout comme moi à mesurer, peser, déduire et se méfier des déductions produites... »

Marguerite Yourcenar, 1991

Introduction

Le présent chapitre expose, à différentes échelles de temps, les résultats d'analyse et de traitement des séries hydro-pluviométriques des stations sélectionnées dans le chapitre précédant. Ces résultats permettent à caractériser la dynamique du régime hydrométéorologique et la réalité des déficits récents, liés notamment à la variation climatique.

I. Détection de rupture de stationnarité dans les séries hydro-pluviométriques

La détection des moments probables de rupture dans les séries chronologiques vise à vérifier la non stationnarité des séries hydrométéorologiques. Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (*Servat et al., 1998*). Alors qu'une série chronologique de réalisations d'une grandeur aléatoire, à un pas de temps donné, est dite stationnaire si ses réalisations sont issues d'un même processus stochastique dont les paramètres (moyenne, variance, asymétrie, auto-corrélation, etc.) restent constants au cours du temps (*Tapsoba et al., 2004*).

Plusieurs tests statistiques peuvent être utilisés pour détecter l'existence d'éventuelles ruptures dans les séries chronologiques hydrométéorologiques. Dans cette étude, nous avons opté pour les tests non paramétriques de Spearman, de Mann-Kendall et de Pettitt. Le test de Spearman reste peu utilisé, cette non-popularité ne permet certainement pas de redouter sa puissance, plusieurs travaux ont montré que les tests de Spearman et de Mann-Kendall sont aussi puissants l'un que l'autre dans la détection des cassures (*Cherfouh, 2011 in Azzi, 2013*). Afin de consolider les résultats des deux premiers tests précédents, nous avons utilisé le test de Pettitt. Ce test est réputé pour sa robustesse (*Lubes et al., 1994 ; Paturol et al., 2010*). Il faut juste préciser que ces tests sont adaptés à la détermination d'une rupture unique (*Ondo, 2002*). La présentation de ces trois tests est portée en Annexe.8. Par ailleurs, les résultats d'applications ont été présentés, ont choisissant un seuil de signification de 5%.

I.1 Détection de rupture de stationnarité dans les séries pluviométriques

I.1.1 Séries interannuelles pluviométriques

Les différents tests de détection de rupture (Spearman, Mann-Kendall et Pettitt) ont été successivement appliqués sur les séries des totaux pluviométriques annuels. Les différents résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau. III.1 Tests statistiques appliqués sur les séries de totaux pluviométriques annuels.

Station	Test de Spearman			Test de Mann-Kendall			Test de Pettitt		
	$u(r_s)$	Seuil de signification	Nature de tendance	$u(t')$	Seuil de signification	Début de la dernière tendance	Valeurs de K_n	Prob (K_n)	Rupture la plus significative
1941-2006									
Bensekrane	-3,99	-1,96	Tendance significative à la baisse	-4,14	-1,96	1976-1977	646	0,00025	1976-1977
Ouled Mimoun	-5,89	-1,96	Tendance significative à la baisse	-6,10	-1,96	1976-1977	972	0,00000	1976-1977
Béni-Bahdel	-3,21	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,03	-1,96	1978-1979	692	0,00007	1974-1975
Zenata	-5,91	-1,96	Tendance significative à la baisse	-5,97	-1,96	1976-1977	1013	0,00000	1975-1976
1970-2010									
Pierre du Chat	-1,22	-1,96	Pas de tendance significative	-0,96	-1,96	Pas de tendance significative	203	0,04614	1980-1981
Mefrouche	-2,39	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,35	-1,96	1975-1976	221	0,02296	1980-1981
Oued Chouly	-2,54	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,77	-1,96	1976-1977	235	0,01280	1980-1981
Maghnia	-1,92	-1,96	Pas de tendance significative	-1,79	-1,96	Pas de tendance significative	207	0,03972	1980-1981
Ghazaouet	-2,91	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,98	-1,96	1974-1975	240	0,01030	1979-1980

Les figures III.1 et III.2 interprètent les résultats d'application des tests de Pettitt et de Mann-Kendall sur les totaux pluviométriques annuels de la période 1941-2006. Les figures représentant les résultats d'application de ces deux tests sur les totaux pluviométriques annuels durant la période étalée de 1970 à 2010 sont exposées en Annexe.9.

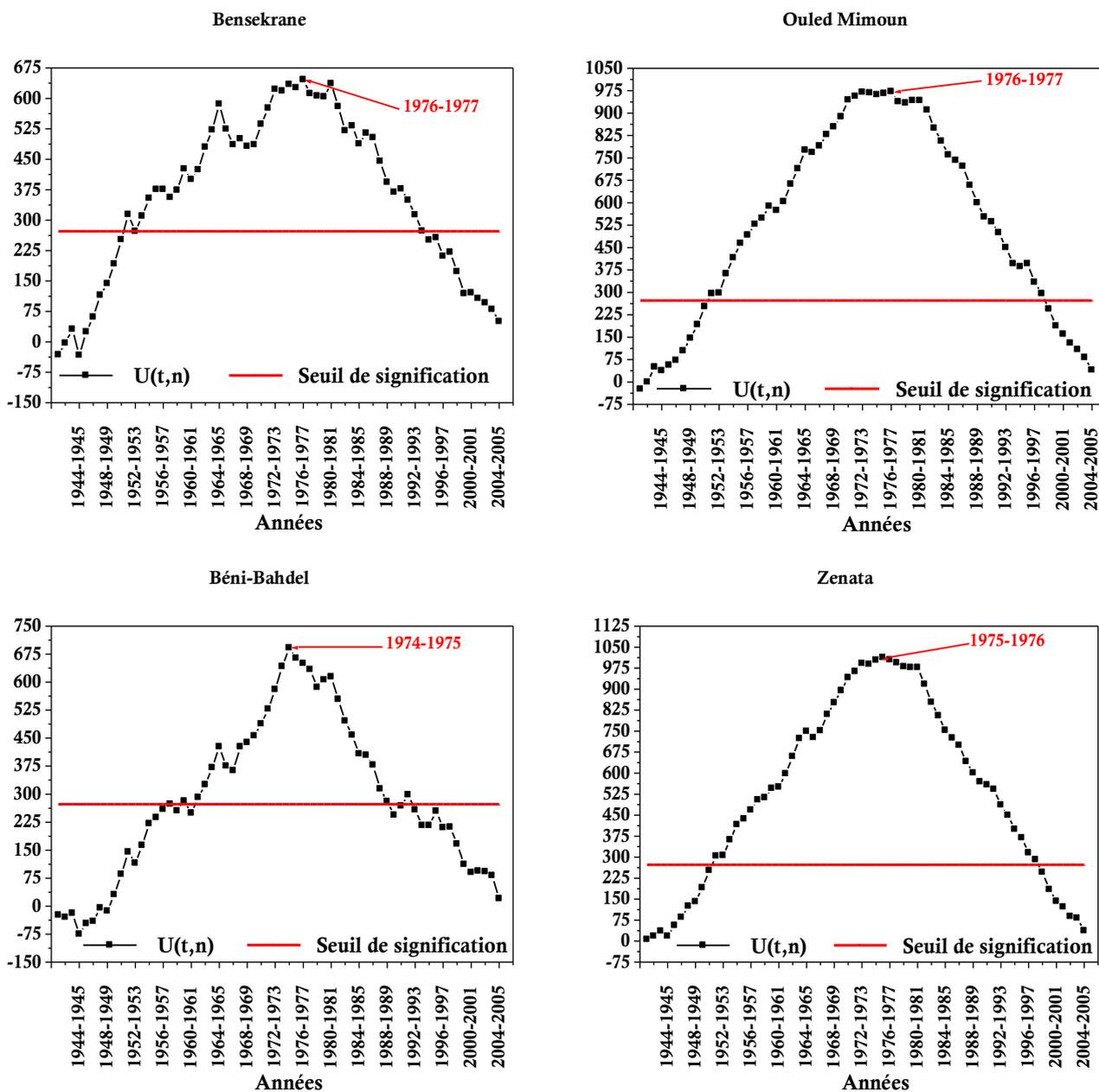


Fig. III.1. Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata par le test de Pettitt. Période d'étude (1941-2006).

Pour la période d'étude 1941-2006, l'analyse des résultats montre que les totaux pluviométriques annuels présentent des ruptures décelées au milieu des années 1970. Cependant, pour la période d'étude 1970-2010, les ruptures ont été majoritairement identifiées en 1980-1981. Les ruptures détectées correspondent à une diminution significative de la moyenne des précipitations au cours du 20^{ème} siècle en général et en particulier depuis le milieu de la décennie 1970 et le début de la décennie 1980.

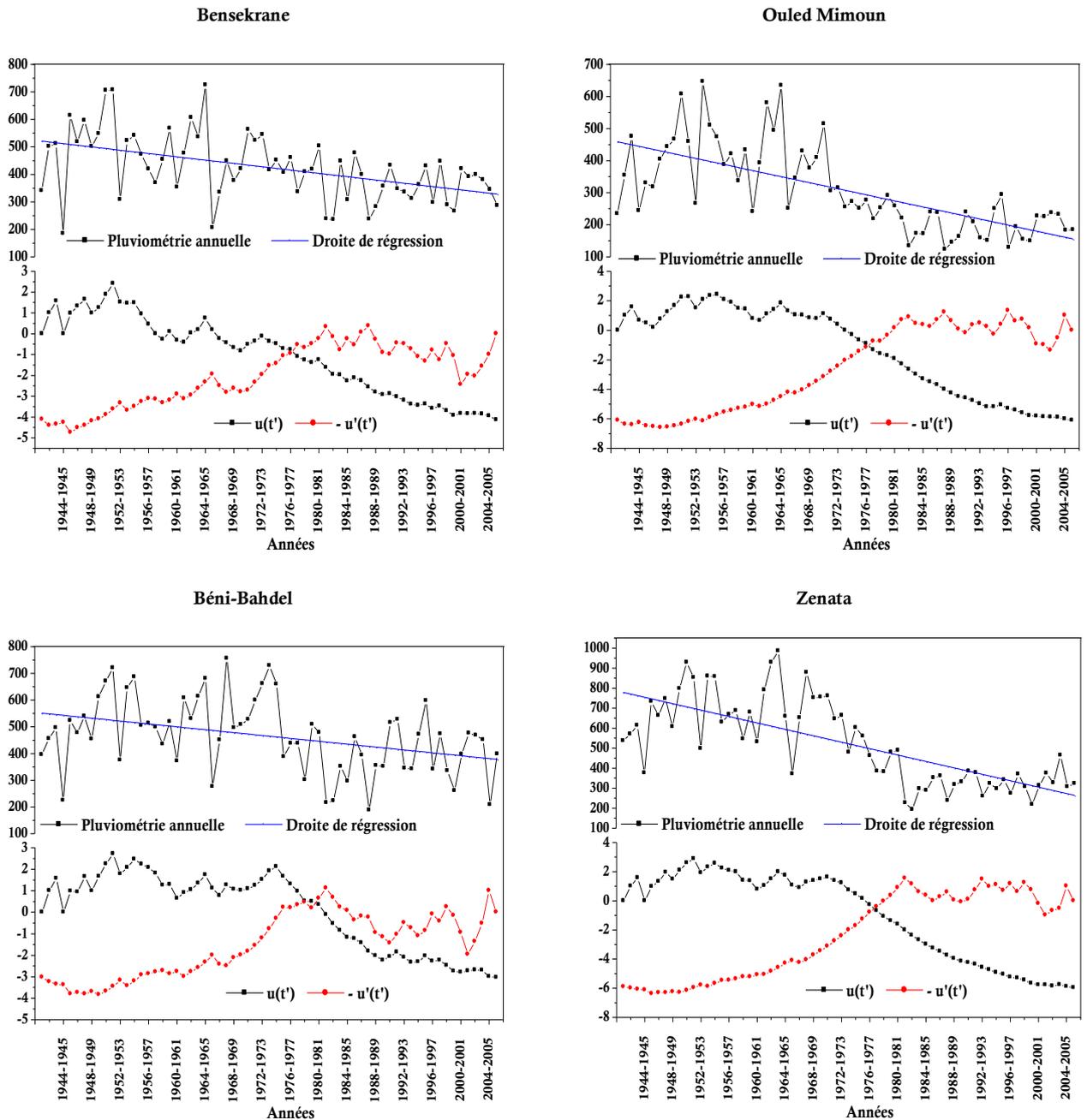


Fig. III.2. Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata par le test de Mann-Kendall. Période d'étude (1941-2006).

D'ailleurs, la régression linéaire entre les précipitations et le temps utilisée pour décrire quantitativement la possibilité d'une tendance linéaire à la baisse ou à l'augmentation dans la série chronologique, confirme que les totaux pluviométriques annuels ont subi une baisse moyenne. Elle a atteint annuellement -8,04 mm à la station de Zenata (période d'étude 1941-2006) (Fig. III.2) et -6,83 mm à la station de Mefrouche (période d'étude 1970-2010) (Annexe.9).

Ces observations corroborent les résultats d'un certain nombre de travaux, parmi lesquels nous pouvons citer : Laborde (1993) ; Matari *et al.* (1999) ; Meddi et Hubert (2003) ; Meddi et Meddi (2004, 2009) ; Medejerab et Henia (2011) ; Achite *et al.* (2014) ; Sebaibi (2014), Belarbi *et al.* (2016) qui situent la plupart la rupture durant la décennie 1970, en Algérie et plus particulièrement dans la partie occidentale de pays.

La localisation de la date de rupture, en adoptant les résultats du test de Pettitt, permet alors de quantifier le déficit de la période après rupture par rapport à celle avant rupture (Tableau III.2).

Tableau. III.2. Déficit pluviométrique des différentes stations étudiées.

Code	Station	Année de rupture	Période d'étude	Avant rupture P_{moy} (mm)	Après rupture P_{moy} (mm)	Déficit (%)
160702	Bensekrane	1976-1977	1941-2006	478,5	358,1	25,16
160607	Ouled Mimoun	1976-1977		393,0	201,5	48,72
160403	Béni-Bahdel	1974-1975		535,7	387,0	27,76
605310	Zenata	1975-1976		681,6	335,2	50,82
160802	Pierre du Chat	1980-1981		403,8	295,8	26,74
160701	Mefrouche	1980-1981	1970-2010	781,5	546,2	30,12
160601	Oued Chouly	1980-1981		534,2	385,8	27,78
605220	Maghnia	1980-1981		435,0	302,3	30,51
040101	Ghazaouet	1979-1980		484,1	330,2	31,79

Durant la période d'étude 1941-2006, les différents résultats obtenus varient entre 25,16 % (station de Bensekrane) et 50,82% (station de Zenata) avec une moyenne de 38,11 %. Pour la période d'étude 1970-2010, le déficit enregistré entre les stations est très proche. Il oscille entre 26,74 % (station de Pierre du Chat) et 31,79% (station de Ghazaouet).

I.1.2 Séries intra-annuelles pluviométriques

La sécheresse récente s'accompagne de certaines modifications de la répartition des précipitations dans l'année se traduisant par des diminutions de la contribution de certains mois au total annuel (Fadika *et al.*, 2008). Pour cette raison, les fluctuations pluviométriques ont été analysées à l'échelle de la saison afin de mieux caractériser les effets de décadence des totaux pluviométriques saisonniers sur ceux de l'année. Ainsi, à l'échelle de la saison, les résultats de détection de rupture obtenus en appliquant les mêmes tests statistiques à un seuil de signification de 5% sont présentés dans les tableaux III.3 et III.4.

En général, l'application du test de Pettitt sur les totaux pluviométriques saisonniers a donné une date de rupture proche à celle obtenue par l'application du test de Mann-Kendall. Par ailleurs, les deux tests confirment que la rupture de stationnarité détectée dans les séries des

totaux pluviométriques annuels sur l'ensemble des stations est due à une tendance à baisse dans les totaux pluviométriques hivernaux ou/et printaniers. En effet, durant la période d'étude 1941-2006, les résultats montrent que les ruptures de stationnarité situées avec un maximum de probabilité durant les deux décennies 1960 et 1970 (Tableau III.3).

Tableau. III.3 Tests statistiques appliqués sur les séries de totaux pluviométriques saisonniers. Période d'étude (1941-2006).

Saison	Test de Spearman			Test de Mann-Kendall			Test de Pettitt		
	$u(r_s)$	Seuil de signification	Nature de tendance	$u(t')$	Seuil de signification	Début de la dernière tendance	Valeurs de K_n	Prob (K_n)	Rupture la plus significative
Bensekrane									
Automne	-0,08	-1,96	Pas de tendance significative	-0,16	-1,96	Pas de tendance Significative	172	1,05822	---
Hiver	-2,90	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,94	-1,96	1965-1966	548	0,00312	1964-1965
Printemps	-2,71	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,80	-1,96	1995-1996	480	0,01406	1975-1976
Eté	-1,02	-1,96	Pas de tendance significative	-1,28	-1,96	Pas de tendance Significative	302	0,28103	---
Ouled Mimoun									
Automne	-1,06	-1,96	Pas de tendance significative	-1,00	-1,96	Pas de tendance Significative	255	0,49362	---
Hiver	-3,84	-1,96	Tendance significative à la baisse	-4,02	-1,96	1969-1970	584	0,00130	1965-1966
Printemps	-3,24	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,25	-1,96	1981-1982	524	0,00544	1981-1982
Eté	-0,93	-1,96	Pas de tendance significative	-1,26	-1,96	Pas de tendance Significative	440	0,03104	1978-1979
Béni-Bahdel									
Automne	1,27	1,96	Pas de tendance significative	1,31	1,96	Pas de tendance Significative	232	0,62815	---
Hiver	-3,20	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,22	-1,96	1973-1974	544	0,00343	1973-1974
Printemps	-1,82	-1,96	Pas de tendance significative	-1,87	-1,96	Pas de tendance Significative	444	0,02876	1975-1976
Eté	0,29	1,96	Pas de tendance significative	0,14	1,96	Pas de tendance Significative	298	0,29593	--
Zenata									
Automne	-2,98	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,03	-1,96	1975-1976	623	0,00047	1979-1980
Hiver	-5,26	-1,96	Tendance significative à la baisse	-5,20	-1,96	1972-1973	904	0,00000	1972-1973
Printemps	-4,01	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,94	-1,96	1981-1982	786	0,00000	1975-1976
Eté	-2,54	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,85	-1,96	1988-1989	621	0,00050	1976-1977

Ces ruptures ont été mises en évidence suite à des tendances significatives à la baisse dans les séries des totaux pluviométriques hivernaux et printaniers. Pour la station d'Ouled Mimoun, plus à la baisse détectée dans les séries des totaux pluviométriques de ces deux saisons, le test de Pettitt détecte une rupture de stationnarité dans la série des totaux pluviométrique estivaux, significative au seuil de 95% à la fin des années 1970. Par ailleurs, à l'échelle annuelle, la station de Zenata a enregistré un déficit de 50,82%. Ce résultat est justifié suite à la diminution détectée durant la décennie 1970 dans les totaux pluviométriques des quatre saisons (Tableau III.3).

Pour la période d'étude 1970-2010, là aussi, la baisse des totaux pluviométriques annuels est due à une baisse constatée sur les totaux pluviométriques hivernaux ou/et printaniers suite à des ruptures détectées durant les décennies 1970 et 1980 (Tableau III.4).

Tableau. III.4. Tests statistiques appliqués sur les séries de totaux pluviométriques saisonniers. Période d'étude (1970-2010).

Saison	Test de Spearman			Test de Mann-Kendall			Test de Pettitt		
	$u(r_s)$	Seuil de signification	Nature de tendance	$u(t')$	Seuil de signification	Début de la dernière tendance	Valeurs de K_n	Prob (K_n)	Rupture la plus significative
Pierre du Chat									
Automne	0,34	1,96	Pas de tendance significative	0,33	1,96	Pas de tendance significative	105	0,72962	---
Hiver	0,54	1,96	Pas de tendance significative	0,56	1,96	Pas de tendance significative	104	0,744	---
Printemps	-2,97	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,94	-1,96	1976-1977	222	0,02205	1981-1982
Eté	0,24	1,96	Pas de tendance significative	-0,26	-1,96	Pas de tendance significative	72	1,24483	---
Mefrouche									
Automne	0,29	1,96	Pas de tendance significative	0,35	1,96	Pas de tendance significative	131	0,41626	---
Hiver	-1,26	-1,96	Pas de tendance significative	-1,28	-1,96	Pas de tendance significative	128	0,44691	---
Printemps	-2,48	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,49	-1,96	1975-1976	196	0,05958	1975-1976
Eté	-1,41	-1,96	Pas de tendance significative	-1,49	-1,96	Pas de tendance significative	121	0,52415	---
Oued Chouly									
Automne	0,69	1,96	Pas de tendance significative	0,75	1,96	Pas de tendance significative	154	0,22855	---
Hiver	-1,36	-1,96	Pas de tendance significative	-1,33	-1,96	Pas de tendance significative	161	0,18681	---
Printemps	-2,69	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,68	-1,96	1975-1976	199	0,05346	1976-1977
Eté	-0,91	-1,96	Pas de tendance significative	-1,10	-1,96	Pas de tendance significative	144	0,30016	---
Maghnia									
Automne	0,92	1,96	Pas de tendance significative	0,93	1,96	Pas de tendance significative	119	0,54768	---
Hiver	-1,64	-1,96	Pas de tendance significative	-1,58	-1,96	Pas de tendance significative	167	0,15603	1980-1981
Printemps	-2,26	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,38	-1,96	1975-1976	180	0,10328	1977-1978
Eté	-0,33	-1,96	Pas de tendance significative	-0,47	-1,96	Pas de tendance significative	68	1,31025	---
Ghazaouet									
Automne	-0,76	-1,96	Pas de tendance significative	-0,72	-1,96	Pas de tendance significative	113	0,62204	---
Hiver	-1,58	-1,96	Pas de tendance significative	-1,63	-1,96	Pas de tendance significative	174	0,12543	1979-1980
Printemps	-2,50	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,52	-1,96	2002-2003	182	0,09667	1993-1994
Eté	0,79	1,96	Pas de tendance significative	0,47	1,96	Pas de tendance significative	93	0,90672	---

A l'échelle mensuelle, les déficits et les variations des moyennes pluviométriques des répartitions mensuelles avant et après rupture sont résumés dans les tableaux portés en Annexe.10. Une récapitulation des déficits pluviométriques est consignée dans le tableau III.5. Ces résultats d'analyse nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Tableau III.5. Récapitulation des déficits pluviométriques en (%) des différentes stations étudiées.

	Automne			Hiver		Printemps			Eté			
	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
1941-2006												
Bensekrane	--	--	--	<u>47,12</u>	35,61	4,92	36,27	<u>38,23</u>	26,59	--	--	--
Ouled Mimoun	--	--	--	<u>46,11</u>	43,32	11,18	38,26	<u>48,99</u>	34,64	50,61	<u>59,69</u>	35,48
Béni-Bahdel	--	--	--	<u>50,67</u>	33,36	16,28	29,31	<u>55,24</u>	24,23	--	--	--
Zenata	42,99	<u>68,92</u>	20,18	<u>65,96</u>	55,51	31,05	45,97	<u>64,55</u>	58,52	<u>70,56</u>	55,31	39,09
1970-2010												
Pierre du chat	--	--	--	--	--	--	50,24	<u>59,61</u>	42,84	--	--	--
Mefrouche	--	--	--	--	--	--	61,14	<u>61,93</u>	43,45	--	--	--
Oued Chouly	--	--	--	--	--	--	<u>60,74</u>	56,62	42,20	--	--	--
Maghnia	--	--	--	38,15	14,16	<u>53,26</u>	38,52	<u>61,33</u>	42,15	--	--	--
Ghazaouet	--	--	--	<u>49,43</u>	0,45	34,37	33,10	51,01	<u>52,91</u>	--	--	--

Période Septembre-Novembre

Sur les neuf stations, seules les observations de la station de Zenata révèlent une tendance significative à la baisse durant cette période. La variabilité pluviométrique moyenne intermensuelle montre que la période avant rupture est excédentaire avec un maximum de 62,62 mm en octobre (Annexe.10). La période après rupture est caractérisée par une diminution des lames d'eau précipitées, avec une forte baisse sur ce mois et un déficit de 68,92% (Tableau III.5).

Période Décembre-Février

Pour la période d'étude 1941-2006, les dates de rupture sont diversement distribuées pour les quatre stations. Néanmoins, une forte baisse au mois de décembre a été détectée après rupture sur l'ensemble des stations. Les déficits enregistrés varient entre 46,11% (station d'Ouled Mimoun) et 65,96% (station de Zenata) (Tableau III.5; Fig. III.3).

Durant la période d'étude 1970-2010, la saison hivernale est caractérisée par un déficit pluviométrique de 53,26% enregistré au mois de février pour la station de Maghnia et de 49,43% au mois de décembre pour la station de Ghazaouet (Tableau III.5; Fig. III.3).

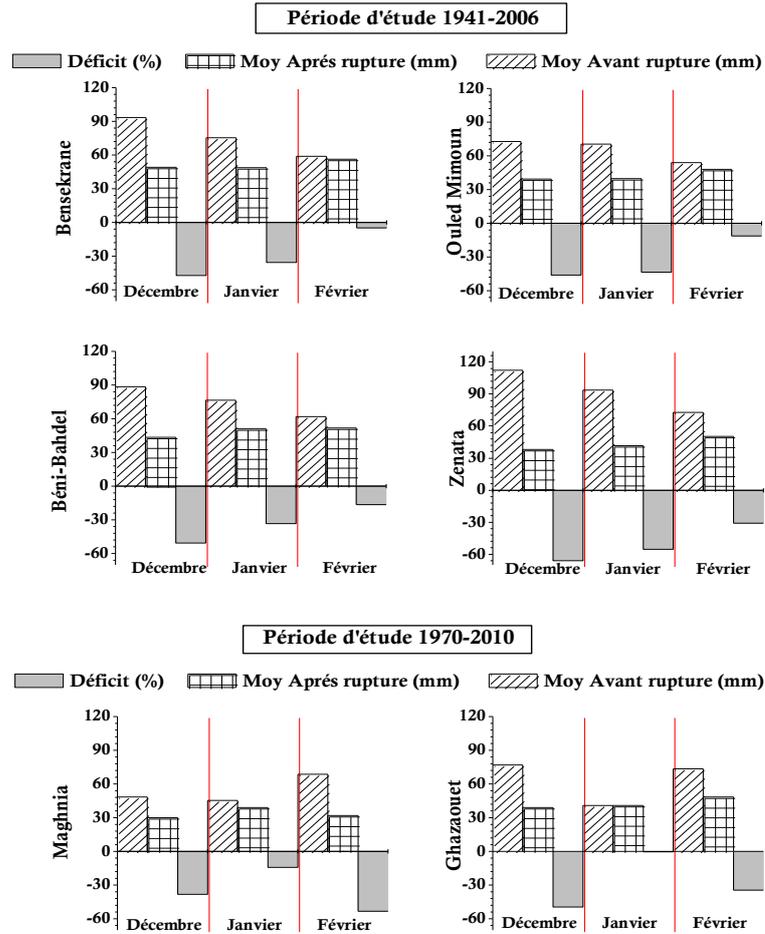


Fig. III.3. Déficients et variations des moyennes des répartitions pluviométriques à l'échelle hivernale avant et après rupture.

Période Mars-Avril

Durant la période d'étude 1941-2006, l'ensemble des stations enregistrent un important déficit au mois d'avril (Annexe.10). Les différents résultats constatés sur ce mois varient entre 38,23% (station de Bensekrane) et 64,55% (station de Zenata) (Tableau III.5; Fig. III.4).

Durant la période d'étude 1970-2010, la période après rupture est caractérisée par une diminution des lames d'eau précipitées. Une forte baisse au mois d'avril et un déficit de 59,61 % est enregistré à la station de Pierre du Chat. Ce déficit atteint la valeur de 61,33% pour la station de Maghnia et de 61,93 % pour la station de Mefrouche. En outre, la station d'Oued Chouly enregistre un déficit de 60,74% au mois de mars. Pour la station de Ghazaouet, il atteint la valeur de 52,91 % au mois de mai (Tableau III.5; Fig. III.4).

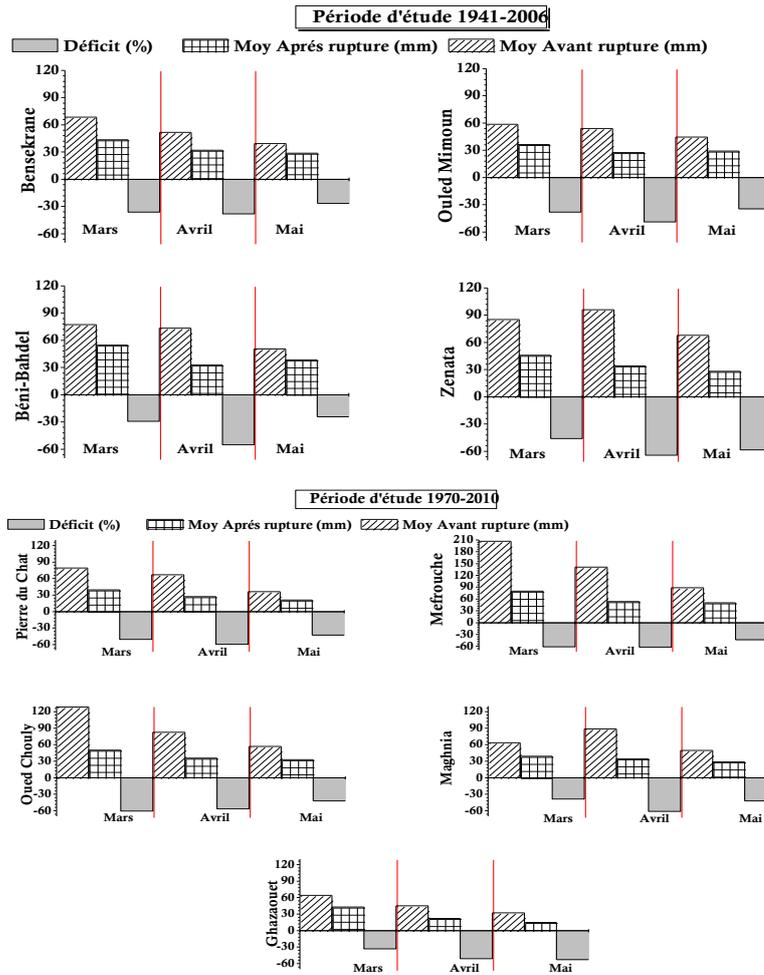


Fig. III.4. Déficients et variations des moyennes des répartitions pluviométriques à l'échelle printaniers avant et après rupture.

Période Juin-Août

Seules les stations d'Ouled Mimoun et de Zenata présentent une rupture de stationnarité dans leurs chroniques estivales. Le déficit pluviométrique le plus important enregistré est de 59,69% au mois de juillet pour la station d'Ouled Mimoun et de 70,56 % au mois de juin pour la station de Zenata (Tableau III.5).

I.2 Détection de rupture de stationnarité dans les séries hydrométriques

I.2.1 Séries interannuelles hydrométriques

A un seuil de signification de 5%, les résultats d'applications des trois tests sur les séries de débits moyens annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi, de Pont RN7/A et de Béni-Bahdel sont résumés dans le tableau III.6 et les figures III.5 et III.6.

Tableau. III.6. Tests statistiques appliqués sur les séries de débits moyens annuels.

Station	Test de Spearman			Test de Mann-Kendall			Test de Pettitt		
	$u(r_s)$	Seuil de signification	Nature de tendance	$u(t')$	Seuil de signification	Début de la dernière tendance	Valeurs de K_n	Prob (K_n)	Rupture la plus significative
1912-2000									
Pierre du Chat	-3,23	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,30	-1,96	1994-1995	432	0,16129	1975-1976
Remchi	-4,44	-1,96	Tendance significative à la baisse	-4,65	-1,96	1986-1987	619	0,01138	1974-1975
1973-2009									
Pont RN7/A	1,64	1,96	Pas de Tendance significative	1,88	1,96	Pas de Tendance significative	151	0,11534	--
Béni-Bahdel	-3,21	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,60	-1,96	1981-1982	195	0,01717	1986-1987

Les séries des modules annuels des stations de Pierre du Chat et de Remchi analysées sur la période allant de 1912 à 2000 présentent une rupture de stationnarité détectée au milieu des années 1970 (Tableau III.6; Fig.III.5). D'après le test de Pettitt (Fig. III.5), la statistique du test atteignant son maximum en 1975-1976 dans la série hydrométrique de la station de Pierre du Chat et en 1974-1975 dans celle de la station de Remchi.

Durant la période d'étude 1973-2009, la rupture a été identifiée au milieu de la décennie 1980 dans la série des modules annuels de la station de Béni-Bahdel (Tableau III.6; Fig. III.5). Par contre, aucune rupture de stationnarité n'a été détectée dans la chronique hydrométrique de la station de Pont RN7/A (Tableau III.6).

L'identification de ces ruptures est une conséquence attendue suite à une tendance très significative à la baisse des modules annuels au cours du 20^{ème} siècle en général et en particulier depuis le milieu des décennies 1970 et 1980.

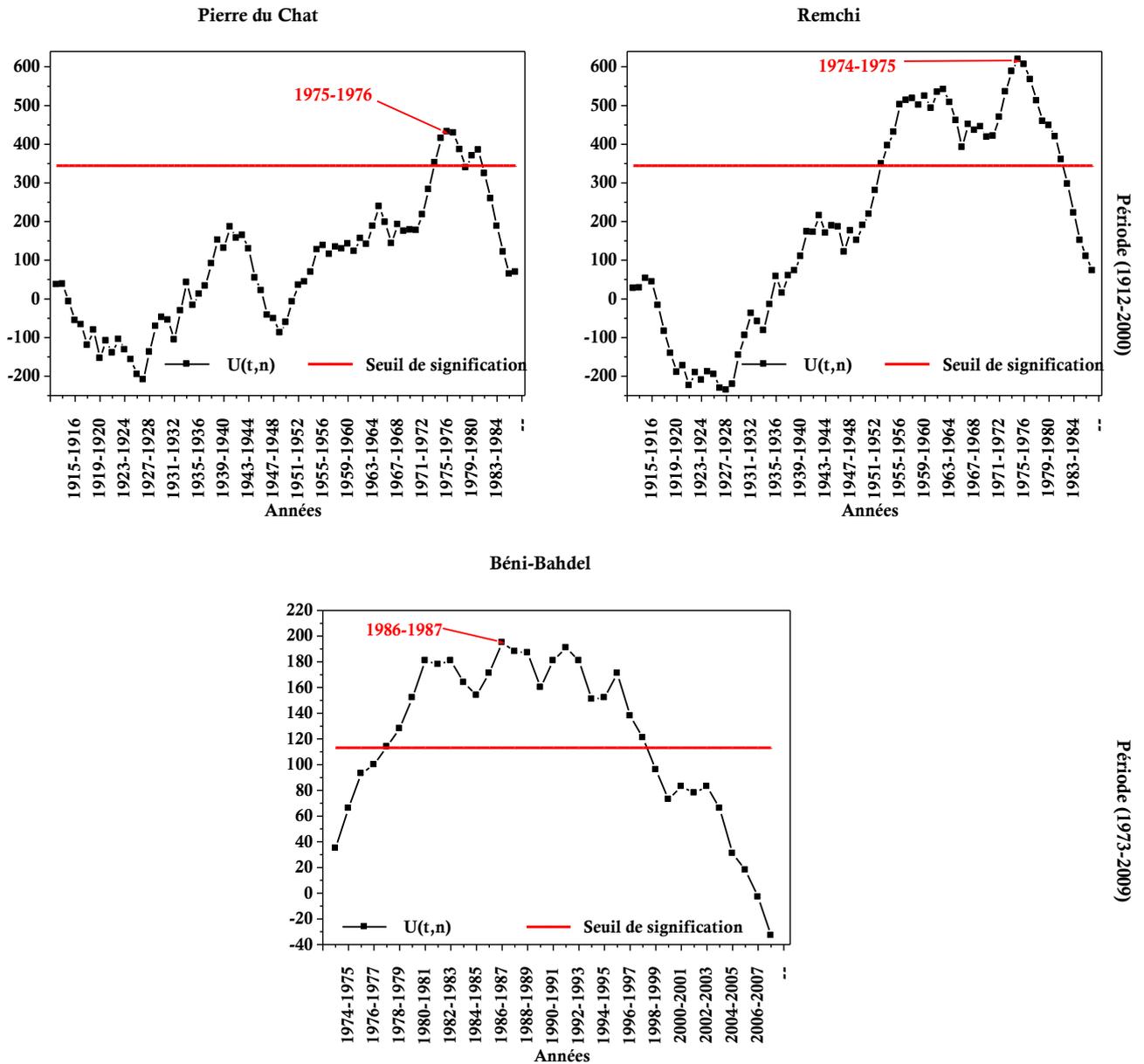


Fig. III.5. Etude de la tendance des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi et de Béni-Bahdel par le test de Pettitt.

En outre, la régression linéaire entre les modules annuels et le temps affirme que ces derniers ont subi une baisse moyenne. Elle a atteint annuellement $-0,27$ mm à la station du Pierre du Chat durant la période d'étude 1912-2000, et $-1,57$ mm à la station de Béni-Bahdel durant la période allant de 1973 à 2009 (Fig. III.6).

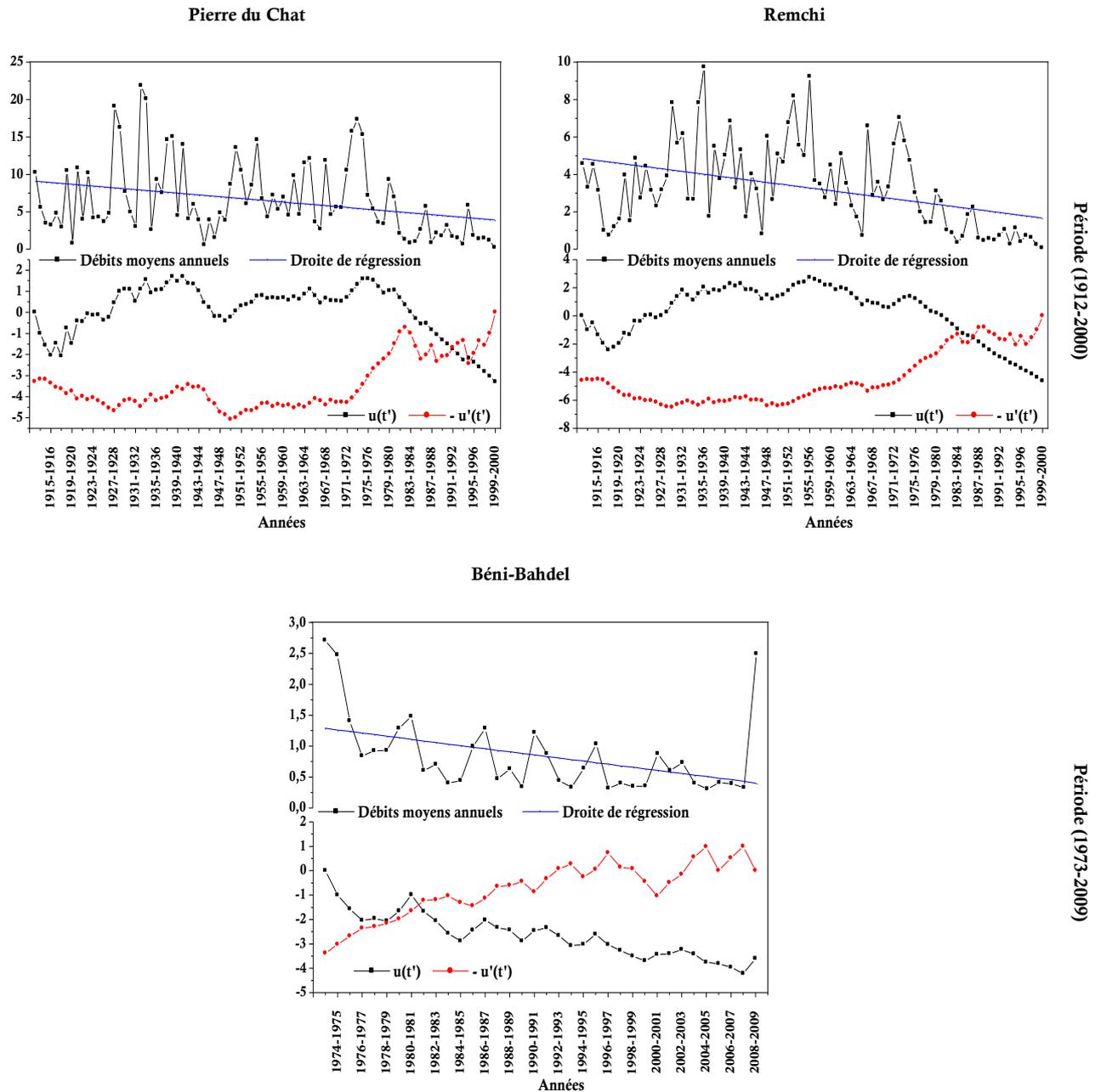


Fig. III.6. Etude de la tendance des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi et de Béni-Bahdel par le test de Mann-Kendall.

Pour la période d'étude 1912-2000, le déficit d'écoulement calculé de part et d'autre la date de rupture de chaque série de modules annuels atteint des valeurs importantes (Tableau III.7). Il fluctue entre 65,34% (station de Pierre du Chat) et 72,86% (station de Remchi) avec une moyenne générale de 69,1%. Durant la période d'étude 1973-2009, il dépasse 53% pour la station de Béni-Bahdel.

Tableau. III.7. Déficit hydrométrique des différentes stations étudiées.

Code	Station	Année de rupture	Période d'étude	Avant rupture	Après rupture	Déficit (%)
				Q_{moy} (m ³ /s)	Q_{moy} (m ³ /s)	
160801	Pierre du Chat	1975-1976	1912-2000	7,94	2,75	65,34
160703	Remchi	1974-1975		4,12	1,12	72,86
160402	Béni-Bahdel	1981-1982	1973-2009	1,41	0,66	53,13

I.2.2 Séries intra-annuelles hydrométriques

À un seuil de signification de 5%, les résultats de détection de rupture de stationnarité à l'échelle de la saison, en appliquant les mêmes tests statistiques sur les chroniques hydrométriques, sont présentés dans le tableau III.8.

Tableau. III.8. Tests statistiques appliqués sur les débits moyens saisonniers.

Saison	Test de Spearman			Test de Mann-Kendall			Test de Pettitt		
	$u(r_s)$	Seuil de signification	Nature de tendance	$u(t')$	Seuil de signification	Début de la dernière tendance	Valeurs de K_n	Prob (K_n)	Rupture la plus significative
1912-2000									
Pierre du Chat									
Automne	1,51	1,96	Pas de tendance significative	1,54	1,96	Pas de tendance significative	153	0,673071	--
Hiver	-3,33	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,55	-1,96	1986-1987	323	0,489524	1964-1965
Printemps	-3,86	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,89	-1,96	1980-1981	567	0,026148	1974-1975
Eté	-2,42	-1,96	Tendance significative à la baisse	-1,95	-1,96	Pas de tendance significative	512	0,058230	1976-1977
Remchi									
Automne	-3,41	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,56	-1,96	1980-1981	1099	0,000000	1962-1963
Hiver	-4,58	-1,96	Tendance significative à la baisse	-5,05	-1,96	1986-1987	726	0,001632	1961-1962
Printemps	-4,04	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,95	-1,96	1986-1987	546	0,035841	1975-1976
Eté	-3,54	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,91	-1,96	1980-1981	557	0,030430	1975-1976
1973-2009									
Béni-Bahdel									
Automne	-0,95	1,96	Pas de tendance significative	-1,23	1,96	Pas de tendance significative	118	0,35025	1982-1983
Hiver	-3,37	-1,96	Tendance significative à la baisse	-3,90	-1,96	1987-1988	231	0,00252	1987-1988
Printemps	-2,68	-1,96	Tendance significative à la baisse	-2,83	-1,96	1980-1981	173	0,03728	1981-1982
Eté	-3,65	-1,96	Tendance significative à la baisse	-4,55	-1,96	1981-1982	210	0,00803	1986-1987

A l'échelle de l'année, les résultats d'analyse nous ont permis de constater que les séries des modules annuels étudiées sur la période 1912-2000 présentent des ruptures de stationnarité détectées au milieu des années 1970 et le début des années 1980 pour celle examinée sur la période allant de 1973 à 2009. Selon la statistique du Pettitt, ce résultat est une conséquence attendue suite à une baisse détectée (rupture), en général, sur les quatre saisons.

En adoptant la même démarche d'analyse que les précipitations, les déficits et les variations des moyennes des répartitions mensuelles hydrométriques avant et après rupture sont présentés en Annexe.11. Une récapitulation des déficits hydrométriques est consignée dans le tableau III.9. Ces résultats montrent que :

Tableau III.9. Récapitulation des déficits hydrométriques en (%) des différentes stations étudiées.

	Automne				Hiver		Printemps			Eté		
	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
1941-2006												
Remchi	46,91	<u>57,14</u>	51,05	55,90	60,56	<u>65,37</u>	62,65	84,66	<u>84,96</u>	80,90	84,10	<u>95,46</u>
Pierre du Chat	--	--	--	30,97	57,59	<u>61,27</u>	50,81	<u>87,54</u>	82,48	81,18	81,03	<u>82,60</u>
1973-2009												
Béni-Bahdel	31,01	<u>+3,82</u>	43,53	26,56	23,19	<u>61,13</u>	59,13	<u>74,17</u>	64,22	53,15	<u>63,77</u>	49,81

Période Septembre-Novembre

Pendant la période 1912-2000, l'analyse des variations des moyennes de répartitions hydrométriques automnales de la station de Remchi montre que la période avant rupture est excédentaire avec un maximum de 2,59 m³/s au mois de novembre (Annexe. 11). La période après rupture sur cette station est caractérisée par une baisse des débits moyens. Le déficit enregistré durant cette période atteint la valeur de 57,14% au mois d'octobre (Tableau III.9). Cependant, la station de Béni-Bahdel sur sa période d'étude allant de 1973 à 2009 enregistre un excédent de +3,82 % au mois d'octobre suite à une hausse de 0,03 m³/s. En revanche, des déficits de 31,01% et de 43,53% sont enregistrés respectivement aux mois de septembre et de novembre sur cette station (Tableau III.9).

Période Décembre-Février

La variabilité moyenne inter-mensuelle de la saison d'hiver se définit avant rupture par une période excédentaire avec des maxima identifiés au mois de février sur l'ensemble des stations (Annexe.11). Cependant, ce mois enregistre une forte diminution après rupture et des déficits de 61,27% pour la station de Pierre du Chat, de 65,37% pour la station de Remchi (période d'étude 1912-2000) et de 61,13% pour la station de Béni-Bahdel (période d'étude 1973-2009) (Tableau III.9; Fig. III.7).

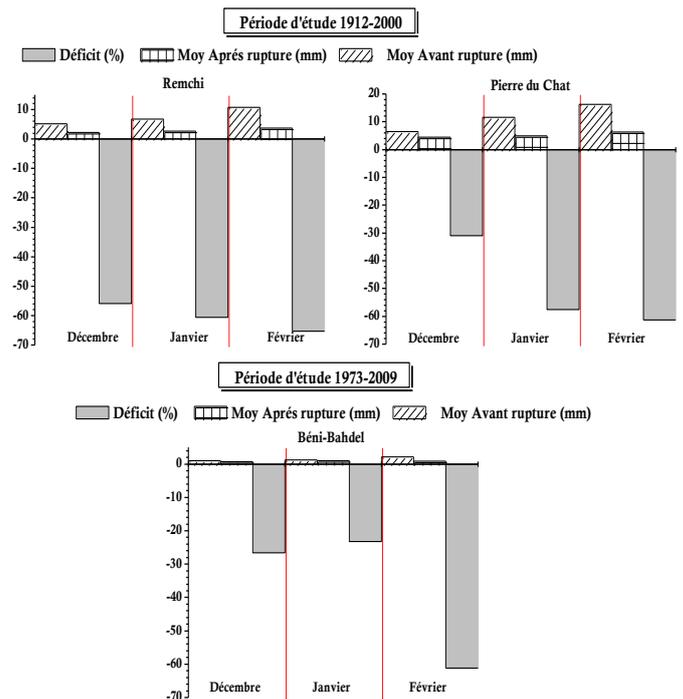


Fig. III.7. Déficits et variations des moyennes des répartitions hydrométriques à l'échelle hivernale avant et après rupture.

Période Mars-Avril

Durant la période d'étude 1912-2000, entre la période avant et après rupture, le débit moyen du mois d'avril de la station du Pierre du Chat passe de 18,88 m³/s à 2,35 m³/s (Annexe.11). Durant cette période, les déficits identifiés sur ce mois dépassent la valeur de 84% pour la station de Remchi et de 87% pour la station de Pierre du Chat (Tableau III.9 ; Fig. III.8). Pour la période d'étude 1973-2009, le mois d'avril reste le mois le plus touché par cette baisse (Annexe.11) avec un déficit de 74,17% pour la station de Béni-Bahdel (Tableau III.9 ; Fig. III.8).

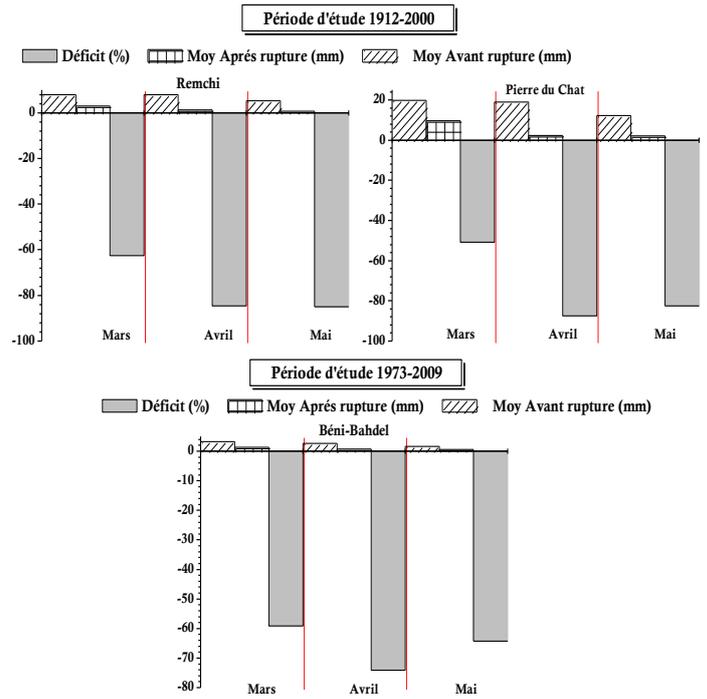


Fig. III.8. Déficits et variations des moyennes des répartitions hydrométriques à l'échelle printanière avant et après rupture.

Période Juin-Août

Avec des débits moyens mensuels inférieurs à 0,61 m³/s après rupture sur les deux stations (Annexe.11), le déficit hydrométrique a pu dépasser la valeur de 95% au mois d'août pour la station de Remchi (période d'étude 1912-2000) (Tableau III.9; Fig.III.9). Durant le période allant de 1973-2009, le déficit atteint une valeur de 63,77% au mois de juillet pour la station de Béni-Bahdel (Tableau III.9; Fig. III.9).

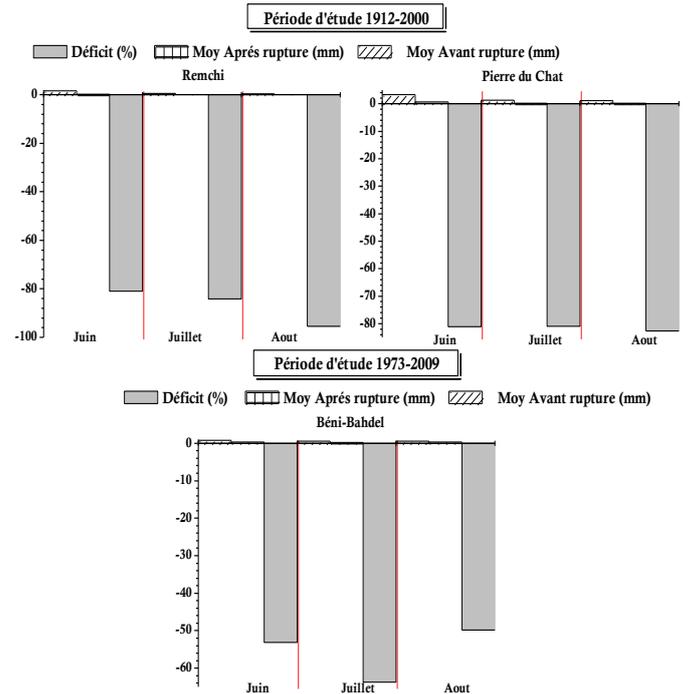


Fig. III.9. Déficits et variations des moyennes des répartitions hydrométriques à l'échelle estivale avant et après rupture.

II. Etude de la variabilité hydro-pluviométrique

Les moyennes mobiles sur sept ans ont servi à suivre l'évolution interannuelle des précipitations et des écoulements en réduisant l'influence des variations accidentelles et d'éliminer l'effet des fluctuations de très courte période. Ces moyennes permettent d'affaiblir les composants aléatoires et périodiques sans touche au mouvement général de la série. Par ailleurs, en vue d'apprécier l'évolution de la variable hydro-pluviométrique de chaque année, il convient de tenir compte de l'écart à la moyenne correspondant à l'excédent ou au déficit de l'année considérée rapportée à la moyenne d'observation. Cet écart est calculé comme suit :

$$E_i = \frac{(X_i - X_{\text{moy}})}{X_{\text{moy}}} \times 100 \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

Avec :

E_i : Ecart à la moyenne (%) ;

X_i : Module annuel de la variable enregistrée au cours de l'année i ;

X_{moy} : Moyenne interannuelle de la variable enregistrée sur la période d'étude.

II.1 Etude de la variabilité interannuelle pluviométrique

La figure III.10 présente les résultats graphiques des quatre stations pluviométriques étudiées sur la période allant de 1941 à 2006. Pour les stations analysées sur la période d'étude 1970-2010, leurs représentations graphiques sont exposées en Annexe.12.

La pluviométrie interannuelle est très variable d'une année à une autre et d'une station à une autre. Une année très pluvieuse peut être succédée subitement par une année sèche sans transition. C'est le cas de la station de Bensekrane qui a reçu en 1964-1965 un total pluviométrique de 725 mm et seulement 205,8 mm en 1965-1966 (Fig. III.10). De même, la station de Pierre du Chat a enregistré 494,2 mm et 135,4 mm entre 1980-1981 et 1981-1982 (Annexe.12).

La courbe des moyennes mobiles sur sept ans fait ressortir les périodes excédentaires, normales et déficitaires. L'évolution pluviométrique de la station de Bensekrane est caractérisée par une période excédentaire normale et déficitaire (Tableau III.10; Fig. III.10). Une première période excédentaire allant de 1941-1942 à 1967-1968 et une moyenne pluviométrique de 485,3 mm. Ce qui représente 70% des totaux pluviométriques supérieurs à la moyenne annuelle totale qui est de 424,8 mm. Succédée par une période normale allant de 1967-1968 à 1977-1978, la moyenne pluviométrique enregistrée durant cette période (449,6 mm) est sensiblement proche à la moyenne annuelle totale (424,8 mm). La période déficitaire commence de 1977-1978 et s'étale jusqu'au 2005-2006. Durant cette période, la moyenne pluviométrique totale annuelle est de 358,9 mm.

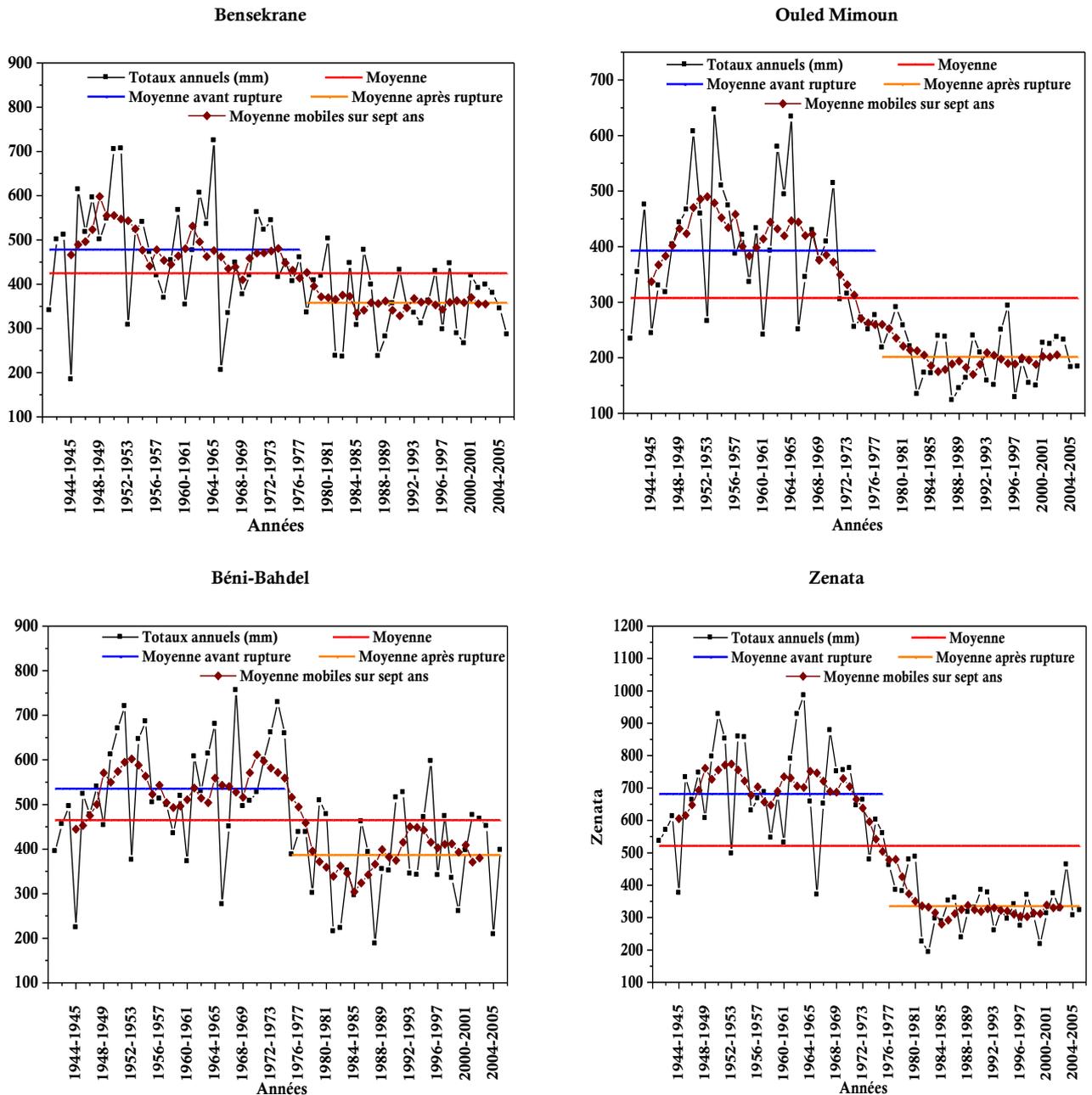


Fig. III.10. Variabilité interannuelle des totaux pluviométriques annuels des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata. Période d'étude (1941-2006).

Pour les stations d'Ouled Mimoun et de Zenata, deux périodes contrastées ont été identifiées (Tableau III.10; Fig. III.10). La première période est excédentaire allant de 1941-1942 à 1971-1972 pour la station d'Ouled Mimoun et de 1941-1942 à 1973-1974 pour la station de Zenata. Durant cette période, le total pluviométrique a pu atteindre un maximum de 646,5 mm (1953-1954) pour la station d'Ouled Mimoun et de 986 mm (1963-1964) pour la station de Zenata. Succéder par une période déficitaire qui début de la fin de la période excédentaire et s'étale jusqu'au 2005-2006. La moyenne totale annuelle pluviométrique est de 212,2 mm et de 350,6 mm respectivement pour la station d'Ouled Mimoun et la station de Zenata.

Pour la station de Béni-Bahdel (Tableau III.10; Fig. III.10), une seule période excédentaire a été observée allant de 1941-1942 à 1975-1976 avec une moyenne pluviométrique annuelle de 531,5 mm, suivie par une première période déficitaire, cette période commence de 1975-1976 et s'étale jusqu'au 1990-1991. Pendant cette période déficitaire, le total pluviométrique enregistre une valeur minimale de 187,7 mm (1987-1988). Entre 1990-1991 et 1997-1998, une période normale a été instaurée, avec une moyenne pluviométrique de 442,6 mm sensiblement proche à la moyenne totale annuelle (464,8 mm). De nouveau, une succession d'années sèches a été instaurée. Cette deuxième période déficitaire commence de 1997-1998 et se prolonge jusqu'au 2005-2006.

Tableau. III.10. Différentes tendances aux stations pluviométriques de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Zenata et de Béni-Bahdel. Période d'étude (1941-2006).

Début de la période	Fin de la période	Tendance	P _{moy} (mm)	P _{max} (mm)	P _{min} (mm)
Bensekrane					
1941-1942	1967-1968	Excédentaire	485,3	725,0 1964-1965	184,5 1944-1945
1967-1968	1977-1978	Normale	449,6	562,7 1970-1971	335,8 1977-1978
1977-1978	2005-2006	Déficitaire	358,9	502,7 1980-1981	235,8 1982-1983
Ouled Mimoun					
1941-1942	1971-1972	Excédentaire	412,2	646,5 1953-1954	234,0 1941-1942
1971-1972	2005-2006	Déficitaire	212,2	315,1 1972-1973	123,3 1987-1988
Béni-Bahdel					
1941-1942	1975-1976	Excédentaire	531,5	756,1 1967-1968	224,3 1944-1945
1975-1976	1990-1991	Déficitaire	367,7	515,7 1990-1991	187,7 1987-1988
1990-1991	1997-1998	Normale	442,6	597,4 1995-1996	341,5 1993-1994
1997-1998	2005-2006	Déficitaire	374,7	476,2 2001-2002	208,7 2004-2005
Zenata					
1941-1942	1973-1974	Excédentaire	687,7	986,0 1963-1964	371,0 1965-1966
1973-1974	2005-2006	Déficitaire	350,6	602,0 1974-1975	193,0 1982-1983

L'application de la méthode des moyennes mobiles sur sept ans a mis en évidence deux périodes distinctes sur l'ensemble des stations analysées durant la période d'étude 1970-2010. Pour les stations de Pierre du Chat et de Mefrouche (Tableau III.11 ; Annexe.12), une période excédentaire a été observée entre 1970-1971 et 1977-1978 avec une moyenne interannuelle de 412,8 mm pour la station de Pierre du Chat et de 834,8 mm pour la station de Mefrouche. L'autre période est déficitaire, elle commence de 1977-1978 et s'étale jusqu'au 2007-2008. La

moyenne pluviométrique annuelle totale enregistrée durant cette période est de 295,3 mm et de 542,4 mm respectivement pour les stations de Pierre du Chat et de Mefrouche.

L'étude menée aux stations d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet (Tableau III.11; Annexe.12) a permis d'observer une phase excédentaire qui commence de 1970-1971 et s'achève à une année près de 1979-1980. Durant cette phase, le total pluviométrique maximal observé entre le début et le milieu des années 1970 a pu atteindre 636,8 mm pour la station d'Oued Chouly, 586,6 mm pour la station de Maghnia et 630,6 mm pour la station de Ghazaouet. La phase déficitaire débute à partir de la fin de la période excédentaire et s'étale jusqu'au 2007-2008 pour les stations d'Oued Chouly et de Maghnia et au 2009-2010 pour la station de Ghazaouet. Durant cette phase, la moyenne pluviométrique annuelle est de 370,1 mm pour la station d'Oued Chouly, de 294,5 mm pour la station de Maghnia et de 334,2 mm pour la station de Ghazaouet.

Tableau. III.11. Différentes tendances aux stations pluviométriques de Pierre du Chat, de Mefrouche, d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet. Période d'étude (1970-2010).

Début de la période	Fin de la période	Tendance	P _{moy} (mm)	P _{max} (mm)	P _{min} (mm)
Pierre du Chat					
1970-1971	1977-1978	Excédentaire	412,8	594,6 1972-1973	305,8 1977-1978
1977-1978	2007-2008	Déficitaire	295,3	494,2 1980-1981	135,4 1981-1982
Mefrouche					
1970-1971	1977-1978	Excédentaire	834,8	1062,4 1973-1974	661,3 1976-1977
1977-1978	2007-2008	Déficitaire	542,4	841 1995-1996	342,4 1999-2000
Oued Chouly					
1970-1971	1979-1980	Excédentaire	544,2	636,8 1974-1975	406,6 1977-1978
1979-1980	2007-2008	Déficitaire	370,1	600,9 1995-1996	218,5 1987-1988
Maghnia					
1970-1971	1980-1981	Excédentaire	435,0	586,6 1974-1975	242,1 1978-1979
1980-1981	2007-2008	Déficitaire	294,5	548,7 1995-1996	173,2 1982-1983
Ghazaouet					
1970-1971	1978-1979	Excédentaire	487,3	630,6 1971-1972	319,7 1977-1978
1978-1979	2009-2010	Déficitaire	334,2	494,3 1985-1986	198,7 2009-2010

L'analyse des différents résultats obtenus par la méthode des moyennes mobiles sur sept ans confirme que la période après rupture est dominée par des années déficitaires débutantes à la fin du 20^{ème} siècle et s'étale au début 21^{ème} siècle. En outre, mis à part la station de Ghazaouet, l'année 2008-2009 a été l'année la plus pluvieuse sur l'ensemble des stations analysées durant la période d'étude 1970-2010 (Annexe.12).

Les résultats obtenus suite au calcul des écarts à la moyenne mettent en évidence la succession de période d'années sèches et d'années humides. Durant la période 1941-2006 (Fig.III.11), les années les plus humides correspondent à l'année 1964-1965 pour la station de Bensekrane, 1953-1954 pour la station d'Ouled Mimoun, 1967-1968 pour la station de Béni-Bahdel et 1963-1964 pour la station de Zenata avec des écarts à la moyenne respectifs de 70,7% ; 110,2% ; 62,7% et 88,9%. L'année la plus sèche correspond à 1944-1945 pour la station de Bensekrane, 1987-1988 pour les stations d'Ouled Mimoun et de Béni-Bahdel et 1982-1983 pour la station de Zenata.

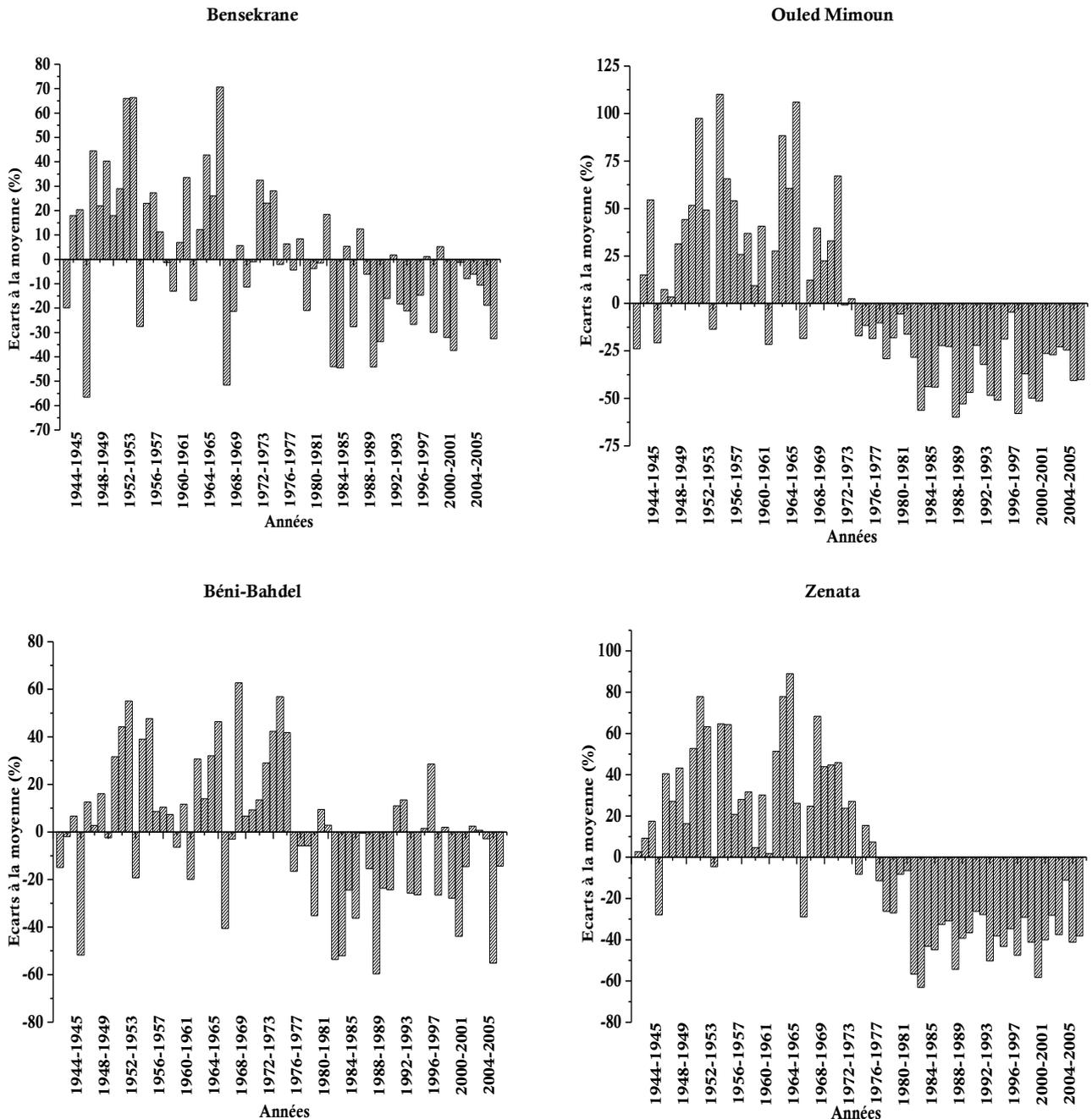


Fig. III.11. Écart moyen relatif de la pluviométrie annuelle des stations de Bensekrane, d'Ouled Mimoun, de Béni-Bahdel et de Zenata. Période d'étude (1941-2006).

Durant la période d'étude 1970-2010 (Annexe.12), l'année la plus sèche correspond à 1981-1982 pour la station de Pierre du Chat, 1982-1983 pour la station de Maghnia, 1987-1988 pour la station d'Oued Chouly, 1999-2000 pour la station de Mefrouche et 2009-2010 pour la station de Ghazaouet.

Sur les neuf stations utilisées pour l'étude de la pluviométrie dans le bassin versant de la Tafna, six stations connaissent une baisse pluviométrique brutale à partir de la période 1981-1988. Cette période marque une sévère phase de sécheresse sur le bassin. Ce résultat est confirmé par le travail de Meddi et Meddi (2009). Ils ont trouvé que les années 1980 se définissent par la fluctuation la plus brutale et la plus significative (au sens statistique du terme) observée sur la région Nord-Ouest algérienne où la baisse pluviométrique s'élève à plus de 36% sur l'extrême Ouest du pays.

II.2 Etude de la variabilité interannuelle hydrométrique

La lame d'eau écoulee sur le bassin versant de la Tafna est marquée par sa grande variabilité chronologique. En effet, la transition entre une année humide à une autre sèche, peut se faire brusquement. Par l'exemple, entre 1933-1934 et 1934-1935, la station de Pierre du Chat a enregistré respectivement 90,3 mm et 11,71 mm. C'est le cas de la station de Remchi qui a enregistré en 1935-1936 une lame d'eau de 157,7 mm et seulement 28,1 mm durant l'année 1936-1937 (Fig. III.12).

L'évolution des modules annuels associés à la courbe des moyennes mobiles calculée sur sept ans permettent de mieux visualiser la variabilité de l'écoulement sur l'ensemble des stations étudiées (Fig. III.12). Il ressort de cette figure que l'évolution hydrométrique pour la station de Pierre du Chat se caractérise par une alternance entre les périodes déficitaires et excédentaires (Tableau III.12; Fig. III.12). Une première période sèche a été identifiée entre 1912-1913 et 1926-1927, le débit moyen écoulé durant cette période est de 5,6 m³/s pour un minimum de 0,8 m³/s en 1919-1920. Succéder par une première période humide allant de 1926-1927 à 1940-1941, le débit moyen annuel a pu atteindre la valeur de 11,5 m³/s. Une deuxième période sèche apparaît entre 1940-1941 et 1949-1950 avec une moyenne annuelle de 4,2 m³/s. Cette courte phase déficitaire est limitée dans le temps par une séquence d'années humides, elle commence de 1949-1950 et s'étale jusqu'au 1975-1976, le débit moyen écoulé durant cette période est de 8,8 m³/s. De 1975-1976 à 1999-2000, une longue phase d'années sèches est instaurée pour un maximum de 9,3 m³/s en 1979-1980 et un minimum de 0,2 m³/s en 1999-2000.

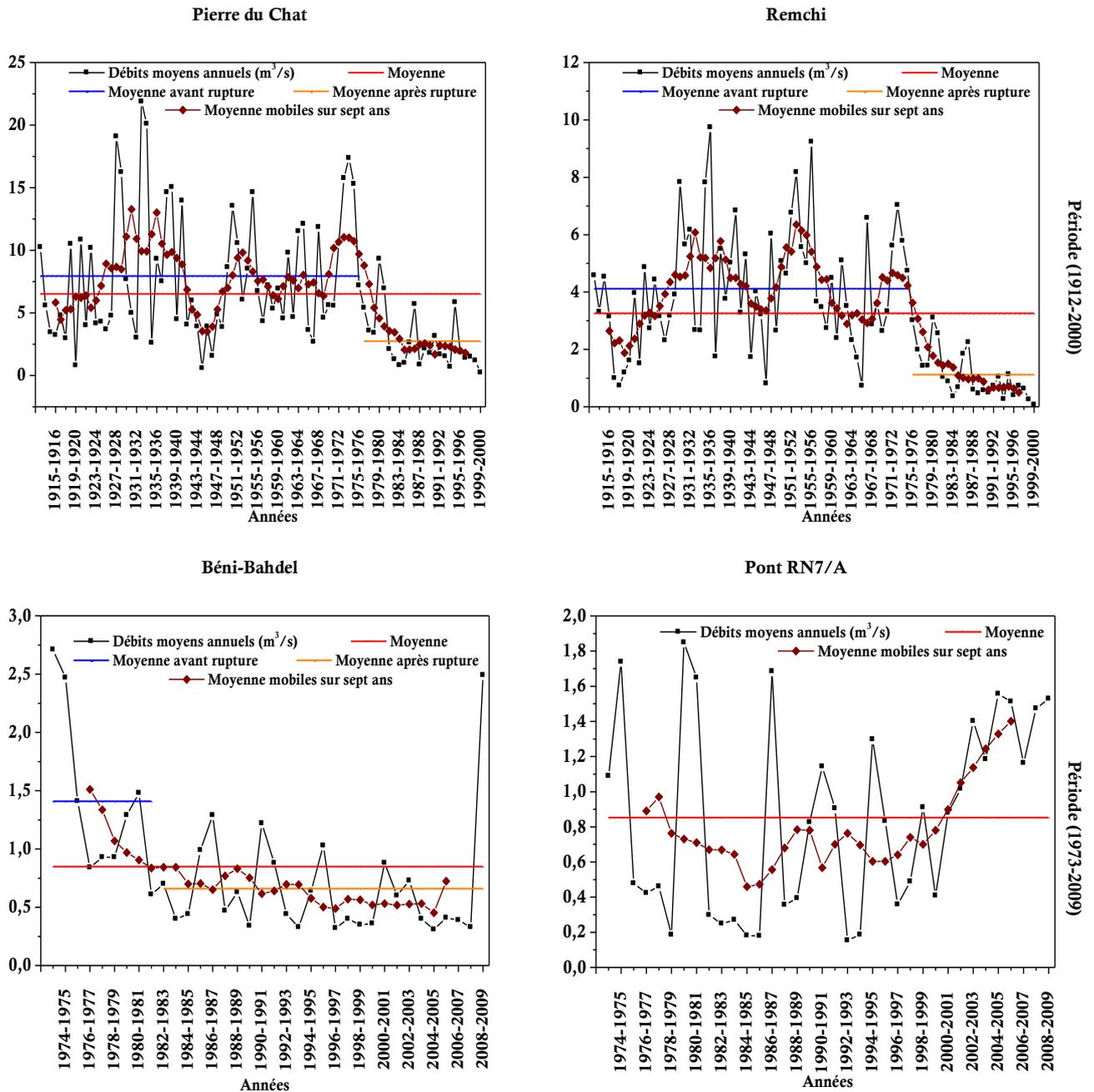


Fig. III.12. Variabilité interannuelle des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi, de Béni-Bahdel et de Pont RN7/A.

L'évolution de la variabilité interannuelle des débits moyens annuels de la station de Remchi comporte trois périodes hydrométéorologiques (Tableau III.12; Fig. III.12) : une première période est une période sèche identifiée entre 1912-1913 et 1928-1929, le débit moyen annuel coulé est de $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un minimum de $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1922-1923. La deuxième période est une longue séquence d'années humides décelée entre 1928-1929 et 1975-1976. Durant cette période, le maximum a pu atteindre une valeur de $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1935-1936. La troisième période est une nouvelle période sèche plus intense et plus sévère que la première instaurée entre 1975-1976 et

1999-2000, le débit moyen annuel coulé est de 1,04 m³/s avec un minimum de 0,07 m³/s en 1999-2000.

Tableau. III.12. Différentes tendances aux stations hydrométriques de Pierre du Chat et de Remchi. Période d'étude (1912-2000).

Début de la période	Fin de la période	Tendance	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{min} (m ³ /s)
Pierre du Chat					
1912-1913	1926-1927	Déficitaire	5,6	10,8 1920-1921	0,8 1919-1920
1926-1927	1940-1941	Excédentaire	11,5	21,9 1932-1933	2,6 1934-1935
1940-1941	1949-1950	Déficitaire	4,2	8,7 1949-1950	0,6 1944-1945
1949-1950	1975-1976	Excédentaire	8,8	17,36 1973-1974	2,68 1966-1967
1975-1976	1999-2000	Déficitaire	2,8	9,3 1979-1980	0,2 1999-2000
Remchi					
1912-1913	1928-1929	Déficitaire	2,9	0,7 1917-1918	4,9 1922-1923
1928-1929	1975-1976	Excédentaire	4,5	9,7 1935-1936	0,7 1965-1966
1975-1976	1999-2000	Déficitaire	1,04	3,1 1979-1980	0,07 1999-2000

Durant la période d'étude 1973-2009, un contraste de succession entre période sèche et humide a été observé sur les deux stations étudiées. Pour la station de Béni-Bahdel (Tableau III.13; Fig. III.12), une séquence d'années humides a été détectée durant la période allant de 1973-1974 à 1980-1981, le débit moyen annuel coulé est de 1,5 m³/s avec un maximum de 2,7 m³/s en 1973-1974. La deuxième période observée sur cette station est sèche, elle commence de 1980-1981 et s'achève en 2007-2008, le débit moyen annuel coulé est de 0,7 m³/s avec un minimum de 0,3 m³/s en 2004-2005. En revanche, la variabilité hydrométéorologique interannuelle de la station de Pont RN7/A (Tableau III.13; Fig. III.12) est caractérisée par une première période sèche allant de 1973-1974 à 2000-2001 suivie par une autre humide étalée sur une période allant de 2000-2001 à 2008-2009. Durant cette période, le débit moyen annuel coulé est de 1,3 m³/s.

Tableau. III.13. Différentes tendances aux stations hydrométriques de Béni-Bahdel et de Pont RN7/A. Période d'étude (1973-2009).

Début de la période	Fin de la période	Tendance	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{min} (m ³ /s)
Béni-Bahdel					
1973-1974	1980-1981	Excédentaire	1,5	2,7 1973-1974	0,8 1976-1977
1980-1981	2007-2008	Déficitaire	0,7	2,5 2008-2009	0,3 2004-2005
Pont RN7A					
1973-1974	2000-2001	Déficitaire	0,7	1,8 1979-1980	0,2 1992-1993
2000-2001	2008-2009	Excédentaire	1,3	1,6 2004-2005	1,02 2001-2002

Les résultats d'analyse de l'évolution hydrométrique par la méthode des moyennes mobiles sur sept ans appuient les résultats trouvés par les tests de détection de rupture. En effet, les périodes sèches détectées durant les décennies 1970 et 1980 sur le bassin se coïncident avec les ruptures de stationnarité identifiées par les tests statistiques pour les stations de Pierre du Chat, de Remchi et de Béni-Bahdel. Pour la station de Pont RN7/A, la détection de la phase humide durant la période allant de 2000-2001 à 2008-2009 maintient les résultats obtenus par les tests de rupture.

La figure III.13 présente les résultats de calcul des écarts à la moyenne des débits moyens annuels. Pour les quatre stations, les années les plus humides correspondent à l'année 1932-1933 pour la station de Pierre du Chat, 1935-1936 pour la station de Remchi, 1973-1974 pour la station de Béni-Bahdel et 1979-1980 pour la station de Pont RN7/A, avec un écart à la moyenne respectifs de 235,3% ; 198,5% ; 220,4% et 116,8%. L'année la plus sèche correspond à 1999-2000 pour les stations de Pierre du Chat et de Remchi, 2004-2005 pour la station de Béni-Bahdel et 1992-1993 pour la station de Pont RN7/A.

Les résultats d'analyse montrent ainsi que les années trente et soixante-dix se distinguent comme une phase excédentaire sur le bassin versant de la Tafna. En revanche, ce dernier connaît une période d'étiage durant les années 1990 et le début des années 2000.

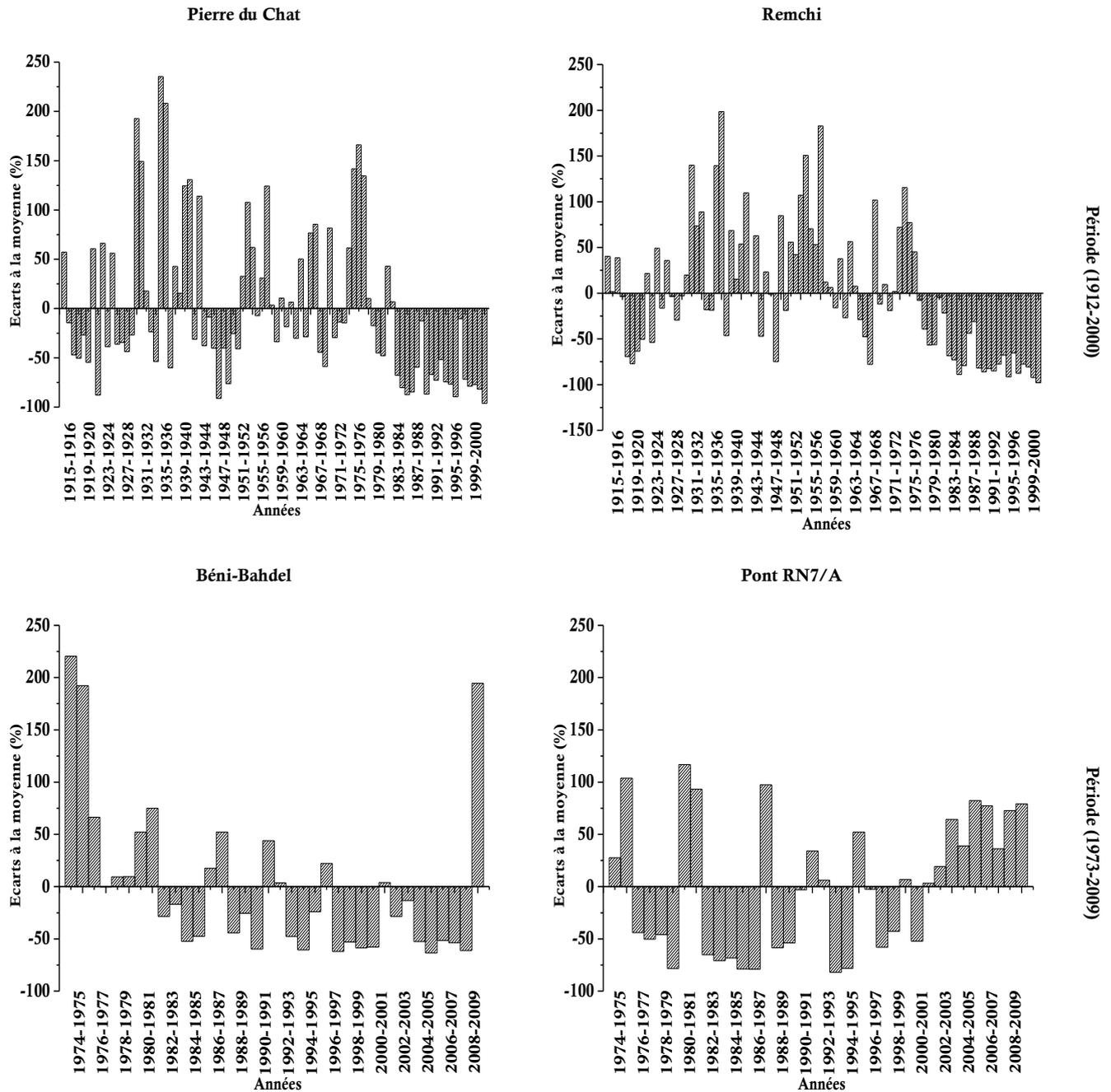


Fig. III.13. Ecart moyen relatif des modules annuels des stations de Pierre du Chat, de Remchi, de Béni-Bahdel et de Pont RN7/A.

III. Etude fréquentielle des séries hydro-pluviométriques

Pour compléter cette étude, une analyse statistique, en terme, de fréquence permettra d'évaluer les variables hydro-pluviométriques et de juger de la sévérité des déficits ou de l'abondance des lames d'eaux précipitées et écoulées sur le bassin versant de la Tafna en estimant les valeurs limites atteintes ou dépassées pour une récurrence donnée.

III.1 Etude fréquentielle des précipitations annuelles

Une telle étude consiste à estimer les valeurs fréquentielles des pluies annuelles en fonction de leur période de retour par l'ajustement de l'échantillon observé à une loi de distribution.

Les stations pluviométriques ont été ajustées aux lois normale et log-normale. La recherche de la meilleure adéquation a été acceptée ou rejetée par l'application du test de Khi^2 à un seuil de signification de 5% (Tableau III.14). Le traitement statistique a été réalisé par l'utilisation du logiciel HyfranPlus. La méthode de calcul choisie pour l'estimation des paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance.

Tableau III.14. Test de Khi^2 . Ajustements adéquats.

Station	Khi ² calculé		Degré de liberté	Khi ² tabulé	Ajustement adéquat.
	Loi normale	Loi log-normal			
1941-2006					
Bensekrane	2,85	2,23	7	14,0671	Normale / Log-normale
Ouled Mimoun	14,23	10,85	7	14,0671	Log-normale
Béni-Bahdel	10,85	11,15	7	14,0671	Normale / Log-normale
Zenata	17,62	14,04	7	14,0671	Log-normale
1970-2010					
Pierre du Chat	4,00	6,00	5	11,0705	Normale / Log-normale
Mefrouche	2,80	4,00	5	11,0705	Normale / Log-normale
Oued Chouly	4,40	4,40	5	11,0705	Normale / Log-normale
Maghnia	10,40	2,40	5	11,0705	Normale / Log-normale
Ghazaouet	8,80	7,60	8	11,0705	Normale / Log-normale

A un seuil de signification de 5%, l'ensemble des stations s'ajuste mieux à la loi log-normale (Tableau III.14 ; Fig III.14 ; Annexe.13). L'expression mathématique des lois normale et log-normale ainsi que les ajustements graphiques des stations analysées durant la période d'étude 1970-2010 sont portés en Annexe.13.

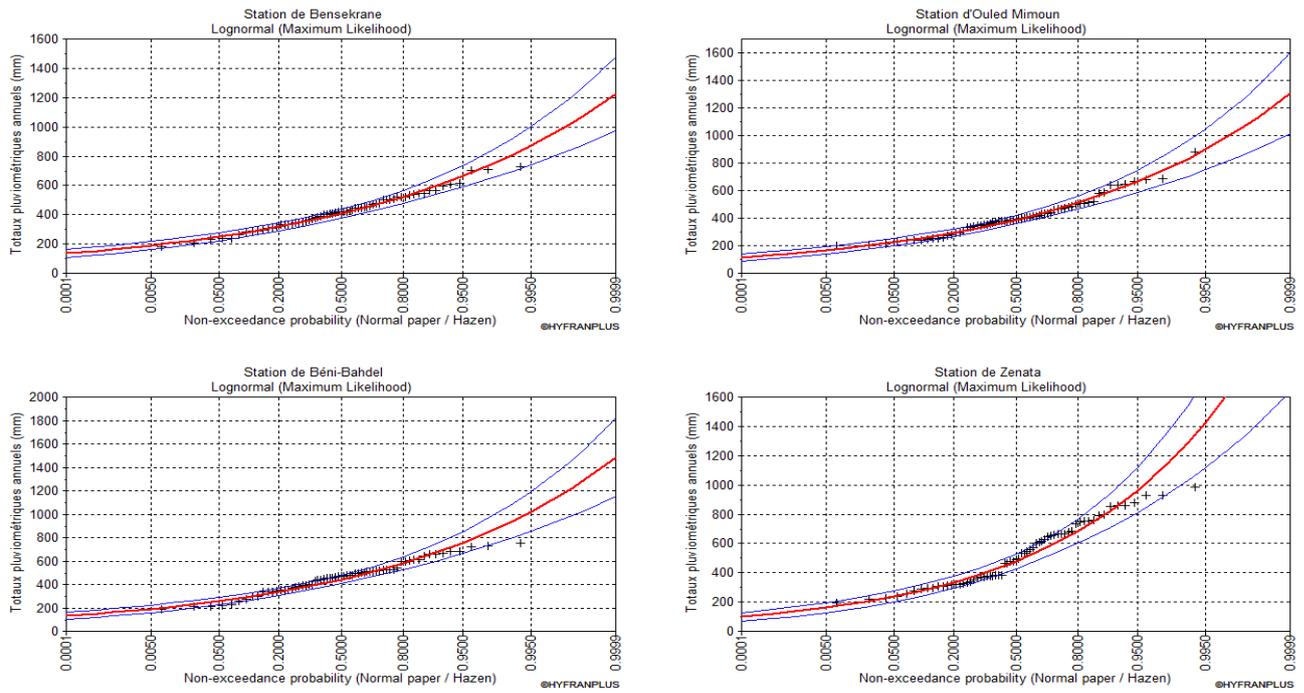


Fig. III.14. Ajustement graphique des totaux pluviométriques annuels à la loi log-normale. Période d'étude (1941-2006).

Le tableau III.15 rassemble les résultats de calcul des hauteurs de pluie pour les fréquences retenues allant de la centennale sèche à la centennale humide. Ce tableau indique également la médiane, l'écart-type, la moyenne de la loi d'ajustement adéquat et le coefficient d'irrégularité K3 (rapport de la pluie décennale humide à la décennale sèche).

Tableau III.15. Valeurs fréquentielles de la pluviométrie annuelle (mm) au niveau du bassin versant de la Tafna.

	Récurrences sèches					Méd	S _e	Moy	Récurrences humides					K3
Fréquence	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5			0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	
Récurrence	100	50	20	10	5	2			5	10	20	50	100	
1941-2006														
Bensekrane	204,3	221,5	250,03	278,5	317,3	407,11	0,296	6,009	522,4	595,2	662,9	748,3	811,3	2,14
Ouled Mimoun	182,0	198,9	227,3	255,9	295,4	388,7	0,326	5,962	511,4	590,3	664,6	759,4	829,9	2,31
Béni-Bahdel	207,5	226,7	258,9	336,4	442,4	581,8	0,325	6,092	581,82	671,5	755,8	863,4	943,5	2
Zenata	178,8	200,7	238,7	278,4	335,5	479,1	0,425	6,172	684,3	824,5	961,7	1143,6	1283,6	2,96
1970-2010														
Pierre du Chat	155	168	190	212	242	312	0,300	5,742	401	458	511	578	627	2,16
Mefrouche	291	316	357	398	454	584	0,299	6,371	752	858	957	1080	1170	2,16
Oued Chouly	212,9	228,9	257,03	284,9	322,8	409,8	0,283	6,015	520,3	589,5	653,5	733,9	792,9	2,07
Maghnia	148,1	162,1	185,7	209,6	242,6	320,8	0,332	5,771	424,2	491	554	634,6	694,7	2,34
Ghazaouet	186,7	201,3	225,4	249,1	281,3	354,7	0,275	5,871	447,3	505,03	558,3	624,9	673,7	2,03

Durant la période d'étude 1941-2006, les quantiles centennaux humides fluctuent de 811,3 mm (station de Bensekrane) à 1283,6 mm (station de Zenata) tandis que les centennaux secs varient de 178,8 mm (station de Zenata) à 207,5 mm (station de Béni-Bahdel). Pour la période d'étude étalée de 1970 à 2010, les quantiles centennaux humides varient de 627 mm (station de Pierre du Chat) à 1170 mm (station de Mefrouche) alors que les quantiles centennaux secs varient de 148,1 mm (station de Maghnia) à 291 mm (station de Mefrouche).

Les fréquences quinquennales peuvent apparaître grandes si on considère que la période actuelle est déficitaire. Sur les deux périodes d'étude, les écarts entre minimum et maximum en période humide ou sèche se reflètent sur les coefficients d'irrégularités qui varient peu d'une station à une autre.

III.2 Etude fréquentielle des modules annuels

L'analyse de la distribution statistique des modules annuels a été réalisée en l'ajustant les différentes lois aux échantillons observés :

- loi normale ;
- loi Log normale ;
- loi Exponentielle.

L'expression mathématique des ces différentes lois est exposée dans l'Annexe.13. Le calcul des paramètres de chaque loi a été réalisé par l'utilisation du logiciel HyfranPlus. La recherche de la meilleure adéquation a été assurée par le calcul du test du Khi^2 à un seuil de signification de 5% (Tableau III.16). En fait, l'adéquation de la loi est d'autant meilleure que la valeur du test du Khi^2 tend vers 0, en restant inférieure à la valeur critique du seuil de probabilité choisie (Dacosta, 1989). La méthode de calcul choisie pour l'estimation des paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance.

Tableau III.16. Test de Khi^2 . Ajustements adéquats.

Station	Khi ² calculé			Degré de liberté	Khi ² tabulé	Ajustement adéquat
	Normale	Log-Normale	Exponentielle			
1912-2000						
Pierre du chat	34,75	6,75	9,50	8	15,5073	Log-normale/Exponentielle
Remchi	31,50	21,25	15,25	8	15,5073	Exponentielle
1973-2009						
Pont RN7/A	12,89	11,56	8,44	5	11,0705	Exponentielle
Béni-Bahdel	36	10,67	8,44	5	11,0705	Log-normale/ Exponentielle

Les résultats d'ajustement (Tableau III.16, Fig. III.15) montrent que, durant la période d'étude 1912-2000, la station de Pierre du Chat s'ajuste mieux à la loi log-normale. Cependant, la station de Remchi s'ajuste mieux à la loi exponentielle. Ces résultats montrent aussi que les stations de Pont RN7/A et de Béni-Bahdel traitées sur la période allant de 1973 à 2009, s'ajustent mieux à la loi exponentielle.

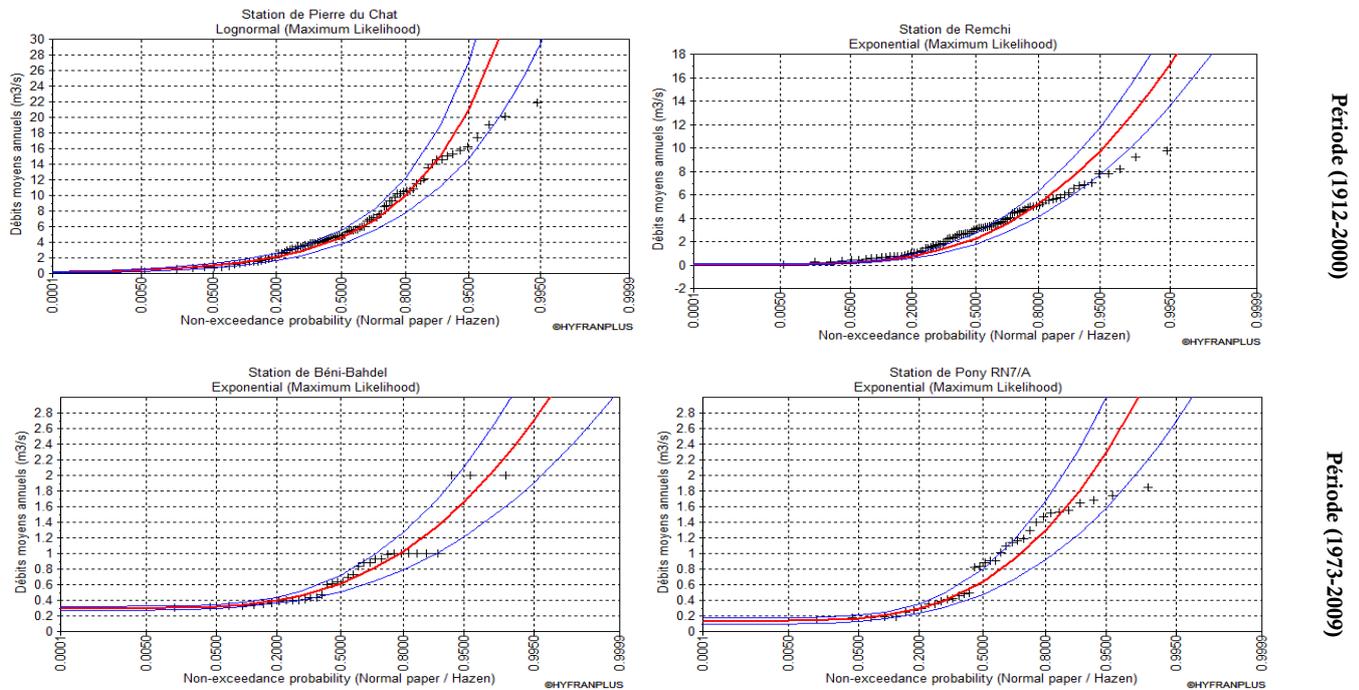


Fig. III.15. Ajustement graphique des modules annuels des stations étudiées.

Les résultats des modules correspondant aux différentes périodes de retour en années humides et sèches sont représentés dans le tableau III.17.

Tableau III.17. Valeurs fréquentielles des modules annuels (m³/s) au niveau du bassin versant de la Tafna.

Fréquence	Récurrence	Récurrences sèches				Méd	Récurrences humides					K3	
		0,01	0,02	0,05	0,1		0,2	0,5	0,8	0,9	0,95		0,98
1912-2000													
Pierre du chat	Log-normale	0,55	0,71	1,03	1,44	2,15	4,64	10,02	14,98	20,98	30,36	38,95	10,40
Remchi	Exponentielle	0,06	0,09	0,19	0,37	0,75	2,27	5,24	7,48	9,72	12,7	14,9	20,22
1973-2009													
Pont RN7/A	Exponentielle	0,14	0,15	0,17	0,21	0,29	0,63	1,29	1,79	2,29	2,95	3,45	8,52
Béni-Bahdel	Exponentielle	0,30	0,31	0,32	0,35	0,40	0,61	1,03	1,34	1,66	2,07	2,39	3,83

Pour les stations étudiées sur la période 1912-2000, les quantiles centennaux humides fluctuent entre 14,9 m³/s (station de Remchi) et 38,95 m³/s (station de Pierre du Chat) tandis que les

centennaux secs varient entre $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ (station de Remchi) et $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ (station de Pierre du Chat). Durant la période d'étude 1973-2009, les quantiles centennaux humides varient de $2,39 \text{ m}^3/\text{s}$ (station de Béni-Bahdel) et $3,45 \text{ m}^3/\text{s}$ (station de Pont RN7/A) alors que les quantiles centennaux secs fluctuent entre de $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ (station de Pont RN7/A) et $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ (station de Béni-Bahdel).

IV. Evolution des précipitations et du bilan climatique

IV.1 Evolution des normes pluviométriques

Par définition, la norme hydrologique est la moyenne de la série la plus longue possible pour pouvoir valider les occurrences cinquanteannales ou centennales, de la norme météorologique qui désigne une moyenne sur trente ans se succédant les unes aux autres tous les 10 ans (*Morel, 1986 in Vissin, 2007; Bodian, 2011*). Dans cette analyse, nous allons prendre en considération juste les séries de données étalées sur la période 1941-2006. Les résultats de calcul sont consignés au tableau III.18 et à la figure III.16.

Tableau III.18. Moyennes trentenaires des précipitations annuelles (mm). Période d'étude (1941-2006).

	Bensekrane	Ouled Mimoun	Béni-Bahdel	Zenata
1941-1971	480,8	415,8	518,8	696,9
1951-1981	462,4	376,4	530,6	649,4
1961-1991	419,1	298,9	466,6	522,1
1971-2001	379,5	215,3	421,5	373,7

La figure III.16 montre que la variation des normes pluviométriques se caractérise par une très nette tendance à la baisse à partir de la norme 1951-1981. La norme 1961-1991 est caractérisée par l'existence de deux décennies sèches (1971-1991). La dernière norme 1971-2001 s'identifie par la particularité de retenir des séquences de sécheresse intenses durant la période 1981-1988.

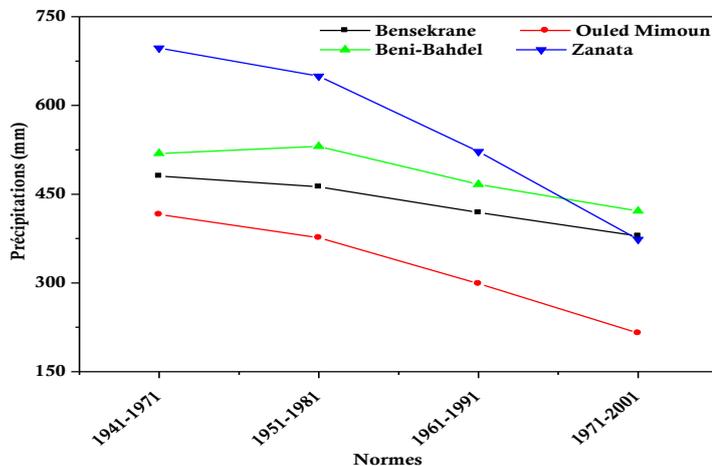


Fig. III.16. Variations pluviométriques des normes de (1941-1971) à (1971-2001).

L'estimation des déficits entre les normes calculées et la norme de référence 1951-1981 est résumée dans le tableau III.19. En réalité, cette norme de référence (1951-1981) constitue la référence de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) à partir de laquelle sont analysés les régimes climatiques (*Ouédraogo, 2001, Kouassi et al., 2010*).

Tableau III.19. Ecart par rapport à la norme de référence (mm). Période d'étude (1941-2006).

	1941-1971	1961-1991	1971-2001
Bensekrane	+3,98	-9,36	-17,93
Ouled Mimoun	+10,47	-20,59	-42,80
Béni-Bahdel	-2,22	-12,06	-20,56
Zenata	+7,31	-19,60	-42,45

Les résultats d'analyse montrent qu'à l'exception de la station de Béni-Bahdel, les écarts calculés sont positifs pour la norme 1941-1971. Elles sont a priori excédentaires par rapport à la normale de référence (1951-1981) durant cette période. Les déficits sont constatés à partir des normes 1961-1991 et 1971-2001.

Les résultats du tableau III.19 ont été spatialisés en restituant chaque station pluviométrique à son sous bassin respectif pour suivre l'évolution des déficits (Fig. III.17). L'analyse montre que les stations de Zenata et d'Ouled Mimoun présentent les excédents les plus importants durant la période excédentaire (norme 1941-1971) mais aussi les déficits les plus importants durant les périodes déficitaires (1961-1991 et 1971-2001). Ces deux stations sont donc les plus sensibles aux variations climatiques durant la période 1941-2006.

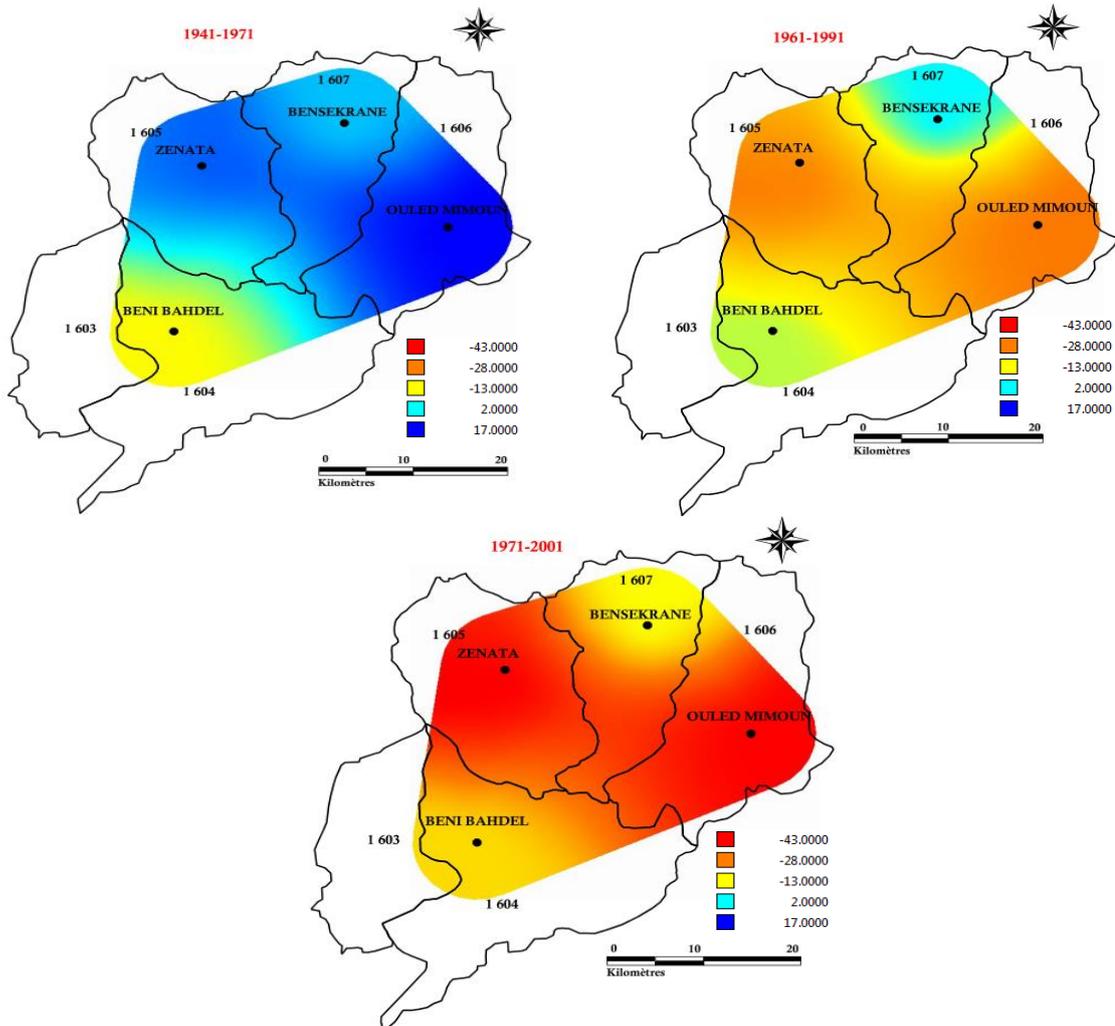


Fig. III.17. Répartition spatiale des écarts par rapport à la norme de référence (mm) des stations étudiées. Période d'étude (1941-2006).

IV.2 Evolution des précipitations décennales

La précipitation décennale est analysée pour évaluer la variation chronologique de cette dernière. Cette analyse prend en considération juste les stations étalées sur la période d'étude 1941-2006. Le tableau III.20 et la figure III.18 montrent que la décennie 1951-1961 présente une légère augmentation par rapport à celle 1941-1951 sur l'ensemble des stations excepté la station de Bensekrane.

Tableau III.20. Moyennes décennales des précipitations annuelles (mm). Période d'étude (1941-2006).

	Bensekrane	Ouled Mimoun	Béni-Bahdel	Zenata
1941-1951	501,9	387,6	484,7	657
1951-1961	471,4	417,3	527,2	680,7
1961-1971	469,2	442,5	544,6	752,9
1971-1981	446,7	269,4	520,1	514,5
1981-1991	341,3	184,8	335,2	298,8
1991-2001	350,5	191,6	409,1	307,9

Cette augmentation se poursuit sur la décennie 1961-1971 par rapport à celle de 1951-1961. Cette fois, elle est maximale pour la station de Zenata. La période déficitaire commence à partir de la décennie 1961-1971, avec une diminution maximale identifiée sur la décennie 1981-1991. Les moyennes décennales ont très peu varié durant les deux dernières décennies, même si une légère remontée a été constatée sur la décennie 1991-2001 (Fig. III.18).

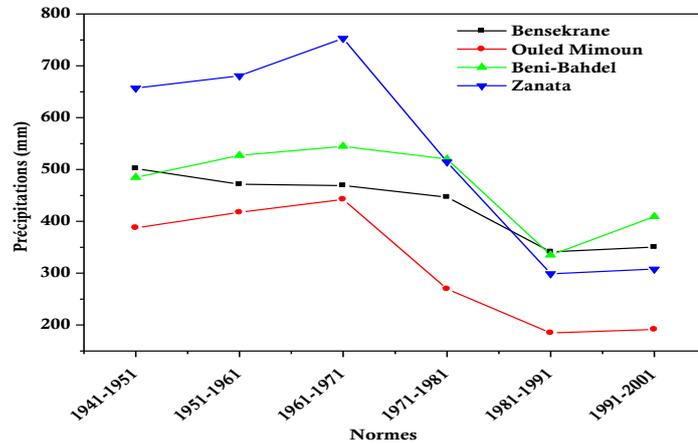


Fig. III.18. Variations pluviométriques des moyennes décennales des précipitations annuelles.

Les déficits calculés entre les moyennes décennales par rapport à la moyenne décennale de référence 1961-1971 en valeur relative sont présentés dans le tableau III.21. Le choix de cette moyenne décennale de référence se fonde sur le plus faible écart qu'elle présente par rapport à l'ensemble de la série observée comparativement aux autres moyennes décennales (*Dacosta et al., 2002 in Bodain, 2011*).

Tableau III.21. Ecart par rapport à la moyenne décennale de référence (mm).
Période d'étude (1941-2006).

	1941-1951	1951-1961	1971-1981	1981-1991	1991-2001
Bensekrane	+6,97	+0,47	-4,80	-27,26	-25,30
Ouled Mimoun	-12,41	-5,69	-39,12	-58,24	-56,70
Béni-Bahdel	-11,00	-3,20	-4,50	-38,45	-24,88
Zenata	-12,74	-9,59	-31,66	-60,31	-59,10

Les résultats représentés dans le tableau III.21 puis spécialisé dans la figure III.19 confirment ceux obtenus dans le tableau III.20 et la figure III.18. Les écarts enregistrés avant la décennale de référence présentent des déficits sur l'ensemble des stations hormis la station de Bensekrane qui enregistre un écart positif dû probablement à un excédent enregistré durant cette période sur cette station. Après cette décennale de référence, la totalité des stations enregistre des déficits. Ils atteignent leur maximum durant la décennie 1981-1991. Ce résultat confirme que les stations de Zenata et d'Ouled Mimoun sont les plus déficitaires durant la période 1941-2006.

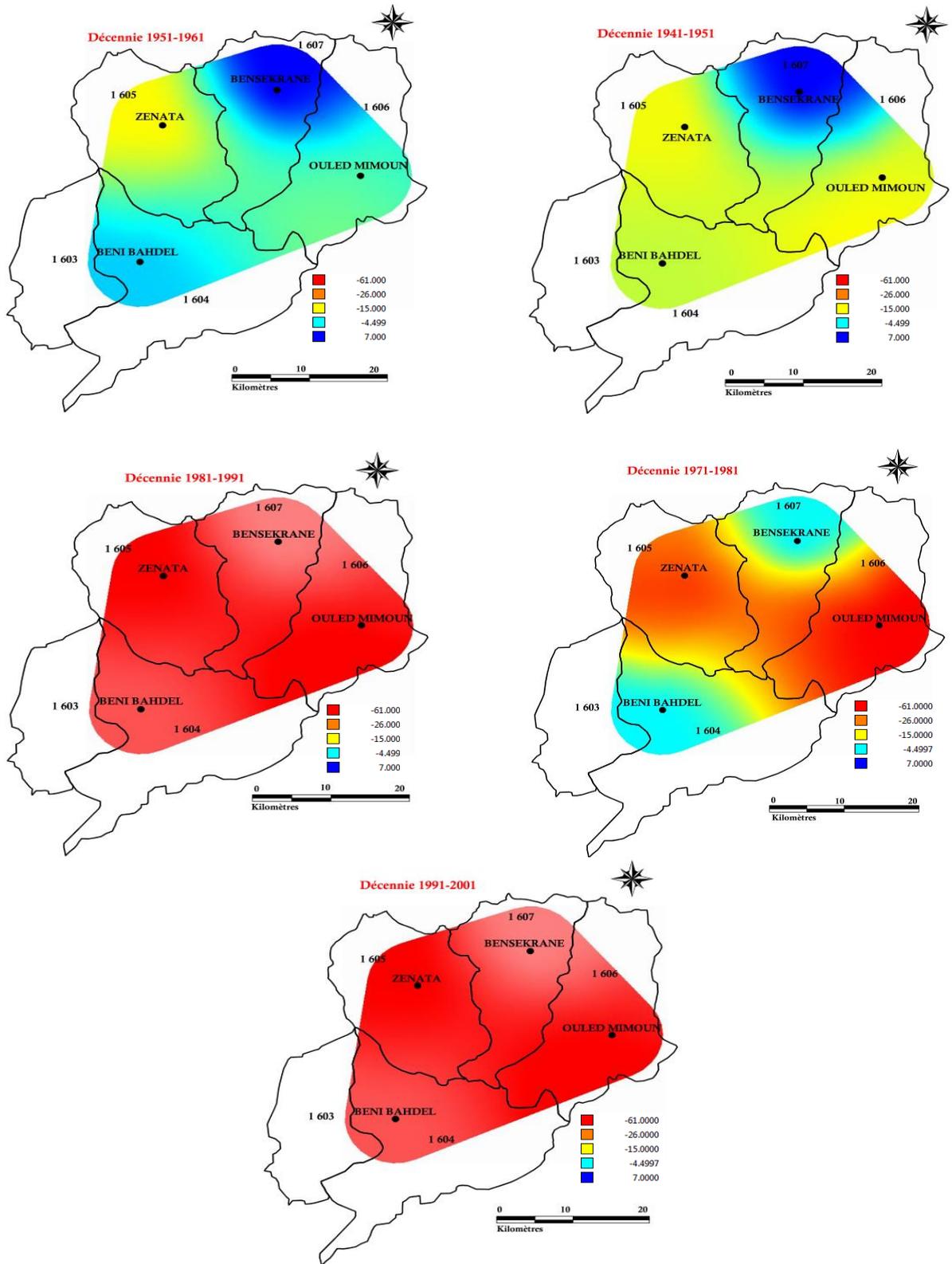


Fig. III.19. Répartition spatiale des écarts par rapport à la décennale de référence (mm) des stations étudiées. Période d'étude (1941-2006).

IV.3 Evolution du bilan climatique

Le bilan climatique exprime la différence entre le total des abats pluviométriques et la valeur de l'évapotranspiration potentielle et constitue, lorsqu'il est positif, le surplus disponible pour la recharge en eau du sol et pour l'écoulement (*Sutcliffe et Piper, 1985 in Vissin, 2007*).

L'évolution interannuelle et moyen mensuel du bilan climatique ont été calculés sur la période allant de 1976 à 2006 (période contrainte par l'indisponibilité des données d'ETP, estimées par la méthode de Thornthwaite) à l'échelle des sous bassins versants de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah Aval (1602). Ces sous bassins sélectionnés sont relatifs à la disponibilité des données. Ils constituent la base d'étude en vue de la modélisation dans le quatrième chapitre.

Il faut juste préciser que le sous bassin de Tafna maritime (1608) sera représenté par la série d'évapotranspiration potentielle de la station de Zenata et la série pluviométrique de la station de Pierre du Chat. La série d'évapotranspiration potentielle de la station de Mefrouche et la série pluviométrique régionalisée, en se basant sur les données pluviométriques des stations de Mefrouche et de Bensekrane, constituent bien le sous bassin d'Isser Sikkak (1607). Le sous-bassin d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) sera représenté par les séries de données pluviométriques et d'évapotranspirations potentielles de la station de Béni-Bahdel. En outre, les séries de données pluviométriques et d'évapotranspirations potentielles de la station de Maghnia seront adoptées pour représenter le sous bassin de Mouilah Aval (1602).

IV.3.1 Bilan climatique annuel

A l'échelle de l'année, le bilan climatique est déficitaire pour la période 1976-2006 dans tous les sous bassins versants sélectionnés vu que l'évapotranspiration potentielle annuelle est supérieure à la pluviométrie totale annuelle (Fig. III.20). Cet écart entre la pluie et l'ETP atteint un maximum de -754,4 mm et de -716,7 mm en 1981-1982 respectivement pour le sous bassin de Tafna maritime (1608) et le sous bassin de Mouilah aval (1602). En 1987-1988, il enregistre une valeur de -750,1 mm et de -611,9 mm respectivement pour les sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et d'Isser Sikkak (1607).

En réalité, une année très sèche entraîne un déficit qui subsiste au cours de l'année suivante (par exemple, le cas du sous bassin de Tafna maritime (1608) entre 2003-2004 et 2005-2006) à cause de la très forte évapotranspiration. En fait, au début du déficit, une partie de l'eau provient du sol ; mais cette contribution du sol diminue à mesure qu'il s'assèche (*Huft, 2001*).

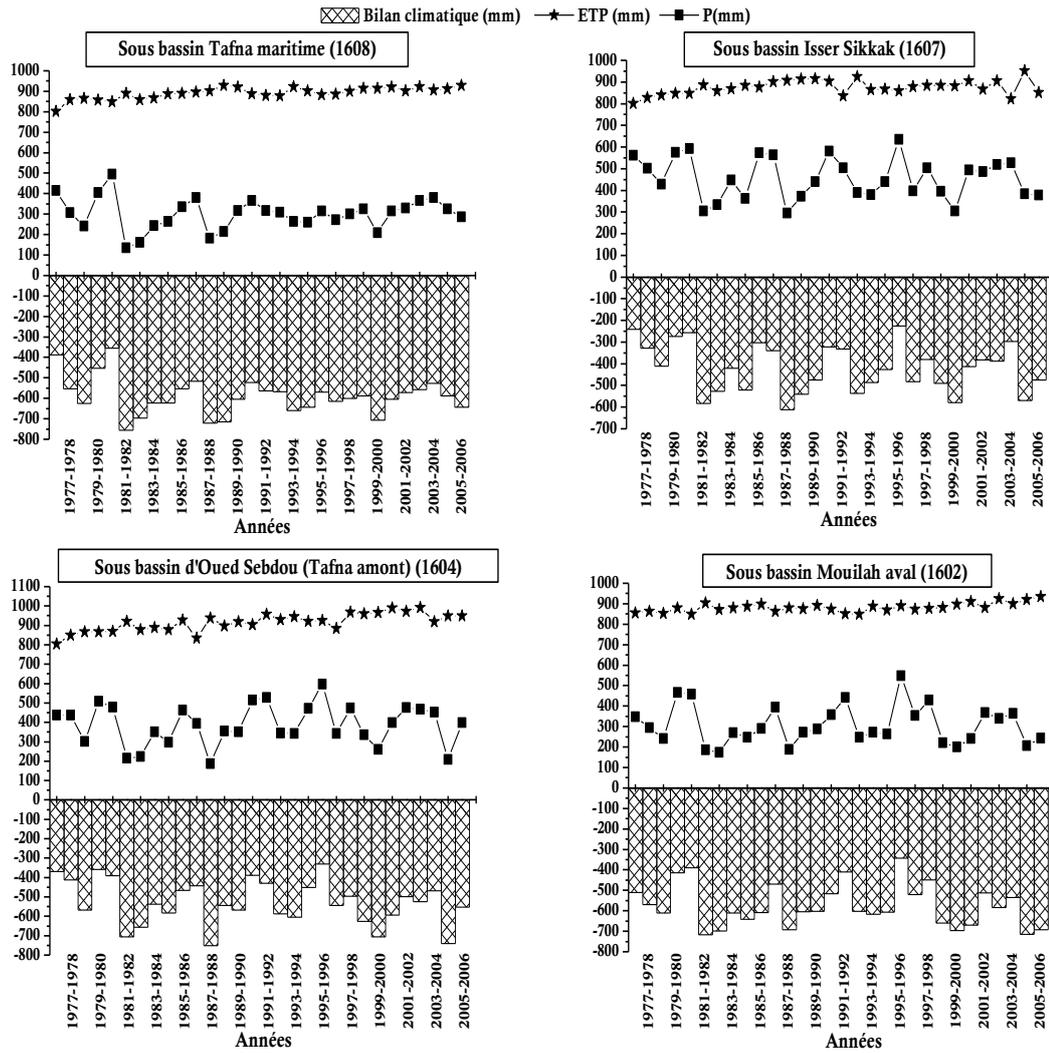


Fig. III.20. Evolution interannuelle du bilan climatique dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d’Isser Sikkak (1607), d’Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d’étude (1976-2006).

D’ailleurs, l’analyse de l’évolution de la variabilité interannuelle en eau de ruissellement dans les sous bassins durant la période 1976-2006 (Fig. III.21), traduit par le coefficient alpha (α) estimé en calculant le rapport entre la pluie et l’évapotranspiration potentielle (*Sutcliffe et Piper, 1985*), souligne une tendance à la baisse de la disponibilité en eau de ruissellement observée au début des années 1990. Cette disponibilité varie entre 0,15 et 0,58 pour le sous bassin de Tafna maritime (1608), entre 0,33 et 0,74 pour le sous bassin d’Isser Sikkak (1607), entre 0,2 et 0,65 pour le sous bassin d’Oued Sebdou (Tana amont) (1604) et entre 0,19 et 0,62 pour le sous bassin de Mouilah aval (1602) (Fig. III.21).

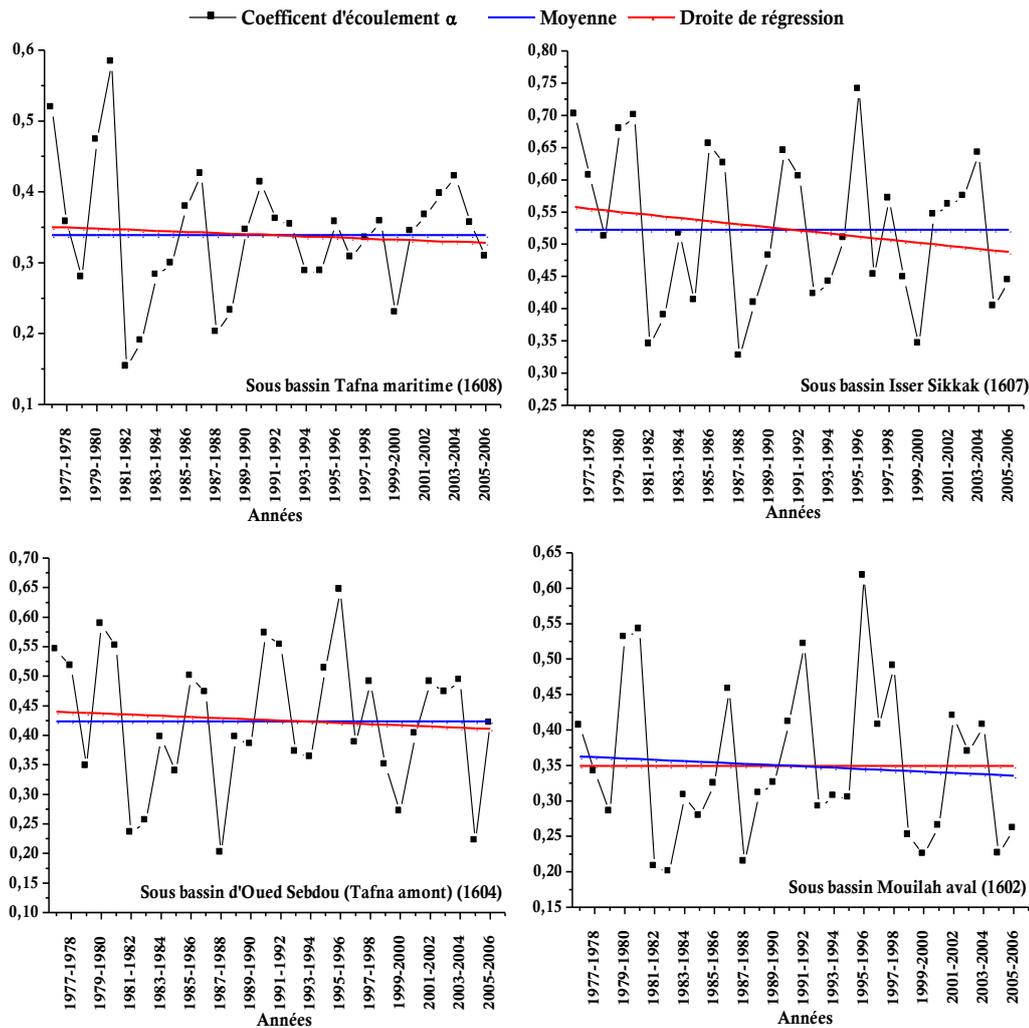


Fig. III.21. Variation interannuelle en eau de ruissellement dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).

En définitive, l'évolution de la réserve en eau du sol semble être conforme à celle du bilan climatique. C'est une conséquence légitime vue que la régression pluviométrique des années 1970 et 1980 a eu des répercussions importantes sur la disponibilité en eau dans les sous bassins.

IV.3.2 Bilan climatique mensuel

A l'échelle mensuelle, le bilan climatique réalisé dans les sous bassins met en évidence deux périodes distinctes (Fig. III.22) :

- Une période humide de cinq mois (de novembre à mars) où la pluviométrie moyenne mensuelle est supérieure à l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle. Une période où les maxima pluvieux sont enregistrés en novembre pour les sous bassins de Tafna maritime (1608) et de Mouilah aval (1602), en février pour le sous bassin d'Isser Sikkak (1607), et en mars pour le sous bassin d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604). En revanche,

le bilan moyen mensuel atteint son maxima positif en janvier pour les quatre sous bassins. En définitive, ces cinq mois humides fournissent le surplus d'eau aux Oueds, assurent de l'eau dans les premiers horizons du sol et favorisent l'alimentation des nappes souterraines ;

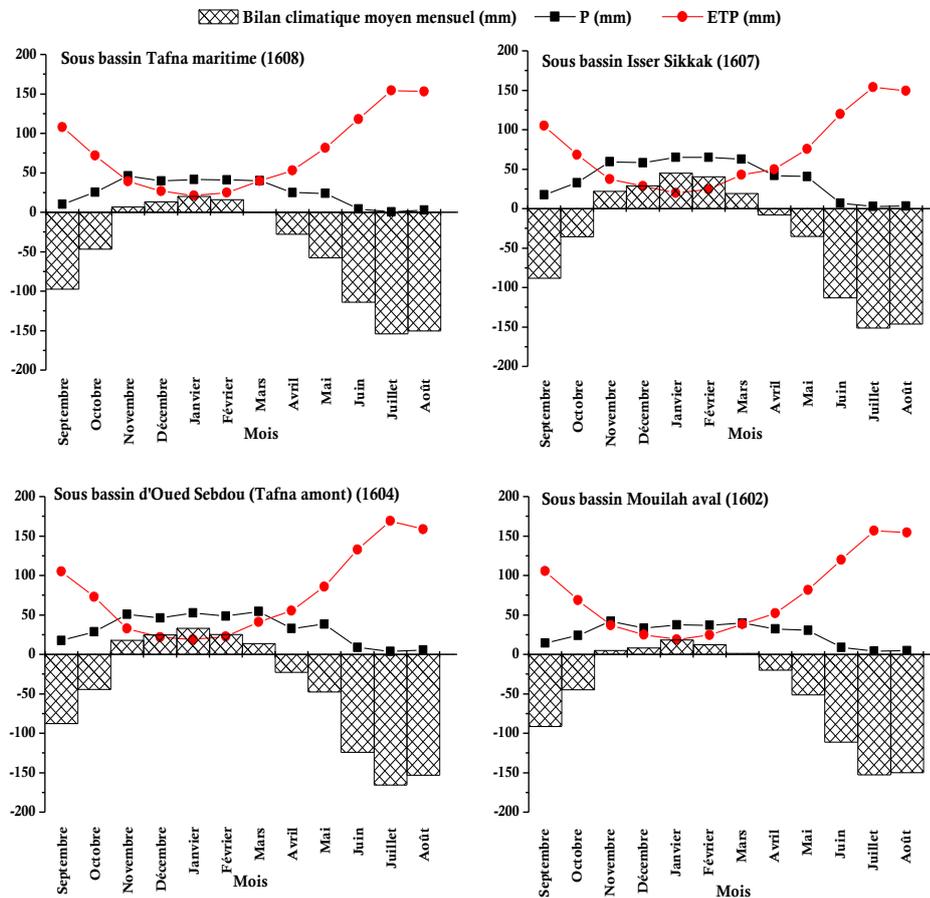


Fig. III. 22. Evolution moyenne intra-mensuelle du bilan climatique dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).

- La période sèche s'inscrit entre le mois d'avril et le mois d'octobre au cours de laquelle la demande évaporatoire est importante, plus particulièrement durant le mois de juillet où le bilan moyen mensuel (en valeur négatif) enregistre son maximum pour l'ensemble des sous bassins versants, ce qui provoque un épuisement des réserves d'eau du sol.

V. Fonctionnement hydrologique

Pour mettre en évidence la contribution des lames d'eau précipitées sur les lames d'eau écoulées et de comprendre les mécanismes hydrologiques, une analyse des interactions entre les hauteurs pluviométriques et les écoulements s'avère nécessaire pour confirmer les hypothèses sur l'intervention de l'évaporation, l'évapotranspiration et l'infiltration sur les débits que l'on trouve à l'exutoire.

V.1 Régimes hydrologiques moyens des sous bassins du bassin versant de la Tafna

La répartition pluviométrique dans le bassin versant et la structure géologique sont autant de facteurs qui expliquent le régime moyen mensuel des Oueds. Ainsi, les saisons sèches et humides dans le bassin déterminent le rythme d'écoulement des Oueds du bassin versant de la Tafna influencé par un climat régional, de type semi-aride, modulé par la proximité de la mer et par la présence de reliefs accentués (*Aimé et Remaoun, 1988*).

La représentation graphique III.23 illustre la variation mensuelle des lames d'eau précipitées et écoulées des sous-bassins versants de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607) de 1970 à 2000, et des sous-bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah (1602) de 1973 à 2006. Sachant que d'octobre à avril, l'évapotranspiration potentielle est supérieure à la pluviométrie (Fig. III.22), durant cette période sèche, les lames écoulées enregistrent une baisse en août. Cela témoigne sans doute de la faiblesse de la réserve souterraine. En revanche, les lames écoulées s'amplifient qu'au cours des mois humides (de novembre à mars). Ils deviennent perceptibles pour les quatre sous bassins qu'en mars où la pluviométrie moyenne mensuelle est supérieure ou égale à l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle sur l'ensemble des sous-bassins (Fig. III.22).

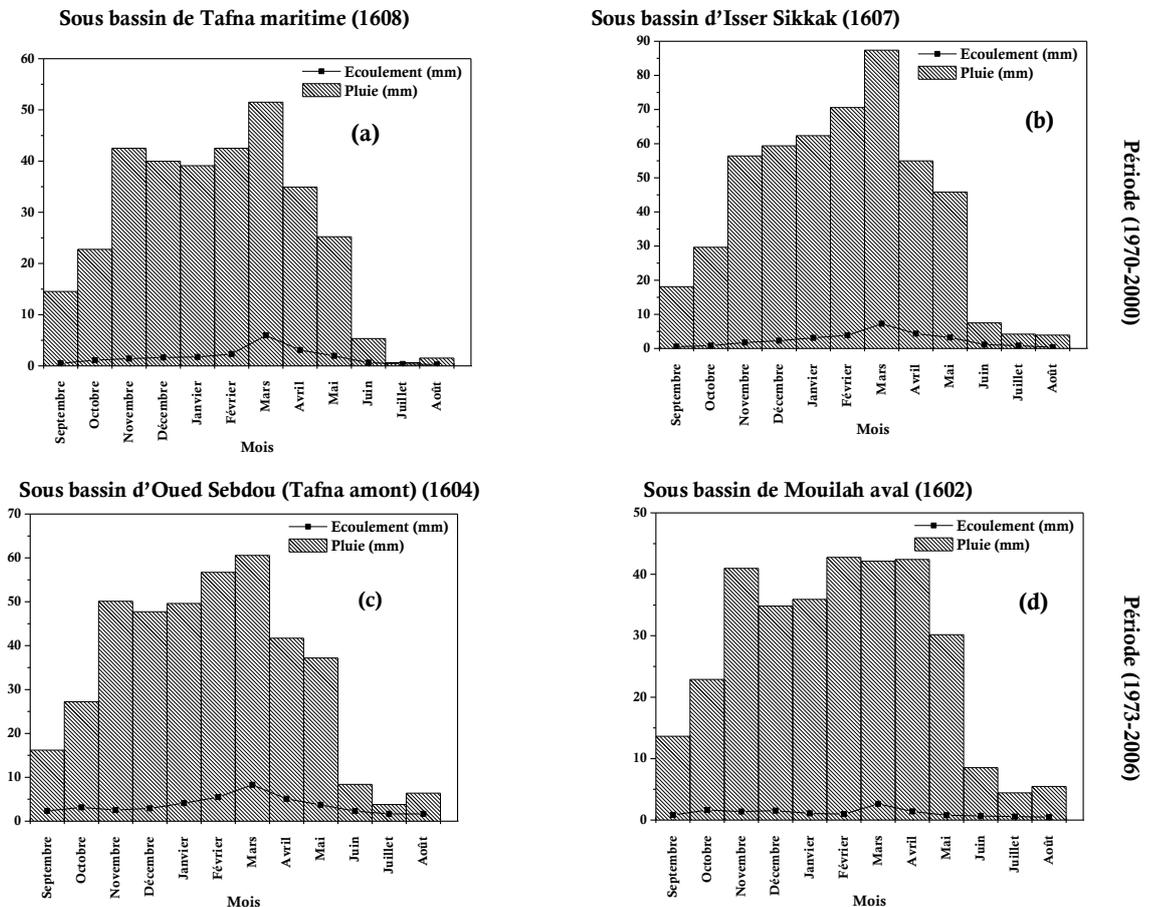


Fig. III.23. Variation mensuelle des lames précipitées /lames écoulées des sous-bassins du bassin de la Tafna.

V.2 Corrélation hydro-pluviométrique des valeurs annuelles

La figure III.24 présente la corrélation pluie/écoulement annuel de 1970 à 2000 dans les sous bassins de Tafna maritime (1608) ($r=0,67$) et d'Isser Sikkak (1607) ($r=0,77$). Elle montre que l'écoulement du sous bassin de Tafna maritime (1608) débute quand les précipitations atteignent 135 mm alors que sur le sous bassin d'Isser Sikkak (1607), il faut atteindre 300 mm. Ceci est en accord avec le fait que les écoulements débutent un à deux mois après les premières pluies (Fig. III.23 (b)). C'est ce qui explique la différence de temps de réponse de l'écoulement entre les deux sous bassins.

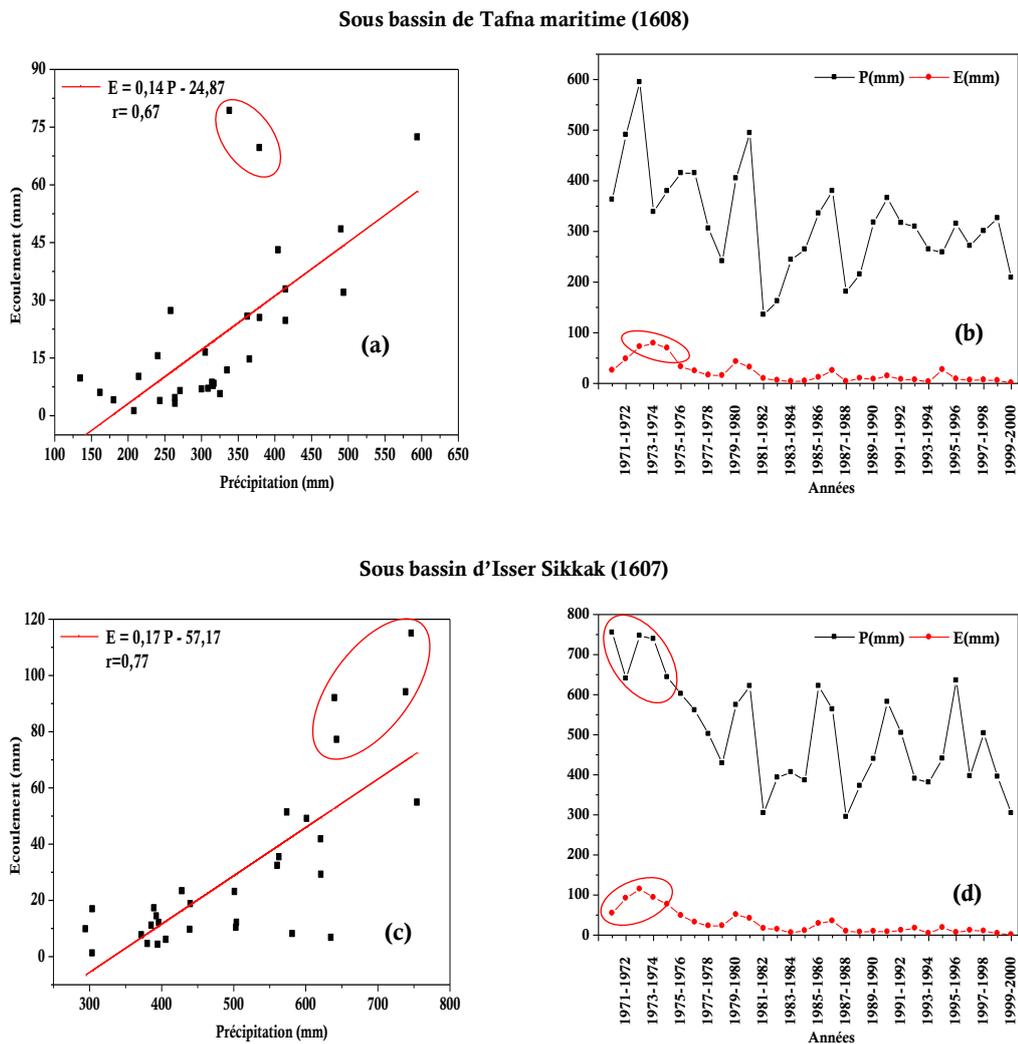


Fig. III.24. Corrélation hydro-pluviométrique et variation annuelle des lames précipitées et écoulées. Période d'étude (1970- 2000).

L'éloignement de quelques points de la droite de régression (Fig. III.24 (a)) est dû probablement aux lames d'eau écoulées exceptionnelles enregistrées au niveau du sous bassin de Tafna maritime (1608) durant les années 1973-1974 (79,2 mm) et 1974-1975 (69,5 mm). En revanche, pour le sous bassin d'Isser Sikkak, cet éloignement est dû (Fig. III.24 (b)) aux lames d'eau

précipitées et écoulées exceptionnelles enregistrées sur le bassin d'Isser Sikkak (1607) au début de la période d'étude (1970-2000).

La figure III.25 présente la corrélation pluie/écoulement annuel de 1973 à 2006 dans les sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) ($r=0,72$) et de Mouilah aval (1602) ($r=0,52$). Elle montre que l'écoulement du sous bassin de Mouilah aval (1602) débute quand les précipitations atteignent 170 mm alors que sur le sous bassin d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604), il faut attendre 187 mm. Ceci s'explique par la différence de temps de réponse de l'écoulement entre ces deux sous bassins.

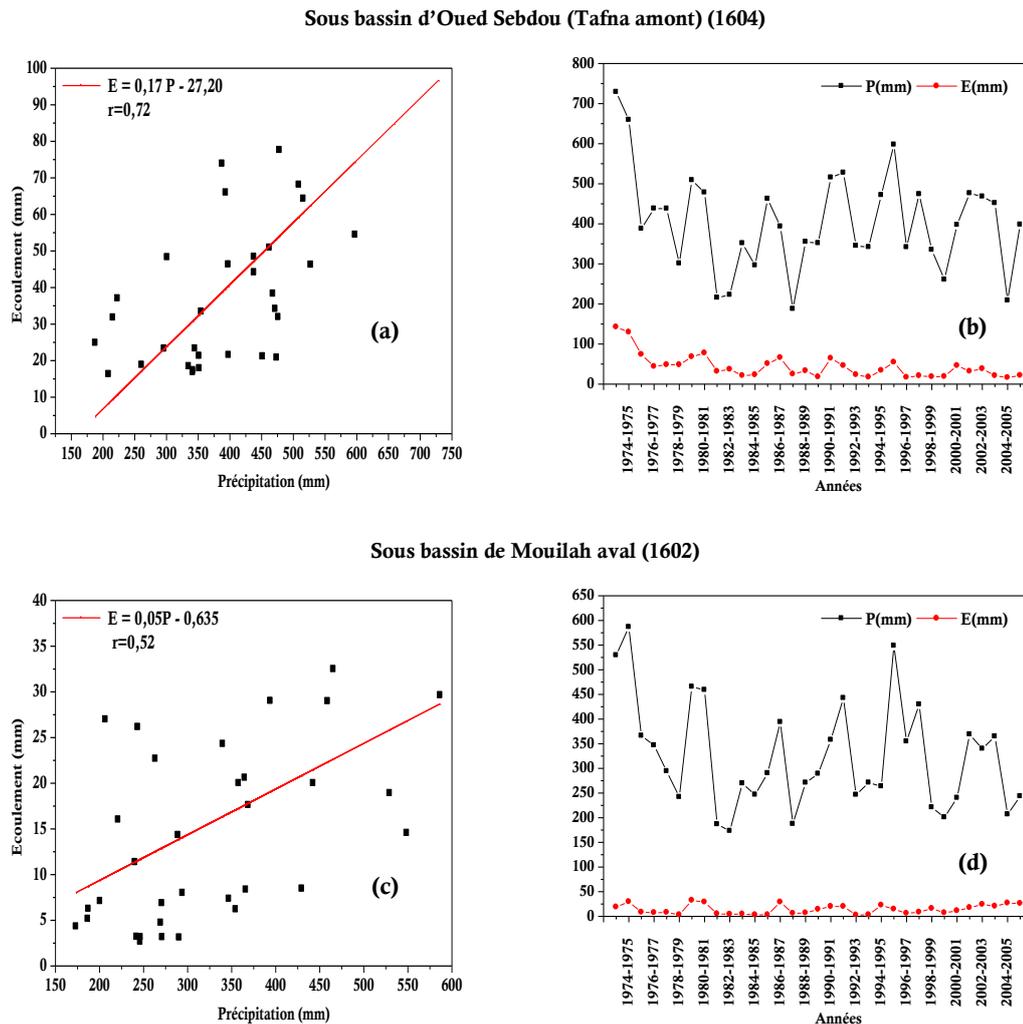


Fig. III.25. Corrélation hydro-pluviométrique et variation annuelle des lames précipitées et écoulées. Période d'étude (1973-2006).

La figure III.25 (b) présente un nuage de points très épais. Ceci peut être expliqué par le changement du régime hydrologique suite à la construction du barrage Hammam Boughrara à l'aval de la station hydrométrique.

Cette différenciation de temps de réponse des quatre sous bassins semble liée à différents facteurs comme la formation géologique ou encore l'occupation du sol. En effet, presque la totalité du bassin versant de la Tafna est occupé par des formations perméables à semi perméables (Tableau III.22), ce qui favorise l'infiltration des eaux de surfaces.

Tableau III.22. Différentes formations géologiques des sous bassins du bassin versant de la Tafna.

Code	Sous-Bassin	Forte perméabilité		Perméable		Semi perméable		Imperméable	
		Jurassique carbonaté	Quaternaire continental	Alluvions actuelles	Pliocène continental (Poudingues calcaires lacustres)	Oligocène Grés avec intercalations Marneuses	Crétacés	Miocène Marneuse et Argiles Greneuses	Basaltes
1608	Tafna maritime								
1607	Isser Sikkak								
1604	Oued Sebdou (Tafna Amont)								
1602	Mouilah Aval								

L'abondance relative de formations carbonatées karstiques, représentées par les dolomies de Terny et de Tlemcen dans les sous bassins d'Isser Sikkak (1607) et d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) permet sans doute de différencier le comportement hydrologique de ces bassins à celui du sous bassin de Mouilah aval (1602) dont plus de la moitié de la superficie est occupée par des alluvions plio-quaternaires surmontant les marnes et grés miocènes au niveau de la plaine de Maghnia (Annexe.14) (Bouanani, 2004).

Conclusion

La variation constatée dans le comportement hydrologique des sous-bassins du bassin versant de la Tafna pourrait être due, d'une part, à l'impact de la régression pluviométrique suite à une période de sécheresse instaurée au milieu des années 1970, le début des années 1980 et à l'évapotranspiration potentielle élevée. D'autre part, à l'évolution du couvert végétal et aux modifications géographiques du bassin versant de la Tafna.

La corrélation hydro-pluviométrique élevée montre ainsi que les lames précipitées et écoulées sont liées, ce qui donne des années hydrologiques relativement indépendantes avec une différenciation du temps de réponse pour les quatre sous bassins selon leur formation géologique respective.

L'analyse de la problématique d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit suite à la variabilité climatique fera ainsi l'objet du quatrième chapitre. Une analyse qui nécessite des outils performants et robustes tels que les modèles hydrologiques afin de simuler les écoulements et de chercher de tendances dans le comportement hydrologique des sous-bassins versant du bassin de la Tafna.

Chapitre IV

**Tendance et régionalisation de la relation
pluie-débit du bassin versant de la Tafna**

**TENDANCE ET REGIONALISATION DE LA RELATION PLUIE-
DEBIT DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA**

« ...Le peu le très peu que l'on peut faire, il faut le faire quand même... »

Théodore Monod. *Naturaliste français*

Introduction

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans la zone d'étude, nous avons essayé d'identifier la tendance dans la relation pluie-débit des sous bassins du bassin versant de la Tafna. Pour atteindre cet objectif, il fallait évaluer la performance et l'incertitude des simulations du modèle hydrologique appliqué en tant que représentation mathématique du fonctionnement des sous bassins. Ensuite, une régionalisation du modèle GR2M a été appliquée, en adoptant une régression linéaire entre les paramètres X_1 et X_2 du modèle et les variables explicatives des sous bassins utilisées afin de simuler la série de lames d'eau écoulées dans les sous bassins mal jaugés de la Tafna.

I. Performances et robustesse du modèle hydrologique

I.1 Performances en phases de calage et de validation du modèle global : GR2M

Les modèles conceptuels nécessitent une phase de spécification des paramètres qui pour lesquelles il faut supposer qu'il n'y a pas eu de changement dans les caractéristiques hydrologiques ou physiographiques du bassin versant (*Diello, 2007*). La rupture de stationnarité, détectée lors de l'analyse des séries pluviométriques au milieu des années 1970 et le début des années 1980, a introduit une modification du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Tafna. Ainsi, le choix des périodes de calage devient primordial pour la spécification des paramètres du modèle.

Il existe plusieurs méthodes pour faire le choix des périodes de calage/validation des modèles développés. On trouve entre autres, la méthode *simple split sample*, la méthode *differential split sample test* (Klemeš, 1986) et la méthode *differential proxy catchment* (Koffi, 2007).

La méthode *simple split-sample* est généralement utilisée lorsque l'on veut utiliser le modèle sur des bassins versants qui risquent d'être peu modifiés. La méthode *differential split sample test* a été présentée comme valable lorsque l'objectif est de prédire l'impact des changements climatiques. Or, il a été prouvé que les variations climatiques importantes n'ont pas toujours eu un impact visible sur le régime hydrologique d'un bassin (Ewen et Parkin, 1996 in Koffi, 2007). Les méthodes *simple split-sample* et *proxy-catchment* sont celles qui sont généralement utilisées. Dans cette analyse, la méthode du *simple split-sample test* a été celle utilisée pour représenter les résultats de la modélisation en calage et en validation, nous avons pris le découpage de 2/3 et 1/3. Les résultats de simulation des écoulements mensuels effectuée au niveau des quatre sous bassins sont représentés dans les tableaux IV.1 et IV.2.

Tableau IV.1. Résultats des calages (1976-1992) et des validations (1992-2000) du modèle GR2M aux sous-bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).
Période d'étude (1976-2000).

Code	1608	1607	Moyenne
Sous bassin	Tafna maritime	Isser Sikkak	
X₁ (mm)	492,75	699,24	596,0
X₂	0,88	0,72	0,8
Nash calage (%)	70,3	80,5	75,4
R² (%)	58,5	85,0	71,8
Nash validation (%)	74,4	88,5	81,5
R² (%)	97,2	90,3	93,8

Tableau IV. 2. Résultats des calages (1976-1996) et des validations (1996-2006) du modèle GR2M aux sous-bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).
Période d'étude (1976-2006).

Code	1604	1602	Moyenne
Sous bassin	Oued Sebdou (Tafna amont)	Mouilah aval	
X₁ (mm)	295,27	88,68	192,0
X₂	0,74	0,42	0,6
Nash calage (%)	78,7	75,6	77,2
R² (%)	80,3	86,3	83,3
Nash validation (%)	72,6	84,7	78,7
R² (%)	72,8	65	68,9

Le paramètre X₁ (capacité maximale du réservoir sol) varie entre 492,75 mm et 699,24 mm, avec une moyenne de l'ordre de 596,0 mm durant la période 1976-2000 et entre 88,68 mm et 295,27 mm, avec une moyenne de 192 mm pour la période 1976-2006 (Tableau IV.1 et IV.2).

Le paramètre X_2 (paramètre d'échange, permettant au modèle de simuler un échange avec les eaux souterraines ou un autre type de ressource en eau située hors du bassin) oscille entre 0,72 et 0,88 durant la période 1976-2000 avec une moyenne de 0,8 et entre 0,42 et 0,74 avec une moyenne de 0,6 pour la période d'étude 1976-2006. Ces valeurs restent inférieures à 1, ce qui indique des apports d'eau au niveau des différents sous bassins (Tableau IV.1 et IV.2). En effet, lorsque X_2 est supérieure à 1, on assiste à une perte d'eau du réservoir vers les autres bassins versants et dans le cas contraire, c'est plutôt un apport vers le réservoir qu'il traduit (Koffi, 2007).

D'une manière générale, en calage, les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sont satisfaisantes pour l'ensemble des quatre sous bassins (Tableau IV.1 et IV.2). La performance moyenne du critère de Nash-Sutcliffe est de 75,4 % pour les sous bassins étudiés durant la période 1976-2000 et de 77,2% pour ceux analysés sur la période allant de 1976 à 2006. En validation, les valeurs moyennes du critère de Nash-Sutcliffe obtenues sont de 81,5% pour les sous bassins traités durant la période d'étude 1976-2000 et de 78,7% pour ceux analysés sur la période allant de 1976 à 2006. En ce qui concerne le coefficient de détermination (R^2), les valeurs obtenues sont: 1) en calage, le maximum est de 0,833 (1976-2006) et le minimum de 0,718 (1976-2000). 2) en validation, le maximum est enregistré durant la période 1976-2000 avec une valeur de 0,938 et le minimum est de 0,689 obtenu durant la période 1976-2006.

Les bonnes valeurs des critères de performance (Nash, R^2) ne sont pas suffisantes pour trancher sur la bonne simulation du modèle GR2M des débits mensuels au niveau des sous bassins. Il faut alors associer à ces critères les hydrogrammes pour pouvoir apprécier la représentativité de ces derniers par ce modèle de simulation. Ainsi, les représentations graphiques ci-dessous (Fig. IV.1 ; Fig. IV.2 ; Fig. IV.3 et Fig. IV.4) exposent les différents tracés des hydrogrammes observés et simulés en calage et en validation.

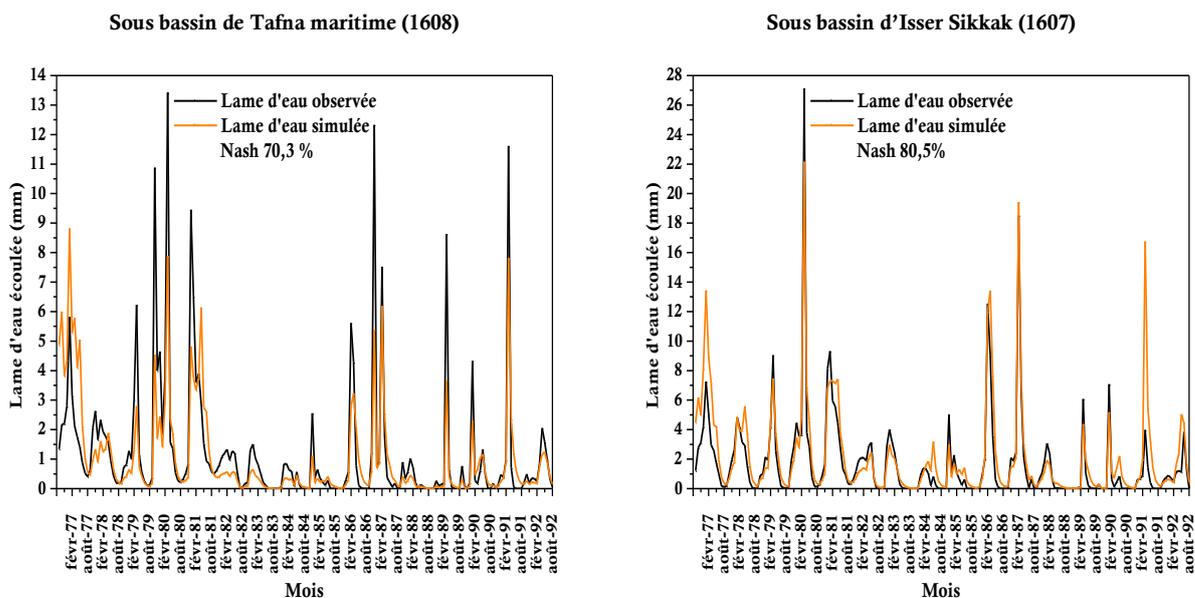


Fig. IV.1. Hydrogrammes observés et simulés en phase de calage par le modèle GR2M (1976-1992) aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).

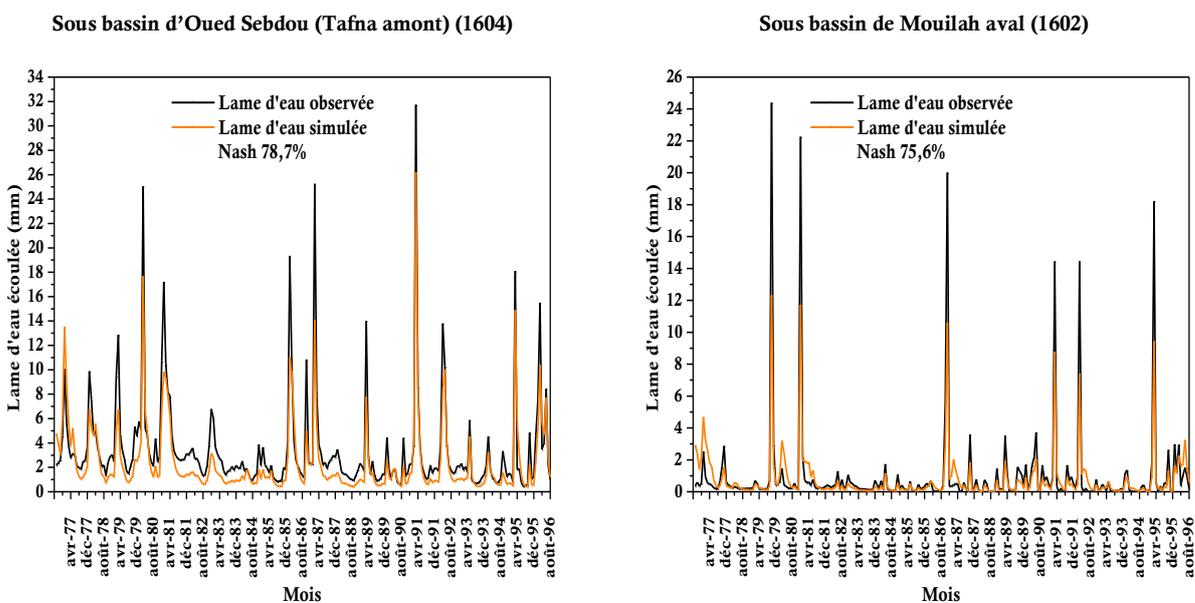


Fig. IV.2. Hydrogrammes observés et simulés en phase de calage par le modèle GR2M (1976-1996) aux sous bassins d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

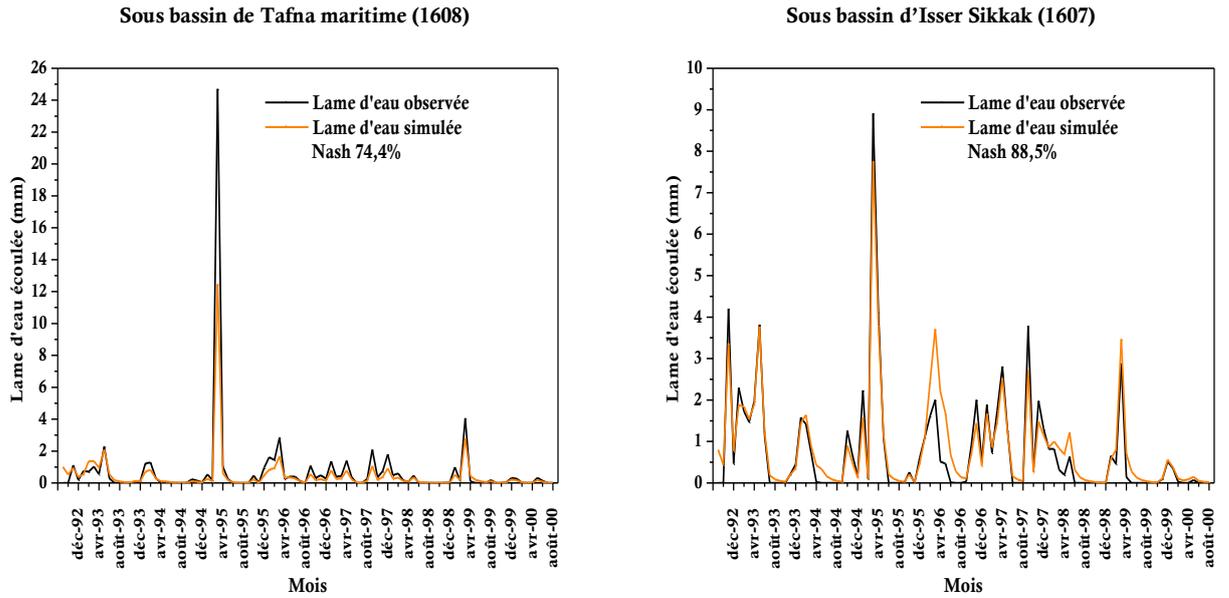


Fig. IV.3. Hydrogrammes observés et simulés en phase de validation par le modèle GR2M (1992-2000) aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).

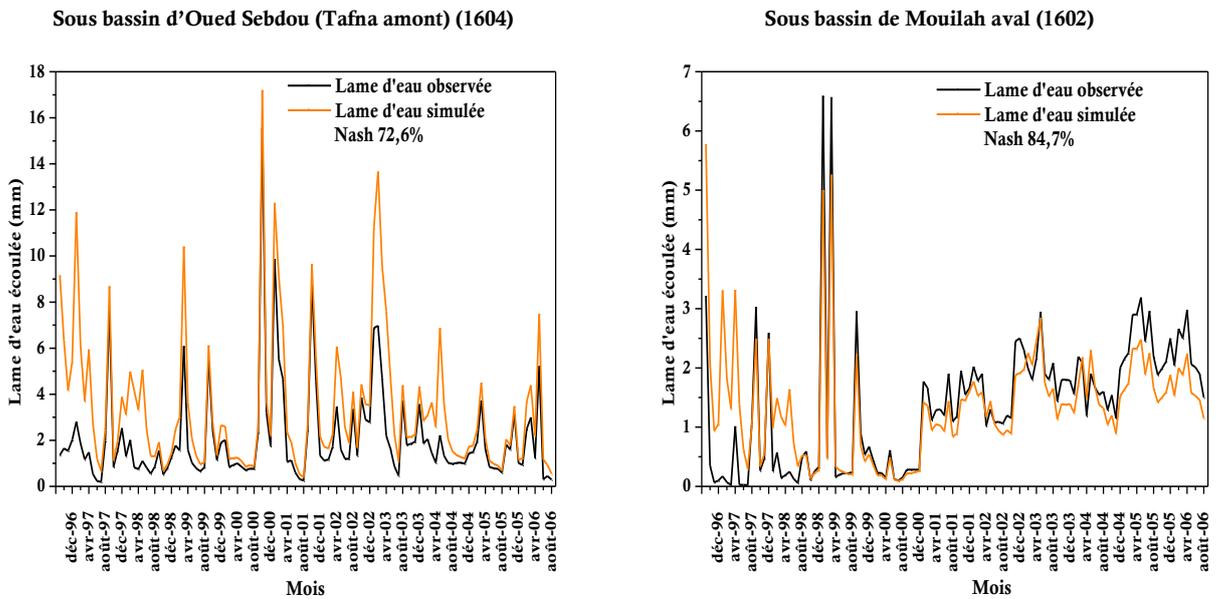


Fig. IV.4. Hydrogrammes observés et simulés en phase de validation par le modèle GR2M (1996-2006) aux sous bassins d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

Ces représentations montrent que la dynamique des écoulements, à travers l'évolution des hydrogrammes simulée en phases de calage et de validation, coïncide bien à assez bien avec ceux observés. En effet, le calcul des lames d'eau moyennes mensuelles donne des variations saisonnières acceptables sur l'échantillon de calage (Fig. IV.1 et Fig. IV.2). En revanche, les crues ont été mal simulées particulièrement après 1978, période marquée par l'intensification des phénomènes de dégradation des conditions hydrométéorologiques, dont les paramètres liés constituent les variables de forçage du modèle GR2M. Le modèle GR2M sous-estime les plus forts débits de pointe sauf pour le sous bassin d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) en phase de

validation, ils sont surestimés (Fig. IV.3). En revanche, il produit des très faibles débits durant les périodes, 1987-1992 pour les sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607) et 1988-1996 pour les sous bassins d'Oued Sebdou (Tana amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Ces périodes coïncident avec la période de la sécheresse. Les débits observés et calculés par le modèle GR2M sont présentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3. Débits observés et calculés (mm) par le modèle GR2M.

Code	Sous bassin	Calage		Validation	
		Débits observés	Débits calculés	Débits observés	Débits calculés
Période 1976-2000					
1608	Tafna maritime	1,23	1,07	0,68	0,46
1607	Isser Sikkak	1,72	2,18	0,77	0,85
	Moyenne	1,48	1,63	0,73	0,66
Période 1976-2006					
1604	Oued Sebdou (Tafna amont)	3,47	2,49	2,08	3,45
1602	Mouilah aval	1,00	0,81	1,38	1,35
	Moyenne	2,24	1,65	1,73	2,40

Les résultats de calculs montrent que durant la période d'étude 1976-2000, le débit moyen observé est de 1,48 mm et le débit moyen calculé est de 1,63 mm. En validation, le débit moyen observé est de 0,73 mm et le débit moyen calculé est de 0,66 mm. Pour la période d'étude étalé de 1976 à 2006, les résultats de calcul en calage donnent un débit moyen observé de 2,24 mm et un débit moyen calculé de 1,65 mm. En validation, le débit moyen observé est de 1,73 mm et le débit moyen calculé est de 2,40 mm. Les débits calculés par le modèle GR2M en calage comme en validation sont proches, par valeurs supérieures ou par valeurs inférieures, aux débits observés.

En définitive, l'ensemble des résultats obtenus concourt à affirmer que le modèle GR2M est un modèle performant donc capable de simuler des débits mensuels proches de ceux observés.

I.2 Robustesse du modèle GR2M

Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe observés et calculés en étapes de calage et de validation, ont été étudiés afin d'évaluer le modèle GR2M (Tableau VI.4). Les résultats du tableau IV.5 présentent les écarts de variation des performances moyennes obtenues entre la phase de calage et la phase de validation du modèle GR2M.

Tableau VI.4. Synthèse des performances en calage et en validation du modèle GR2M.

Code	Sous bassin	Calage		Validation	
		1976-1992	1992-2000	1976-1992	1992-2000
Période 1976-2000					
1608	Tafna maritime	70,3	69,1	65,8	74,4
1607	Isser Sikkak	80,5	77,9	81,7	88,5
	Moyenne	75,4	73,5	73,8	81,5
Période 1976-2006					
		1976-1996	1996-2006	1976-1996	1996-2006
1604	Oued Sebdou (Tafna amont)	78,7	76,3	78,6	72,6
1602	Mouilah aval	75,6	86,1	86,1	84,7
	Moyenne	77,2	81,2	82,4	78,7

Tableau IV.5. Performances moyennes et critère de robustesse du modèle GR2M.

		Performance moyenne Calage	Performance moyenne Validation	Ecart de variation
		Période 1976-2000		
1608	Tafna maritime	69,7	70,1	-0,4
1607	Isser Sikkak	79,2	85,1	-5,9
	Moyenne	74,5	77,6	-3,2
Période 1976-2006				
1604	Oued Sebdou (Tafna amont)	77,5	75,6	+1,9
1602	Mouilah aval	80,9	85,4	-4,6
	Moyenne	79,2	80,5	-1,3

Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe montrent que le GR2M a été performant sur les sous bassins étudiés. En fait, les valeurs du critère obtenues sont supérieures à 60% en calage comme en validation.

Selon la technique du double échantillon (Chapitre 1 ; section III.4), les valeurs de performances enregistrées, en passant de l'étape de calage à l'étape de validation, et qui définit le critère de robustesse du modèle sont acceptable. Elle varie entre -5,9% et -0,4% avec une moyenne de -3,2% pour les sous bassins étudiés durant la période 1976-2000. Elle oscille entre -4,6% et +1,9% avec une moyenne de -1,3% pour les sous bassins analysés sur la période allant de 1979 à 2006. Ces valeurs indiquent que, hormis le sous bassin d'Oued Sebdou (Tafna amont), les performances induites au niveau du calage dans la procédure d'optimisation se dégradent au cours de la validation. Les valeurs absolues du critère de robustesse constatées par référence au critère de qualité utilisé (critère de Nash-Sutcliffe), sont inférieures à 10% en valeur absolue, ce qui traduit la robustesse du modèle GR2M version Mouelhi sur les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602) du bassin versant de la Tafna.

II. Evaluation des incertitudes associées aux valeurs de débits simulés

Pour quantifier les incertitudes associées aux débits simulés par le modèle GR2M, nous avons analysé les résidus ($Q_{\text{observé}} - Q_{\text{simulé}}$) et le rapport de débit observé et débit simulé (Chapitre I ; section III.5 ; équation I.4). La représentation des résidus en fonction des débits simulés est illustrée par les figures IV. 5 et IV.6.

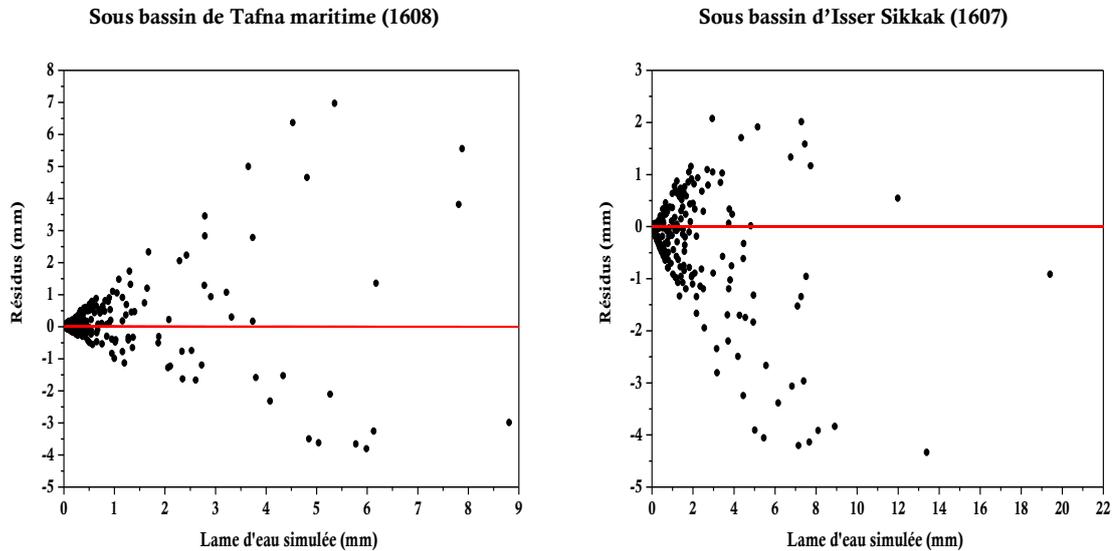


Fig. IV.5. Relation entre les résidus et les lames d'eau simulées aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607).

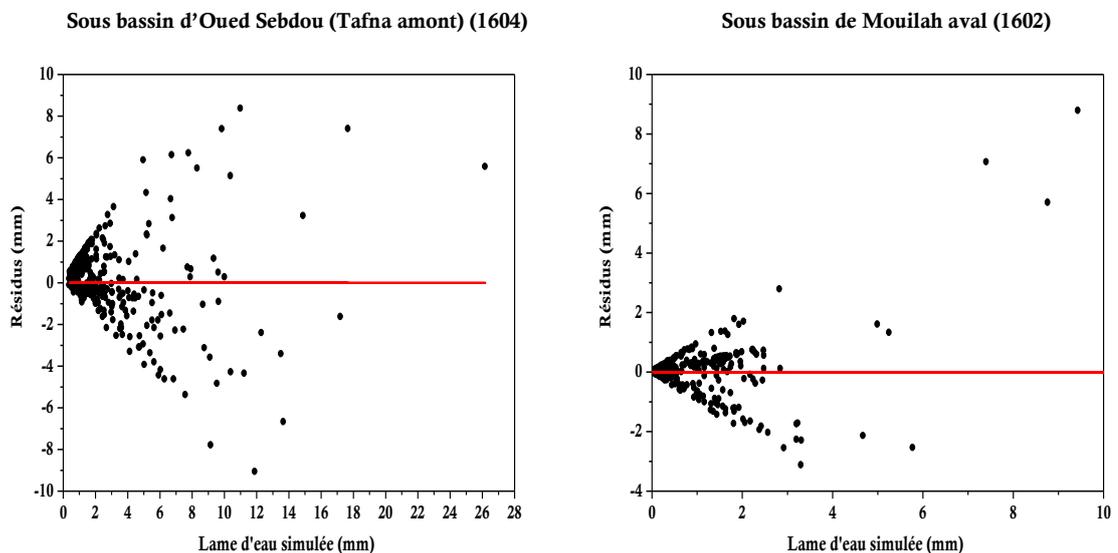


Fig. IV.6. Relation entre les résidus et les lames d'eau simulées aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

Ces figures montrent qu'une grande partie des nuages de points se rassemblent vers les faibles valeurs de débits simulés. Elles présentent une certaine distribution autour de la valeur 0 de l'erreur ($Q_{\text{observé}} - Q_{\text{simulé}}$). En revanche, les fortes valeurs donnent des erreurs parfois

importantes qu'indiquent une tendance marquée vers une sous-estimation ou une surestimation pour l'ensemble des sous bassins. La quantification des incertitudes en analysant la moyenne des résidus (Tableau IV.6) montre qu'elle est positive de valeur 0,20 et 0,11 respectivement pour les sous bassins de Tafna maritime (1608) et de Mouilah aval (1602) donnant ainsi des estimations affectées de biais avec une tendance à une surestimation des débits par le modèle. En revanche, elle prend une valeur négative pour le sous bassin d'Isser Sikkak (1607) -0,25 et le sous bassin d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) -0,20 et une tendance à une sous-estimation des débits par le modèle.

Tableau IV.6. Erreurs calculées en phases de calage et de validation des sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

Code	Sous bassin	Calage	Validation	Moyenne
		Période 1976-2000		
1608	Tafna maritime	0,17	0,22	0,20
1607	Isser Sikkak	-0,46	-0,08	-0,25
Période 1976-2006				
1604	Oued Sebdou (Tafna amont)	0,98	-1,37	-0,20
1602	Mouilah aval	0,19	0,03	0,11

Le tableau IV.7 résume les incertitudes associées aux débits simulés par le modèle GR2M en phases de calage et de validation des quatre sous bassins.

Tableau IV.7. Incertitudes en phases de calage et de validation dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

Code	Sous bassin	Incertitude en calage	Incertitude en validation
		Période 1976-2000	
1608	Tafna maritime	1,49	1,45
1607	Isser Sikkak	0,85	0,84
Moyenne		1,17	1,15
Période 1976-2006			
1604	Oued Sebdou (Tafna amont)	1,52	0,64
1602	Mouilah aval	1,36	1,06
Moyenne		1,44	0,85

En phase de calage, les valeurs moyennes interannuelles des incertitudes varient entre 0,85 (Isser Sikkak) (1607) et 1,49 (Tafna maritime) (1608) avec une moyenne de 1,17 pour les sous bassins analysés durant la période 1976-2000. Pour les sous bassins traités durant la période étalée entre 1976-2006, les incertitudes moyennes interannuelles estimées oscillent entre 1,36 (Mouilah aval) (1602) et 1,52 (Oued Sebdou (Tafna amont)) (1604) avec une moyenne de 1,44. En phase de validation, la moyenne des moyennes interannuelles des incertitudes est de 1,15 pour les sous bassins traités durant la période d'étude 1976-2000 et de 0,85 pour celles analysés sur la période 1976-2006. D'après ce tableau IV.7, les incertitudes moyennes interannuelles associées aux

débits simulés par le modèle GR2M sont plus importantes en phase de calage qu'en phase de validation.

Pour évaluer mieux les erreurs enregistrées, des représentations graphiques sur un fond logarithmique de ces incertitudes en fonction des débits observés par rapport à celles estimés en phases de calage et de validation ont été réalisées à l'échelle annuelle (Fig. IV.7 à Fig. IV.10). Elles montrent que les incertitudes moyennes interannuelles calculées en phase de calage aux bassins de Tafna maritime (1608), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602) sont surestimées où celles-ci s'éloignent plus de la valeur de référence (1). En enregistrant, en 1976-1977, des valeurs minimales de 0,47 ; 0,72 et 0,30 respectivement pour les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). En 1982-1983, ces sous bassins enregistrent des valeurs maximales de 2,24 (Tafna maritime (1608)) ; de 2,15 (d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604)) et de 1,86 (Mouilah aval (1602)). En revanche, durant cette phase, les incertitudes moyennes interannuelles calculées au sous bassin d'Isser Sikkak (1607) sont sous-estimés avec un minimum de 0,26 en 1990-1991 et un maximum de 1,38 en 1981-1982.

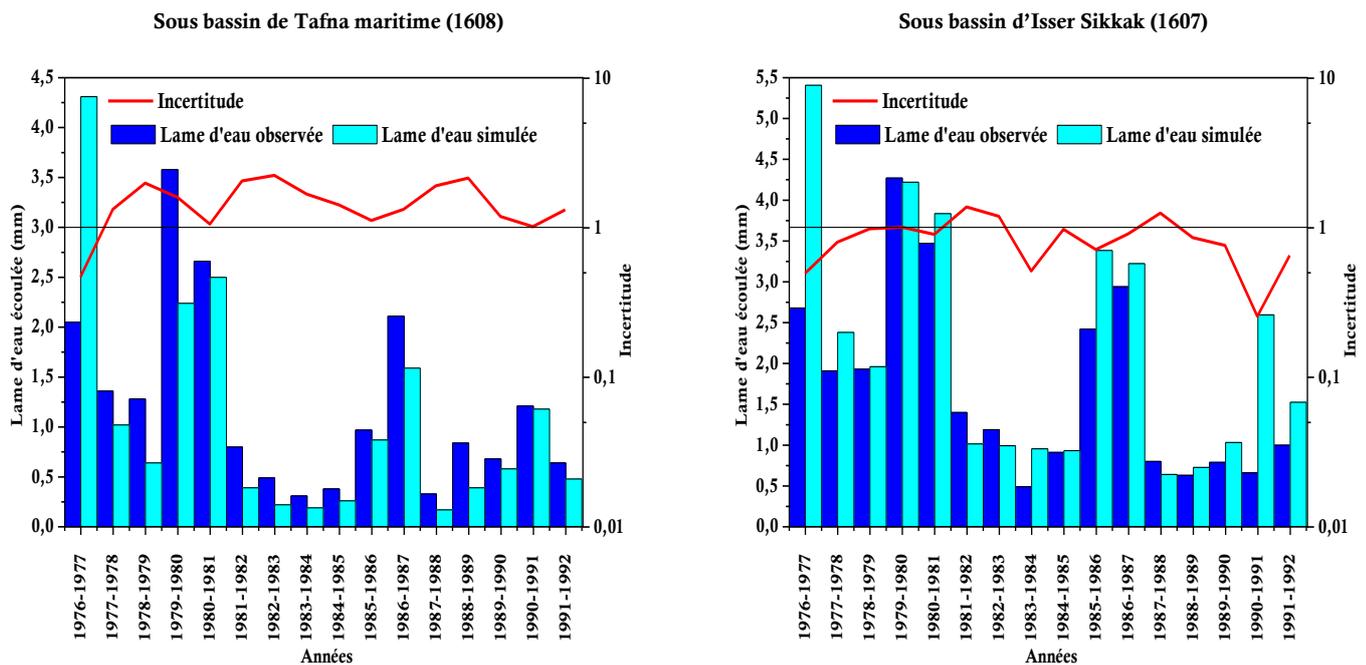


Fig. IV.7. Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de calage aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).

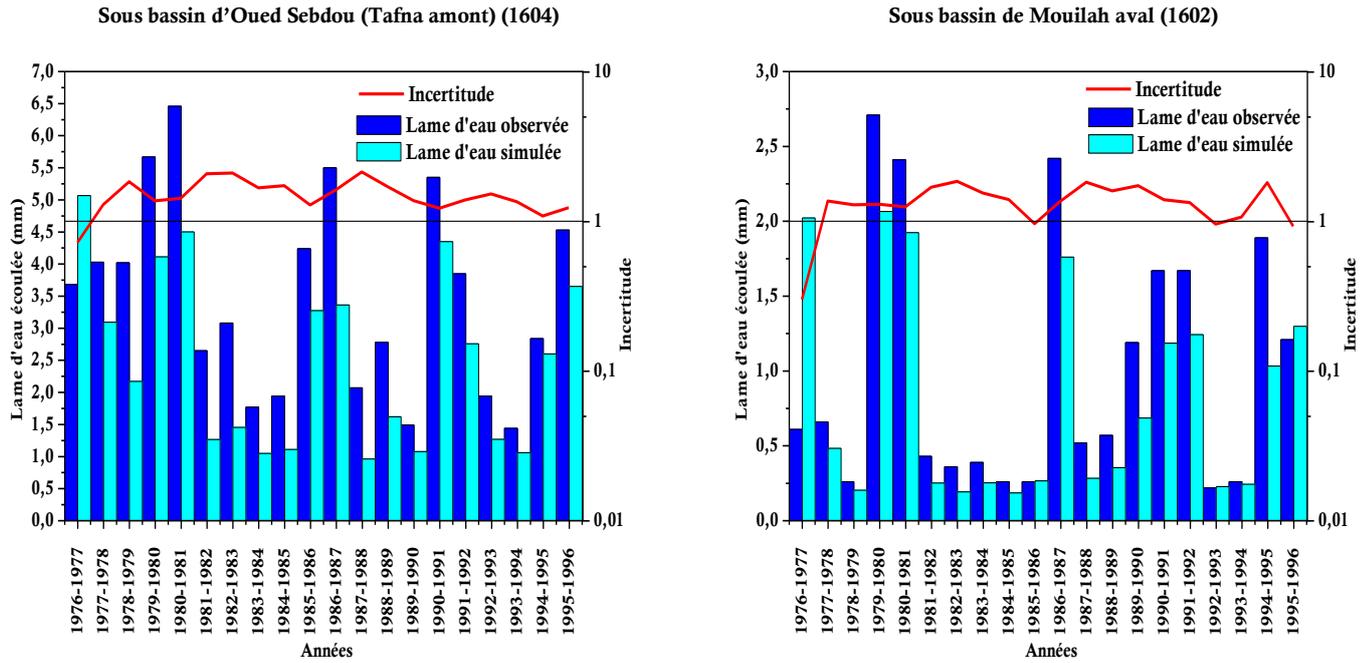


Fig. IV.8. Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de calage aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).

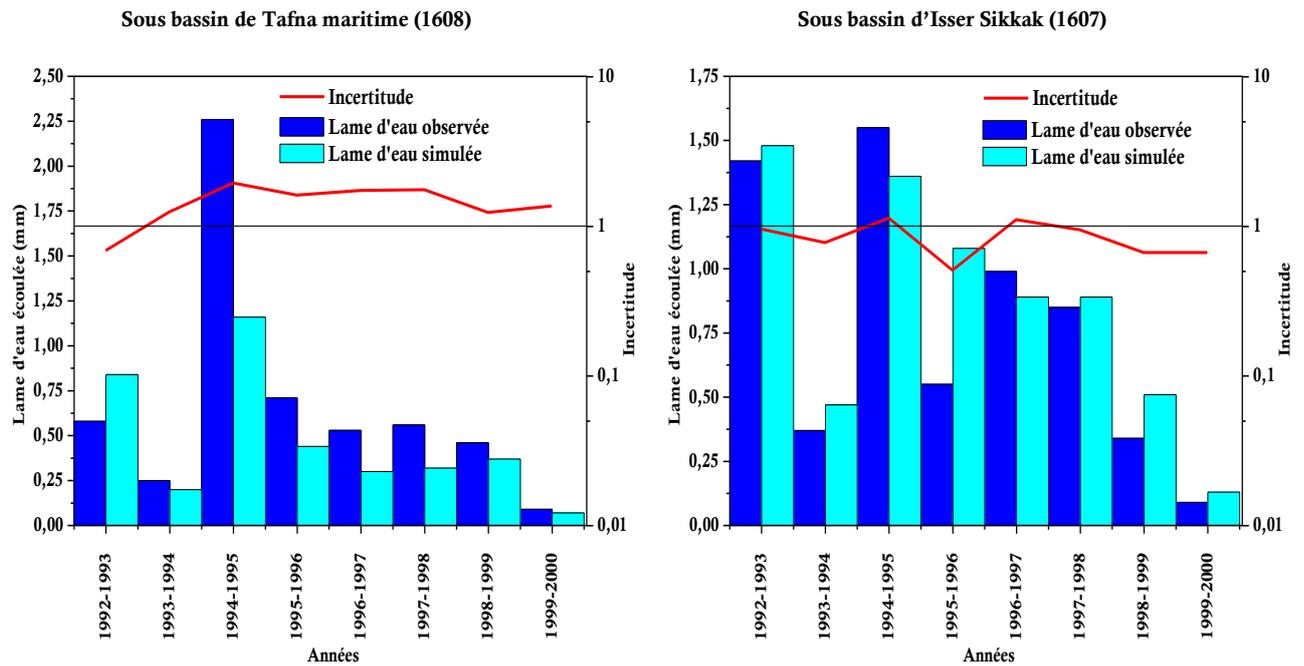


Fig. IV.9. Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de validation aux sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).

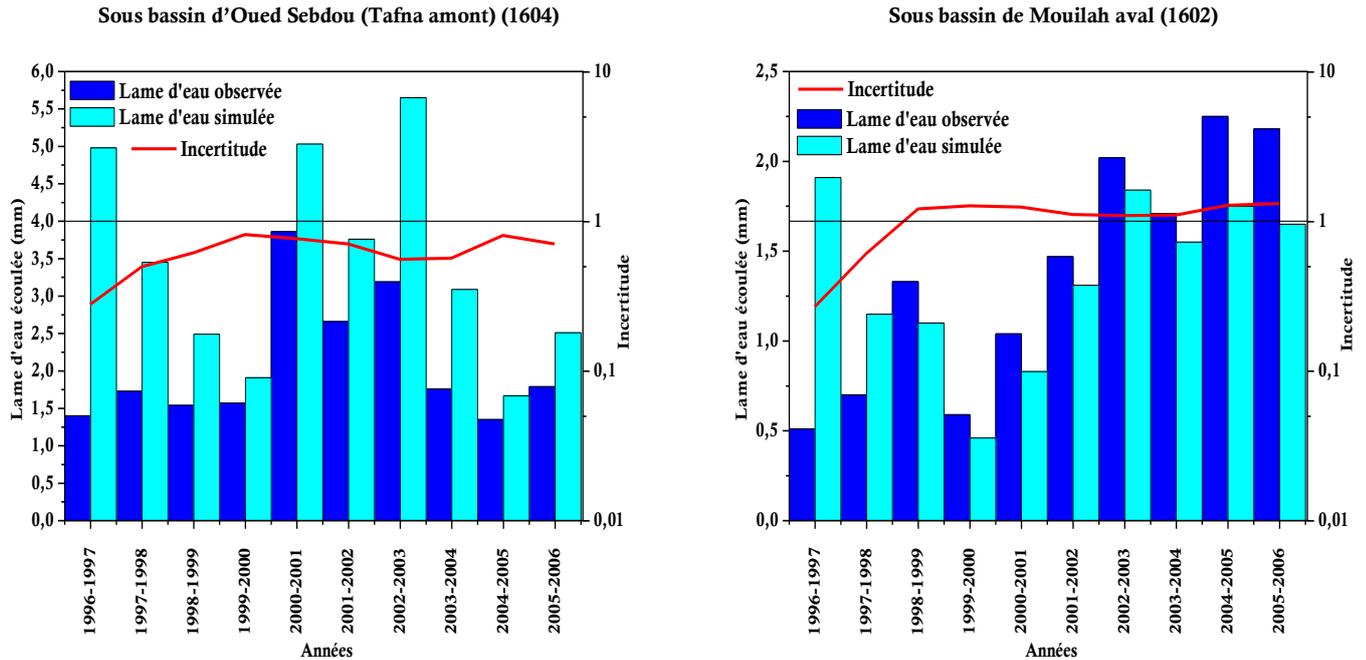


Fig. IV.10. Comparaison entre incertitudes et hydrogrammes (observés et simulés) en phase de validation aux sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).

En phase de validation (Fig. IV.9 et Fig.10), une surestimation des débits simulés pour les valeurs supérieures à la valeur de référence (1) est constatée aux sous bassins versants de Tafna maritime (1608) et de Mouilah aval (1602). Les incertitudes moyennes interannuelles fluctuent entre 0,69 (1992-1993) et 1,95 (1994-1994) au sous bassin versant de Tafna maritime (1608) et entre 0,27 (1996-1997) et 1,32 (2005-2006) au sous bassin versant de Mouilah aval (1602). En revanche, une sous-estimation des débits simulés pour les valeurs inférieures à la valeur de référence (1) est détectée aux sous bassins d'Isser Sikkak (1607) et d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604). Les incertitudes sont bien basses, elles varient entre 0,51 (1995-1996) et 1,14 (1994-1995) au sous bassin d'Isser Sikkak (1607) et entre 0,28 (1996-1997) et 0,82 (1999-2000) au sous bassin d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604).

III. Identification de tendances de la relation pluie-débit des sous bassins

La matrice des simulations croisées (Chapitre I ; section III.6) a été appliquée sur les lames d'eau moyennes annuelles écoulées simulées à partir du modèle GR2M qui a permis de présenter correctement la relation pluie-débit dans les sous bassins du bassin versant de la Tafna. Les périodes constituées, au nombre de 4 (1976-2000) et 5 (1976-2006) sont au pas de 6 ans. Les résultats de cette application sont représentés dans les tableaux IV.8 à IV.11.

Tableau IV.8. Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm).
Sous bassin de Tafna maritime (1608). Période d'étude (1976-2000).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000
1976-1982	30,68	8,01	4,92	5,43
1982-1988	18,60	11,25	6,92	7,91
1988-1994	17,15	8,02	8,43	7,03
1994-2000	14,86	6,83	6,39	11,17

Tableau IV.9. Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm).
Sous bassin d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000
1976-1982	26,19	18,43	14,05	7,23
1982-1988	27,53	17,13	11,44	7,07
1988-1994	27,21	19,32	6,74	5,62
1994-2000	31,26	20,37	9,26	9,83

Tableau IV.10. Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm).
Sous bassin d'Oued Sebou (Tafna amont) (1604). Période d'étude (1976-2006).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000	2000-2006
1976-1982	45,80	25,82	30,28	24,18	28,33
1982-1988	44,67	25,04	24,72	20,75	28,24
1988-1994	38,53	28,83	21,36	25,97	27,32
1994-2000	45,40	30,02	27,89	20,50	28,73
2000-2006	39,82	29,01	23,81	20,94	24,13

Tableau IV.11. Matrice des simulations croisées des lames d'eau écoulées (mm).
Sous bassin de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000	2000-2006
1976-1982	11,12	8,10	11,13	10,23	20,28
1982-1988	8,60	5,72	7,08	7,75	21,91
1988-1994	9,09	6,46	7,88	9,89	18,96
1994-2000	9,16	6,88	8,58	9,27	20,75
2000-2006	9,24	6,61	8,22	9,06	20,26

Les résultats transformés sous forme des matrices de signes, à partir des matrices des simulations normalisées issues des matrices des simulations croisées, sont portés dans les tableaux IV.12 à IV.15. Rappelons que les gains et pertes y sont matérialisés respectivement par des signes « + » et des signes « - ». Etant donné qu'il faut se mettre dans le sens de l'évolution progressive dans le temps du débit moyen annuel, la moitié supérieure à la diagonale de la matrice normalisée a été prise en considération. En outre, l'analyse des tendances sur les matrices de simulation croisées dans les quatre sous bassins a été effectuée d'une façon visuelle, et statistique.

Tableau IV.12. Matrice des signes. Sous bassin de Tafna maritime (1608). Période d'étude (1976-2000).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000
1976-1982	30,68	-	-	-
1982-1988	-	11,25	-	-
1988-1994	-	+	8,43	-
1994-2000	-	+	+	11,17

Tableau IV.13. Matrice des signes. Sous bassin d'Isser Sikkak (1607). Période d'étude (1976-2000).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000
1976-1982	26,19	-	-	-
1982-1988	-	17,13	-	-
1988-1994	-	-	6,74	-
1994-2000	-	-	+	9,83

Tableau IV.14. Matrice des signes. Sous bassin d'Oued Sebou (Tafna amont) (1604). Période d'étude (1976-2006).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000	2000-2006
1976-1982	45,80	-	-	-	-
1982-1988	-	25,04	-	-	+
1988-1994	-	-	21,36	+	+
1994-2000	-	-	-	20,50	+
2000-2006	-	-	+	+	24,13

Tableau IV.15. Matrice des signes. Sous bassin de Mouilah aval (1602). Période d'étude (1976-2006).

	1976-1982	1982-1988	1988-1994	1994-2000	2000-2006
1976-1982	11,12	-	+	-	+
1982-1988	-	5,72	+	+	+
1988-1994	-	+	7,88	+	+
1994-2000	+	+	+	9,27	+
2000-2006	+	+	+	+	20,26

Au niveau du sous bassin de Tafna maritime (1608), un totale de 9 signes négatifs a été enregistré contre 3 signes positifs. Au sous bassin d'Isser Sikkak (1607), un nombre de 11 signes négatifs a été enregistré contre 1 signe positif. Le sous bassin d'Oued Sebou (Tana amont) (1604) enregistre 14 signes négatifs contre 6 signes positifs. Au sous bassin de Mouilah aval (1602) un nombre de 4 signes négatifs a été enregistré contre 16 signes positifs. Il ressort des résultats de l'ensemble des sous bassins étudiées, que les signes négatifs sont majoritaires par rapport aux signes positifs sauf au sous bassin de Mouilah aval (1602).

Les deux périodes d'études (1976-2000 et 1976-2006), marquées par une variabilité hydrométéorologique, l'hypothèse de stationnarité de l'écoulement annuel dans les sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607) et d'Oued Sebou (Tafna amont) (1604) peut être rejetée. Pour le sous bassin de Mouilah aval (1602) cette hypothèse est acceptée. Cette

modification du comportement hydrologique des sous bassins, où la stationnarité est rejetée, diffères d'un sous bassin à un autre suite au caractère physiographique (sols, relief, végétations, etc.). Elle semble plus marquée au niveau du sous bassin d'Isser Sikkak (1607) que les sous de Tana maritime (1608) et d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604).

Pour les sous bassins étudiés durant la période 1976-2000, la valeur du test statistique SDD (Somme des Différences par rapport à la Diagonale) (Fig. IV.11 et Fig. IV.12) est extrêmement faible et se retrouve dans les extrêmes à 5 % de fréquence. Ceci indique une tendance nette à la baisse dans leur comportement hydrologique, ce qui confirme les résultats du premier test pour ces deux sous bassins.

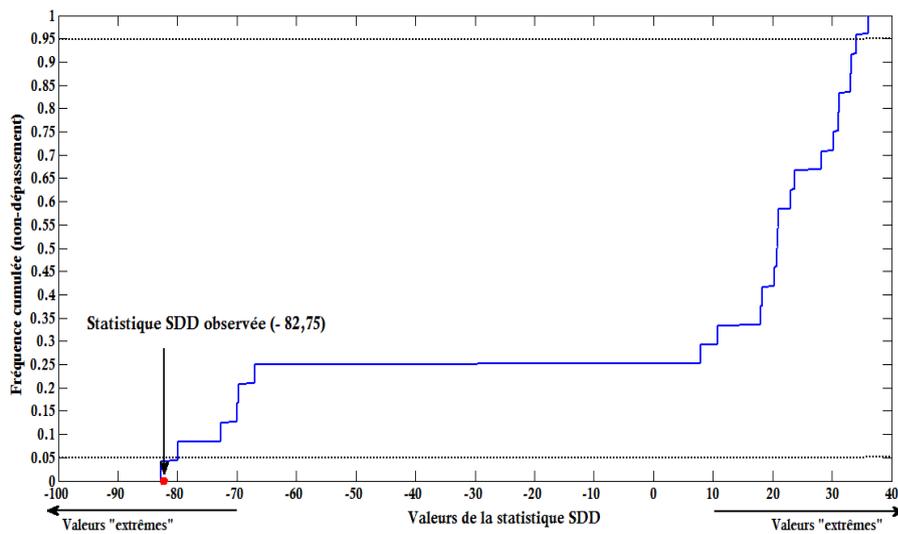


Fig. IV.11. Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD obtenues pour la matrice de sous bassin de Tafna maritime (1608) en appliquant le modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2000).

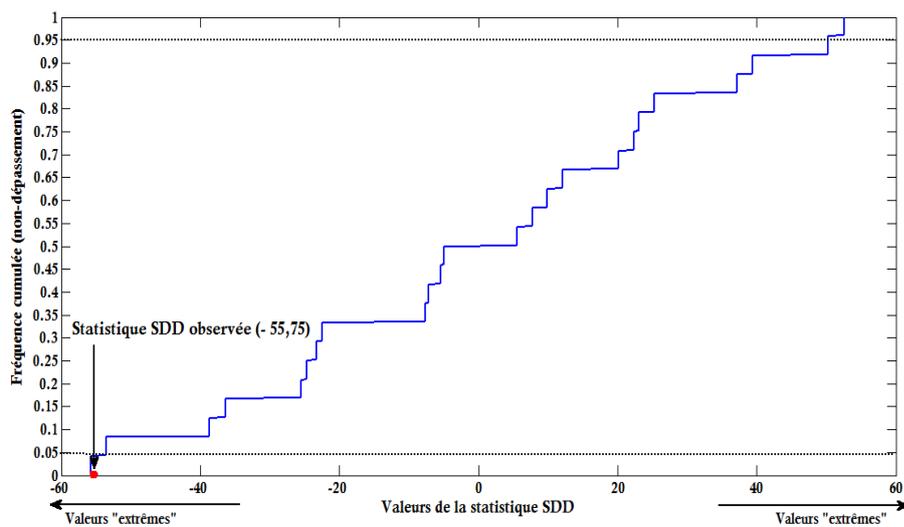


Fig. IV.12. Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD obtenues pour la matrice du sous bassin d'Isser Sikkak (1607) en appliquant le modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2000).

En revanche, pour les sous bassins traités durant la période allant de 1976 à 2006. Les valeurs de SDD (Fig. IV.13 et Fig. IV.14) situées dans les 95 % de fréquence, ce qui ne permet pas de conclure à l'existence d'une tendance dans le comportement hydrologique des sous bassins d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

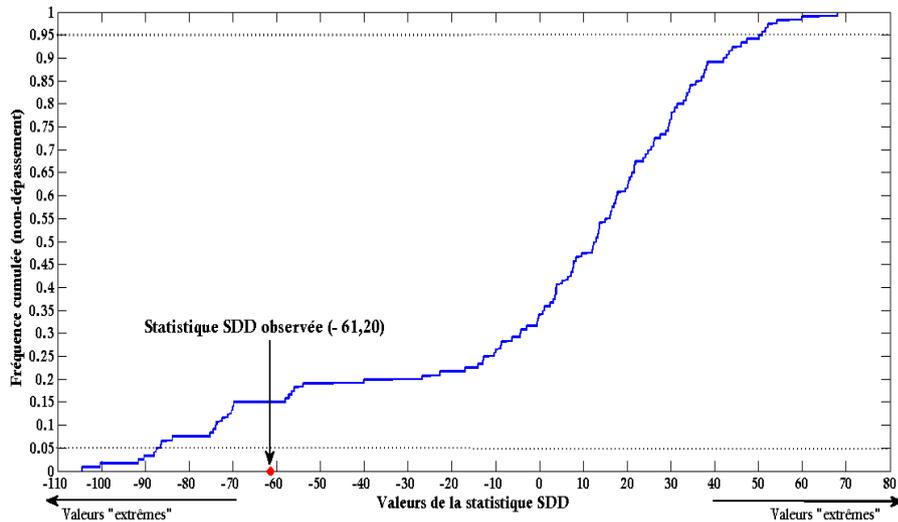


Fig. IV.13. Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD obtenues pour la matrice du sous bassin d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) en appliquant le modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2006).

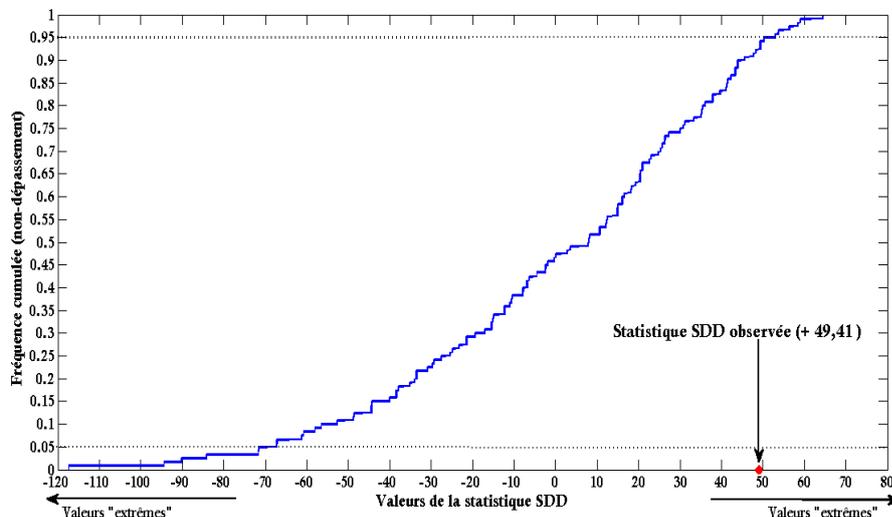


Fig. IV.14. Distribution empirique des valeurs de la statistique SDD obtenues pour la matrice du sous bassin de Mouilah aval (1602) en appliquant le modèle GR2M (les lignes pointillées désignent le domaine des valeurs « extrêmes », à 5 et 95 %). Période d'étude (1976-2006).

En définitive, durant la période d'étude 1976-2000, les deux tests appliqués au modèle GR2M décèlent clairement la non stationnarité du comportement hydrologique des sous bassin de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607). Pour les sous bassins d'Oued Sebdu (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602) analysés durant la période allant de 1976 à 2006, le

test conditionnel fondé sur les permutations des matrices de simulations croisées n'a pas permis de tirer une conclusion adéquate.

IV. Régionalisation du modèle GR2M : Application aux sous bassins de Tafna maritime, d'Isser Sikkak, d'Oued Sebdou (Tafna amont) et de Mouilah aval

IV.1 Analyse de l'échantillon des paramètres

La première étape d'analyse vise à vérifier l'indépendance des paramètres transformés X_1 et X_2 du modèle GR2M. Le tableau IV.16 résume les résultats de calcul de la matrice de corrélation.

Tableau IV.16. Matrice de corrélation entre paramètres

	Ln (X_1)	Ln (X_2)
Ln (X_1)	1	
Ln (X_2)	0,90	1

Dans notre cas, la matrice de corrélation montre que les paramètres transformés X_1 et X_2 sont fortement corrélés (90%).

IV.2 Choix et analyse de variables explicatives

Pour caractériser le fonctionnement des sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602), nous avons choisi des caractéristiques climatiques simples, calculées à partir de séries des données utilisées par le modèle GR2M. Trois variables quantitatives ont ainsi été sélectionnées, auxquelles a été ajoutée la superficie, seule variable descriptive physique, des sous bassins versants utilisés. Ainsi, les quatre variables explicatives choisies sont :

- SUP : la superficie du sous bassin en (Km^2) ;
- PMA : la pluie moyenne annuelle en (mm) ;
- ETPMA : l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle ETP (mm) ;
- COEIP : le coefficient d'irrégularité saisonnière des pluies CIP (%), défini par :

$$\text{CIP} = \frac{P_{mp} - P_{mm}}{P_m} \dots \dots \dots \text{(IV.1)}$$

Avec ;

P_{mp} : pluie moyenne mensuelle du mois le plus pluvieux en (mm) ;

P_{mm} : pluie moyenne mensuelle du mois le moins pluvieux (mm) ;

P_m : pluie moyenne mensuelle (mm).

Les différents variables explicatives des quatre sous bassins sont représentées dans le tableau (IV.17).

Tableau IV.17. Variables explicatives des sous bassins de Tafna maritime (1608), d'Isser Sikkak (1607), d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602).

Code	Sous bassin	SUP (Km ²)	PMA (mm)	ETPMA (mm)	CIP (%)
1608	Tafna maritime	392	293,03	884,73	175,57
1607	Isser Sikkak	825	453,44	873,32	176,53
1604	Oued Sebdou (Tafna amont)	256	383,73	904,03	180,27
1602	Mouilah aval (côté algérien)	294	310,45	874,68	146,82

En utilisant ces groupes de variables, nous faisons ainsi intervenir à la fois les conditions climatiques et la surface qui caractérise la réponse du sous bassin.

Dans la suite de l'analyse, nous avons parfois utilisé dans la recherche de relations entre les paramètres du modèle et les variables explicatives, des variables composites issues de plusieurs des variables précédentes, comme par exemple :

- le rapport de la pluie moyenne PMA à l'ETP moyenne ETPMA ;
- le produit du coefficient d'irrégularité CIP par la variable PMA ;
- le produit de CIP et PMA divisé par la variable ETPMA.

En outre, la matrice de corrélation dressé entre les variables explicatives (tableau IV.18) montre qu'une dépendance assez élevé à élevé est enregistrée entre les différentes variables sauf pour la variable ETPMA de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle qui présente un coefficient de corrélation très faible (-4%) avec la pluie moyenne annuelle PMA.

Tableau IV.18. Matrice de corrélation entre variables explicatives.

	SUP	PMA	ETPMA	CIP
SUP	1			
PMA	0,73	1		
ETPMA	-0,57	-0,04	1	
CIP	0,31	0,48	0,54	1

IV.3 Recherche de relations entre paramètres du modèle et variables explicatives

En appliquant la méthode de régression linéaire multiple, fondé sur le modèle linéaire général en utilisant comme outil de calcul l'Excel, nous avons pu établir les relations résumées ci-dessous entre les transformés logarithmiques des paramètres du modèle et les variables explicatives choisis. Les paramètres sont optimisés de manière à maximiser le coefficient de détermination (carré du coefficient de corrélation de la relation linéaire). La qualité de

l'ajustement peut être aussi évaluée par l'erreur standard. La significativité de la relation peut être estimée par le coefficient de Fisher qui fixe les minima acceptables pour le coefficient de détermination.

IV.4 Régressions sur les paramètres transformés

Nous avons retenu les équations de prédétermination, des paramètres X_1 et X_2 transformés (en logarithmes), qui présentent un ajustement significatif, avec un seuil de significativité jugé satisfaisant d'après les valeurs de la variable de Fisher.

IV.4.1 Paramètre X_1

Le tableau IV.19 récapitule les relations entre le paramètre $\ln X_1$ et les variables explicatives. En outre, le tableau IV.20 présente le résultat d'analyse de la variance et test de significativité correspondant.

Tableau. IV.19. Relations entre paramètre transformé $\ln X_1$ et variables explicatives.

N°	Paramètre	Formule de régression	Coefficients de régression	Coefficient de détermination
01	$\ln X_1$	a_0	0	0,10
		$a_1 \ln\left(\frac{\text{SUP}}{\text{PMA}}\right)$	1,43	
02	$\ln X_1$	a_0	-5,97	0,97
		$a_1 \ln(\text{SUP})$	0,14	
		$a_2 \ln(\text{CIP})$	1,34	
03	$\ln X_1$	a_0	0,52	0,45
		$a_1 \ln(\text{SUP})$	0,19	
		$a_2 \ln\left(\frac{\text{PMA}}{\text{ETPMA}}\right)$	0,21	
04	$\ln X_1$	a_0	-0,12	0,45
		$a_1 \ln(\text{SUP})$	0,18	
		$a_2 \ln(\text{PMA})$	0,13	

Tableau. IV.20. Analyse de la variance et test de significativité correspondant.

N°	Régression			
	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
01	1,24	1,24	0,34	0,62
02	0,08	0,04	17,20	0,17
03	0,04	0,02	0,40	0,74
04	0,04	0,02	0,42	0,74
Résidu				
	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
01	10,89	3,63	--	--
02	0,0024	0,0024	--	--
03	0,05	0,05	--	--
04	0,05	0,05	--	--
Total				
	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
01	12,14	--	--	--
02	0,08	--	--	--
03	0,09	--	--	--
04	0,09	--	--	--

Parmi ces relations proposées au tableau IV.19 pour le paramètre $\ln X_1$, celle avec SUP et CIP semble la plus satisfaisante parmi les formules les plus simples :

$$\ln X_1 = - 5,97 + 0,14 \ln(\text{SUP}) + 1,34 \ln(\text{CIP}) \dots \dots \dots \text{(IV.2)}$$

$$\text{Soit, } X_1 = \frac{\text{SUP}^{0,14} \cdot \text{CIP}^{1,34}}{391,51} \dots \dots \dots \text{(IV.3)}$$

La signification du coefficient de régression est acceptée à une probabilité égale à 0,17 (Tableau IV.20) ; c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une faible chance (17 chances sur 100) pour que la corrélation observée ne soit due qu'au hasard de l'échantillonnage. En effet, en comparant la valeur observée de F, donnée dans le tableau IV.20, avec la valeur théorique $F_{1-\alpha}$ relative à la distribution de Fisher-Snedecor à 1 et 3 degrés de liberté ; $F_{\text{calculé}}=17,20$ nettement supérieure à $F_{0,95}= 10,13$.

IV.4.2 Paramètre X_2

Le tableau IV.21 récapitule les relations entre le paramètre $\ln X_2$ et les variables explicatives. En outre, le tableau IV.22 présente le résultat d'analyse de la variance et test de significativité correspondant.

Tableau. IV.21. Relations entre paramètre transformé $\ln X_2$ et variables explicatives.

N°	Paramètre	Formule de régression	Coefficients de régression	Coefficient de détermination
01	$\ln X_2$	a_0	-16,11	0,96
		$a_1 \ln(\text{PMA})$	-0,53	
		$a_2 \ln(\text{CIP})$	3,67	
02	$\ln X_2$	a_0	-19,26	0,95
		$a_1 \ln\left(\frac{\text{PMA}}{\text{ETPMA}}\right)$	-0,49	
		$a_2 \ln(\text{CIP})$	3,59	
03	$\ln X_2$	a_0	-7,00	0,24
		$a_1 \ln(\text{PMA. CIP})$	0,60	
04	$\ln X_2$	a_0	-2,14	0,03
		$a_1 \ln(\text{PMA})$	0,30	
05	$\ln X_2$	a_0	-16,51	0,87
		$a_1 \ln(\text{CIP})$	3,14	

Tableau. IV.22. Analyse de la variance et test de significativité correspondant.

	Régression			
	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
01	0,30	0,15	12,37	0,20
02	0,29	0,15	10,10	0,22
03	0,07	0,07	0,62	0,51
04	0,01	0,01	0,07	0,81
05	0,27	0,27	13,98	0,06
	Résidu			
	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
01	0,01	0,01	--	--
02	0,01	0,01	--	--
03	0,23	0,12	--	--
04	0,30	0,15	--	--
05	0,04	0,02	--	--
	Total			
	Somme des carrés	Carré moyen	F	Signification
01	0,31	--	--	--
02	0,31	--	--	--
03	0,31	--	--	--
04	0,31	--	--	--
05	0,31	--	--	--

Parmi les relations proposées au tableau IV.21 pour le paramètre $\ln X_2$, celle avec CIP semble la plus satisfaisante parmi les formules les plus simples :

$$\ln X_2 = -16,51 + 3,14 \ln(\text{CIP}) \dots \dots \dots \text{(IV.4)}$$

$$\text{Soit, } X_2 = \frac{\text{CIP}^{3,14}}{14797961,61} \dots \dots \dots \text{(IV.5)}$$

La signification du coefficient de régression est acceptée à une probabilité égale à 0,06 (Tableau IV.22) ; c'est à dire qu'il n'y a qu'une faible chance (6 chances sur 100) pour que la corrélation observée ne soit due qu'au hasard de l'échantillonnage. En effet, en comparant la valeur observée de F, donnée dans le tableau IV.22, avec la valeur théorique $F_{1-\alpha}$ relative à la distribution de Fisher-Snedecor à 1 et 3 degrés de liberté ; $F_{\text{calculé}} = 13,98$ nettement supérieure à $F_{0,95} = 10,13$.

IV.4.3 Vérification directe

Le test réalisé à l'étape 5 (Chapitre I, section III.7) de l'approche de régionalisation suscitée, c'est-à-dire à la simulation des débits sur les bassins de l'échantillon en utilisant les équations de prédétermination.

Les résultats obtenus suite au calcul du critère de Nash-Sutcliffe en calage et en validation, en introduisant les paramètres calculés par les équations de prédétermination, sont résumés dans les tableaux IV.23 et IV.24 pour tous les bassins étudiés

Tableau IV.23. Comparaison des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe pour les paramètres calés et calculés. Phase calage.

Calage	Calés			Calculés		
	X ₁	X ₂	Nash (%)	X ₁	X ₂	Nash (%)
1608	6,20	0,88	70,3	6,00	0,75	71,2
1607	6,55	0,72	80,5	6,70	0,77	80,7
1604	5,69	0,74	76,6	5,85	0,82	74,8
1602	4,49	0,42	76,7	4,53	0,43	72,6

Tableau IV.24. Comparaison des valeurs du critère de Nash-Sutcliffe pour les paramètres calés et calculés. Phase validation.

Validation	Calés			Calculés		
	X ₁	X ₂	Nash (%)	X ₁	X ₂	Nash (%)
1608	6,00	0,87	74,4	6,00	0,75	73,7
1607	6,48	0,68	88,5	6,70	0,77	78,5
1604	4,00	0,55	77,8	5,85	0,82	78,7
1602	2,98	0,39	74	4,53	0,43	70

D'après ces tableaux, les régressions multiples ont donné des meilleurs résultats en calage qu'en validation, du fait que les valeurs de Nash obtenues par les paramètres calculés sont très proches de celles obtenues par les paramètres calés du modèle. Nous remarquons aussi que les valeurs des paramètres du modèle X₁ et X₂ calés et calculés sont généralement proches.

Il faut juste mentionner que la bonne corrélation entre les paramètres X_1 et X_2 du modèle consigné dans le tableau IV.16 ce n'est pas forcément nécessaire pour établir une régionalisation du modèle. En 2006, Charifi dans son étude de régionalisation du modèle GR2M sur les bassins versants de Soummam et d'Isser a obtenu des résultats satisfaisants avec des paramètres X_1 et X_2 largement indépendants ($R = -0,1$).

IV.4.4 Simulation des débits dans le bassin versant non ou mal jaugé

Après cette étape de vérification sur les bassins jaugés, nous avons procédé à l'application sur les sous bassins non ou mal jaugés. Pour ce faire, nous avons considéré, selon la disponibilité des données, le sous bassin de Boukiou (1605) comme un sous bassin mal jaugé. Une régionalisation du modèle GR2M a été effectuée par le calcul des paramètres du modèle et les variables explicatives de ce sous bassin en utilisant les équations de régression :

$$X_1 = \frac{SUP^{0,14} \cdot CIP^{1,34}}{391,51} \quad (IV.3) \quad \text{Et} \quad X_2 = \frac{CIP^{3,14}}{14797961,61} \quad (IV.5)$$

Le résultat de calcul est représenté dans le tableau IV.25.

Tableau IV.25. Détermination des paramètres explicatifs et calculés du modèle GR2M. Sous bassin de Boukiou (1605).

	Paramètres explicatifs		Paramètres du modèle Calculés		
	SUP (Km ²)	CIP (%)	X ₁	X ₂	Nash (%)
1605	978	175,11	6,79	0,75	81,1

Le résultat de calcul en utilisant les équations de régression (IV.3 et IV.5) est jaugé satisfaisant vu que la valeur du critère de Nash-Sutcliffe obtenue est supérieure à 60%.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons essayé d'appliquer des méthodes permettant de détecter une non-stationnarité dans le comportement hydrologique des sous bassins du bassin versant de la Tafna. Mais avant de procéder à cette application, une étude de robustesse et de performance du modèle GR2M à travers l'analyse des critères d'optimisation de Nash-Sutcliffe appliqués aux écoulements moyens des sous bassins du bassin de la Tafna a été effectuée. Cette étude a démontré que le modèle GR2M est apte à simuler les écoulements des sous bassins traités au pas de temps mensuel.

L'utilisation du GR2M pour modéliser l'écoulement moyen dans les sous bassins a prouvé l'efficacité du modèle à mettre en évidence des tendances hydrologiques. Cependant, on ne doit pas ignorer les limites des résultats obtenus par le test conditionnel fondé sur les permutations

vues que ce dernier n'a pas pu mettre en évidence une tendance dans les sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et de Mouilah aval (1602). La tendance détectée dans le comportement hydrologique des sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607) peut être probablement due à l'impact des changements climatiques et/ou à la dynamique des états des surfaces.

La régionalisation du modèle hydrologique GR2M par la détermination des équations de prédétermination des paramètres de ce dernier en faisant appel à la méthode de régression linéaire en exploitant des informations contenues dans des descripteurs des sous bassins a donné des résultats satisfaisants pour ces sous bassins du bassin versant de la Tafna.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

*« Ce qui fait l'homme de science, ce n'est pas la possession de connaissances, d'irréfutables vérités, mais la
quête obstinée et audacieusement critique de la vérité »*

Karl Popper, *La logique de la découverte scientifique* (1973)

En hydrologie, la modélisation et la régionalisation de la relation pluie-débit sont des disciplines qui s'intéressent à la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit. Cette étude est orientée dans le contexte et porte sur l'étude « du bassin versant de la Tafna ». Ce bassin, connu pour ses potentialités en ressources en eau superficielles et souterraines importantes, a longtemps été considéré comme étant le principal château d'eau de toute la région hydrographique de l'Oranie. Suite à une recherche bibliographique, le choix s'est porté sur le modèle conceptuel GR2M et la régionalisation par des procédures du type régressif.

L'étude de la variabilité pluviométrique du bassin versant de la Tafna, a montré une période sèche instaurée au milieu des années 1970 qui s'intensifié durant les années 1980, un déficit pluviométrique atteignant une valeur moyenne de 38,11 % durant la période allant de 1941 à 2006 et des fluctuations entre 26,74% et 31,79% durant la période d'étude 1970-2010. Sur les neuf stations utilisées pour l'étude de la variabilité pluviométrie du bassin, six stations ont connu une brutale baisse pluviométrique à partir de la période 1981 jusqu'à 1988. Cette période est marquée par une sévère phase de sécheresse sur le bassin.

La sécheresse aurait pour conséquence, outre une diminution des totaux mensuels, la contraction de la saison des pluies. En effet, cette tendance à la baisse détectée suite à une rupture de stationnarité à l'échelle de l'année sur l'ensemble des stations n'est qu'une répercussion suite à des tendances à la baisse saisonnière hivernale et printanière. En hiver, le

mois de décembre était le plus affecté avec un déficit moyen de 52,47% durant la période 1941-2006 et de 49,43% pour la période 1970-2010. Au printemps, le mois d'avril est distingué par un déficit moyen de 51,57 % pour la période 1941-2006 et 59,87% durant la période 1970-2010.

La baisse pluviométrique a eu un effet de diminuer les apports d'eau des sous bassins du bassin versant de la Tafna. Cette diminution est marquée par une rupture de stationnarité très significative décelée au milieu des années 1970 pour les séries hydrométriques allant de 1912 à 2000 et au milieu des années 1980 pour la station hydrométrique de Béni-Bahdel durant la période 1973-2009. Le déficit hydrométrique moyen est de 69,1% estimé sur la période 1912-2000 et il dépasse 53% pour la station de Béni-Bahdel durant la période 1973-2009. A l'échelle de la saison, une rupture de stationnarité a été mise en évidence sur les quatre saisons. Par ailleurs, les résultats d'analyse de la variabilité hydrométrique montrent que les années trente et soixante-dix se distinguent comme une phase excédentaire sur le bassin versant de la Tafna. En revanche, ce dernier connaît une période d'étiage durant les années 1990 et le début des années 2000.

La corrélation pluie/débit présente sur l'ensemble des sous bassins du bassin versant de la Tafna des valeurs élevées ce qui montre que la pluie est le premier déterminant de l'écoulement dans le bassin donnant ainsi des années hydrologiques relativement indépendantes avec une différenciation du temps de réponse pour les quatre sous bassins due à la formation géologique de ces derniers.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus avec le modèle GR2M sont satisfaisants. Les performances du critère de Nash sont généralement supérieures à 70% en calage et en validation, atteignant parfois 88,5%. GR2M est un modèle performant et robuste et représente de façon assez satisfaisante la relation entre la pluie moyenne mensuelle estimée sur chaque sous bassin versant. GR2M allie donc parcimonie (un faible nombre de paramètres rendant leur optimisation facile) et robustesse.

Dans les sous bassins de Tafna maritime (1608) et d'Isser Sikkak (1607), les modèles ont identifié une tendance nette à la baisse du système hydrologique. Toutefois, on ne doit pas toutefois ignorer les limites des résultats obtenus puisque le test conditionnel fondé sur les permutations n'a pas pu identifier avec les modèles, une tendance dans les sous bassins d'Oued Sebdou (Tafna amont) (1604) et Mouilah aval (1602).

La régionalisation des paramètres de calage du modèle GR2M en utilisant l'information contenue dans les descripteurs des sous bassins étudiés et en faisant appel à la méthode de régression linéaire a donné des résultats satisfaisants.

Au terme de cette étude, les résultats trouvés restent à compléter. Cependant, le problème de disponibilité de données hydrométéorologiques pour les autres sous bassins a fait qu'ils n'ont pas été intégrés dans l'étude. Ce manque n'a pas permis aussi d'aboutir à une bonne représentation spatiale de nos résultats. Nous avons souhaité estimer le bilan hydrologique afin de vérifier l'influence de la variabilité climatique sur ce dernier mais le manque des données reste un obstacle pour approfondir notre étude.

En résumé, cette étude de modélisation et de régionalisation de la relation pluie- débit dans un contexte du changement climatique et de son impact sur les ressources en eau du bassin versant de la Tafna ouvrent plusieurs perspectives :

- L'étude des états de surface pourra permettre de mieux cerner l'impact des caractéristiques physiques dans le fonctionnement hydrologique du bassin ;
- Le couplage entre les modèles climatiques et les modèles hydrologiques pour une prévision future des conséquences du changement climatique ;
- La quantification du potentiel de recharge des nappes du bassin versant de la Tafna et l'étude sa contribution et sa variation sur les ressources en eau.

La force de vaincre se trouve dans la déception qu'on ressent là où ne s'attendait pas

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C, Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J.,** 1986. An Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- ABH de la Moulouya (Agence du Bassin hydraulique de la Moulouya, Royaume du Maroc),** 2010. *Atlas des sites inondables de la ville d'Oujda Ouest.*
- ABHOCC.,** 2006. *Inventaire des ressources en eau et en sols et des infrastructures de mobilisation.* Cadastre hydraulique Bassin Tafna. Mission I.
- ABHOCC.,** 2012. *Donnée de base en eau de la région.*
- Achite, M., Mansour, H., Toubal, A., Amrani, C.,** 2014. Etude de la variabilité climatique dans le nord-ouest algérien (Bassin de l'oued Mina) : approche statistique. *International Journal of Environment & Water*, 3(1), 116-122.
- Adjim, H.,** 2004. *Evaluation et affectation des ressources hydriques superficielles du bassin versant de la Tafna.* Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Aimé, S., Remaoun, K.,** 1988. Variabilité climatique et steppisation dans le bassin de la Tafna (Oranie occidentale). *Méditerranée*, 63(1), 43-51.
- Aït-Mesbah, S.,** 2012. *Analyse du comportement hydrologique du bassin versant de l'Orgeval : tendance sur les cinquante dernières années.* Mémoire de Master 2. Université Pierre et Marie Curie. Ecole des Mines de Paris & ENGREF.
- Al-Ahmadi, F.S.,** 2005. *Rainfall-runoff modeling in arid regions using geographic information systems and remote sensing: case study; western region of Saudi Arabia.* Thèse de Doctorat. Université du Roi Abdul-Aziz.
- Ambroise, B.,** 1998. *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles,* Ed., HGA, Bucarest.
- Ambroise, B.,** 1999. Genèse des débits – 2. Modélisation. *Revue des Sciences de l'eau*, 12(1), 123-153.
- Amiar, S.,** 2014, *Modélisation pluie-débit : Outil de prévision des crues le mieux adapté par le modèle hydrologique GR.* Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- ANAT.,** 2009. *Actualisation du plan d'aménagement de la wilaya de Tlemcen (bilan de la situation actuelle et problématique d'aménagement).* Direction Régionale Ouest Tlemcen.
- Anctil, F., Rousselle, J., Lauzon, N.,** 2005. *Hydrologie : cheminements de l'eau.* Ed., Presses Internationales Polytechnique.
- Andersson, L.,** 1992. Improvements of ruff models – What's way to go? *Nordic Hydrology*, 23(5), 315-332.
- Andréassian, V.,** 2002. *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants.* Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie Paris VI. CEMAGREF.

- Andréassian, V., Parent, E., Michel, C.,** 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water resources research*, 39(9), 1252. doi:10.1029/2003WR002081
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C.,** 2004. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 286, 19-35.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., Lavabre, J.,** 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250, 206-223.
- Andrews, F.T., Croke, B.F.W., Jakeman, A.J.,** 2011. An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1171-1185.
- ANRH.,** 2016. *Historique du réseau hydrographique des bassins versants de la Tafna*. Rapport, ANRH.
- Archfield, S.A., Vogel, R.M.,** 2010. Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungauged catchments. *Water Resources Research*, 46, W10513. doi : 10.1029/2009WR008481
- Ardoin-Bardin, S.,** 2004. *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc.
- Arheimer, B.,** 2005. Evaluation of water quantity and quality modelling in ungauged European basins. Predictions in Ungauged Basins: Predictions in Ungauged Basins: *Promise and Progress (Proceeding of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil)*. IAHS Publication, 303, 99-107.
- Azzaz, H., Cherchali, M., Meddi, M., Houha, B., Puig, J.M., Achachi, A.,** 2008. The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen mountains, northwest Algeria. *Hydrogeology Journal*, 16, 531-546.
- Azzi, A.,** 2013. *Analyse de changements climatiques dans le bassin versant de la Soummam : Réflexion en termes de conséquences hydrologiques*. Mémoire de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Alger.
- Baahmed, D.,** 2015. *Bilan hydrique et évaluation des ressources en eau superficielle du bassin de la Macta*. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- Baba Hamed, K., Bouanani, A., Terfous, A., Bekkouche, A.,** 2005. Modèle transitoire de la nappe des alluvions de la plaine d'Hennaya (Tlemcen, NW-Algérie). *Le journal de l'eau et de l'environnement. Revue Semestrielle Scientifique et Technique*, 7-17.
- Bakreti, A.,** 2014. *Modélisation hydrologique du bassin de la Tafna*. Thèse de Doctorat. Université d'Oran Es Sénia.
- Banks, J.,** 1998. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications and practice*. New York: Wiley Interscience.
- BAPE.,** 2000. L'eau, ressource à protéger, à partager et à mettre en valeur. Rapport de la Commission sur la gestion de l'eau au Québec. Disponible sur : www.bape.gouv.qc.ca/eau
- Bastidas, L.A., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Shuttleworth, W.J., Yang, Z.L.,** 1999. Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods. *Journal of Geophysical Research*, 104(D16), 19,481-19,490.
- Bates, B.,** 1994. *Regionalisation of hydrologic data: a review - a report as part of project D 2: Regionalisation and scaling hydrologic data*. Report 94/5. Tech. Rep., Cooperative Research Centre for catchment hydrology.

- Bayle, E., Ville, L.,** 1854. Notice géologique sur les environs d'Oran et d'Alger. Présence de terrains de transition, Jurassique, Crétacé, nummulitique, Tertiaire, Quaternaire et Alluvions. *Bulletin Servervice Géologique*, 11.
- Belarbi, H., Touaibia, B., Boumechra, N., Abdelbaki, C.,** 2016. Persistance de la sécheresse pluviométrique au niveau de la Tafna. *Le 5ème Colloque International du réseau « Eaux & Climats » Changements globaux et ressources en eau : Etat des lieux. Adaptations et perspectives Fès, 12-13 Octobre.*
- Belarbi, H., Touaibia, B., Boumechra, N., Amiar, S., Baghli, N.,** 2017. Sécheresse et modification de la relation pluie-débit : Cas du bassin versant de l'Oued Sebdou (Algérie Occidentale). *Journal des Sciences Hydrologiques*, 62(1), 124-136. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1112394>
- Benaini, B., Dakiche, A., Mansour, H., Prével, C., Ras El Oued, O., Tallou, G.,**2012. *Gestion intégrée et participative des eaux dans un bassin transfrontalier à l'aide d'un SIG : le cas de la Tafna.* Rapport général du projet PNR.
- Benest, M.,** 1985. *Evolution de la plate forme de l'ouest algérien et du nord-est marocain au cours du Jurassique supérieur et du début du Crétacé : Stratigraphie, milieu de dépôt et dynamique sédimentaire.* Thèse Doctorat. Université de Lyon.
- Benest, M., Bensalah, M.,** 1995. L'Eocène continental dans l'avant-pays alpin d'Algérie : environnement et importance de la tectogenèse atlasique polyphasée. *Bulletin Service Géologique*, 6(1), 41-59.
- Benest, M., Bensalah, M., Bouabdellah, H., Ouardast, T.,** 1999. La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine Tlemcénien (Avant pays Tellien d'Algérie occidentale): Stratigraphie, paléoenvironnement, dynamique sédimentaire et tecto-genèse alpine. *Bulletin du service géologique*, 10(2).
- Benikhlef, A.,** 2008. *Contribution à l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources hydriques (cas du bassin versant de la Tafna).* Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Bensaoula, F., Adjim, M.,** 2008. La mobilisation des ressources en eau : contexte climatique et contraintes socio-économiques (cas de la wilaya de Tlemcen). *Larhyss Journal*, 7, 79-92.
- Bergström, S.,** 1991. Principles and Confidence in Hydrological Modelling. *Nordic hydrology*, 22, 123-136.
- Bergström, S.,** 2006. Experience from applications of the HBV hydrological model from the perspective of prediction in ungauged basins. *Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the model parameter experiment—MOPEX. IAHS Publication*, 307, 97-107.
- Bernard, C.,** 1865, *Introd, ét, exp, Méd.*
- Berthier, C.H.,** 2005. *Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit empirique.* Mémoire de DEA. CEMAGREF.
- Bessiere, H.,** 2008. *Assimilation de données variationnelle pour la modélisation hydrologique distribuée des crues à cinétique rapide.* Thèse de Doctorat. Université de Toulouse. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Beven, K. J.,** 1989. Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- Beven, K.J.,** 2001. *In Rainfall-Runoff modeling the Primer.* John Wileys & Sons. Ltd.
- Blazkova, S., Beven, K.,** 2002. Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). *Water Resources Research*, 38(8), 1139. 10.1029/2001WR000500

- Blöschl, G.**, 2005. *Rainfall-Runoff Modeling of Ungauged Catchments*. Ed. Anderson, M, G, Encyclopedia of Hydrological Sciences.
- Bodian, A.**, 2011. *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal*. Thèse de Doctorat. Université Cheikh Anta Diop De Dakar.
- Bois, P.**, 1971. *Une méthode de contrôle de séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie*. Publication du Laboratoire de Mécanique des Fluides. Université de Grenoble I.
- Bois, P.**, 1976. *Contribution à l'analyse et à la prévision de variables hydrométéorologiques. Applications à la prévision des débits du Niger et des avalanches à Davos*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Bois, P.**, 1986. *Contrôle de séries chronologiques corrélées par l'étude du cumul des résidus de la corrélation*. 2^{ème} journées Hydrologiques d'ORSTOM. Montpellier, 89-98.
- Bois, P., Obled, C., Zin, I.**, 2007. *Introduction au traitement de données en hydrologie*. Éd. du Millénaire.
- Bonitzer, J.**, 1993. *Les chemins de la science-questions d'épistémologie*. Ed. Sociales. Paris.
- Bouabdallah, H.**, 1991. *Dégradation du couvert végétal steppique de la zone sud-ouest oranaise (le cas d'El-Aricha)*. Mémoire de Magister. Université d'Oran.
- Bouanani, A.**, 2004. *Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie)*. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen.
- Bouanani, A., Baba-Hamad, K., Bouanani, R.**, 2011. Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : Cas du bassin de la Haute Tafna. *Revue scientifique et Technique. LJEE*, N°18, 46-58.
- Bouanani, R.**, 2010. *Modélisation de la fonction pluie-débit, Application au bassin versant de la Tafna (NW-Algérien)*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Boudy, P.**, 1950. *Economie forestière nord-africaine. Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie*. Ed. Larose. Paris.
- Bouguerra, S., Bouanani, A.**, 2016. Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique : Cas du bassin versant oued Boukiou (nord ouest de l'Algérie). *Étude et Gestion des Sols*, 23, 91-100.
- Bouklikha, A.**, 2011. *Répartition du macrobenthos des Oueds du bassin versant de la Tafna. Application à l'occupation des micro-habitats des cours d'eau*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Bouragba, N.**, 2006. *Modélisation et simulation des changements climatiques*. Mémoire de Magister. Centre Universitaire de Mascara.
- Boursali, I.**, 2016. *Application de la fonction pluie-débit au bassin versant de la TAFNA : Cas de l'oued Khemis-Tlemcen (NW Algérien)*. Mémoire de Magister. Université de Mascara.
- Burn, D.H.**, 1988. Delineation of groups for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 104, 345.
- Burn, D.H., Boorman, D.B.**, 1993. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 143, 429–454.
- Cameron, D.S., Beven, K.J., Tawn, J., Blazkova, S., Naden, P.**, 1999. Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 219, 169-187.

- Cappus, P.**, 1960. Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille Blanche*, N°A, 493-518.
- Castaigns, W.**, 2007. *Analyse de sensibilité et estimation de paramètres pour la modélisation hydrologique : potentiel et limitations des méthodes variationnelles*. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier. Grenoble I.
- Cernesson, F.**, 1993. *Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens*. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technique du Languedoc. Montpellier.
- Charifi, S.**, 2006. *Application du modèle hydrologique GR2M sur les bassins versants de Soummam et de l'Isser*. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique. Laboratoire de Recherche Sciences de l'Eau.
- Cherfouh, N.**, 2011. *L'évaluation préliminaire des impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eaux superficielles dans la région hydrographique : Le constantinois : Constantinois- Seybouse-Mellèg*. Mémoire de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Alger.
- Chkir, N.**, 1994. *Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit*. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- 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), 1-20.
- CNES**, 2004. *L'eau en Algérie : le grand défi de demain*. Avant-projet de rapport. Commission de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- Conrad, V., Pollak, L.W.**, 1950. *Methods in Climatology*. Ed. Harvard University Press.
- CORPEN.**, 1997. *Produits phytosanitaires et dispositifs enherbés. Etat des connaissances et propositions de mise en œuvre*. Groupe « Dispositifs Enherbés ».
- Crabit, A.**, 2010. *Hydrologie de petits bassins versants non jaugés : Problématique, caractéristiques et modélisation. Application sur 11 petits bassins en contexte viticole Méditerranéen (Languedoc- Roussillon, France)*. Thèse de Doctorat. CIESSA. Montpellier SupAgro. LISAH/INRA.
- Cudennec, C.**, 2000. *Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique*. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique. Rennes.
- Da Ros, D., Borga, M.**, 1997. Adaptive use of a conceptual model for real time forecasting. *Nordic Hydrology*, 28(3), 169-188.
- Dacosta, H.**, 1989. *Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance*. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop Dakar. ORSTOM.
- Dacosta, H., Konaté, Y.K., Malou, R.**, 2002. La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. Friend 2002 - Regional hydrology: Bringing the Gap between Research and Practice. Cape Town. South Africa. *IAHS Publication*, 274, 499-506.
- Dahmani, B., Hadjib, F., Allalc, F.**, 2002. Traitement des eaux du bassin hydrographique de la Tafna (N-W Algeria). *Desalination*, 152, 113-124.
- Dalrymple, T.**, 1949. *Regional flood frequency*, 29th Annual Conference of the Highway Research Board. Washington District of Columbia. United States.
- Dawdy, D.R., O'Donnell, T.**, 1965. Mathematical models of catchment behavior. *American Society of Civil Engineers Proceedings*, 4410 (HY4), 123-137.

- Dawson, C., Abrahart, R., See, L.,** 2007. Hydro Test: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*, 22(7), 1034-1052.
- De Rosnay, J.,** 1975. *Le macroscopie. Vers une vision globale*. Seuil. (Prix de l'Académie des sciences morales et politiques). Paris.
- Dechemi, N., Benkaci, T., Issolah, A.,** 2003. Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Revue des Sciences de l'Eau*, 16(4), 407-424.
- Deguig, D.,** 2009. *Etude de la pollution dans la région de Tlemcen (Etude sur un modèle physique)*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Descartes, R.,** 1637. *Discours de la méthode*. Ed. Librairie Philosophique. Paris.
- Diello, P.,** 2007. *Interrelations Climat- Homme- Environnement dans le Sahel Burkinaabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique*. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II.
- Dooge, J.C.I.,** 1973. *Linear theory of hydrology systems*. Technical Bulletin.
- Dooge, J.C.I.,** 1988. Hydrology past and present. *Journal of Hydraulic Research*, 26(1), 5-26.
- Dreyfus, G., Martinez, J.M., Samuelides, M., Gordon, M.B., Badran, F., Thiria, S., Héroult, L.,** 2002. *Réseaux de neurones: Méthodologie et applications*. Ed. Eyrolles.
- Duan, Q., Gupta, H.V., Sorooshian, S.,** 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global optimization of conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), 501-521.
- Dubreuil, P.,** 1974. *Initiation à l'analyse hydrologie*. Masson & Cie Editeurs. Paris VI.
- Duchauffour, P.,** 1997. *Abrégé de pédologie, sol, végétation, environnement*. Ed. Masson. Paris.
- Dunne, T., Black, R.,** 1970. An experimental experimentation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 2(2), 478- 490.
- Duvivier, L.,** 1955. *Hydrologie générale. Premier cours national post-graduate sur l'irrigation, le drainage et la gestion des ressources en eau*. Ed. Humberto Pizarro Spécialité en irrigation et drainage. Institut Interaméricain de Coopération pour l'Agriculture.
- Eagleson, P.S.,** 1991. Preface. In: *Opportunities in the Hydrologic Sciences*. N. R. Council. Ed. National Academy Press. Washington.
- Edijatno, C., Michel, C.,** 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2, 113-121.
- Egbuniwe, N., Todd, D.K.,** 1976. Application of the Stanford Watershed Model to Nigerian watersheds. *Water Resources Bulletin*, 12(3), 449-460.
- El-Mahi, A.,** 2002. *Déficit pluviométrique des dernières décennies en Algérie et son impact sur les ressources en eau*. Mémoire de Magister. Centre Université de Mascara.
- Elmi, S.,** 1970. *Rôles des accidents décrochant de direction SSW-NNE dans la structure des monts de Tlemcen (ouest-Algérien)*. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord. Alger, t 61, Fascic 3-4, 3-8.
- Elmi, S., Almeras, Y., Ameer, M., Bassoullet, J.B., Boutakiout, M., Benhamou, M., Marok, A., Mekahli, L., Mekkaoui, A., Mouterde, R.,** 1998. Stratigraphic and palaeogeographic survey of the Lower and Middle Jurassic along a north-south transect in western Algeria. In S. Crasquin-Solleau. E. Barrier (Eds.). *Péri-Téthys Memoir. 4: Epicratonic basins of Peri-Tethyan platforms*, 179, 145-211.

- Euclides, H., Ferreira, P.A., Filho, R.F.F., Santos, A.P.,** 2007, Regionalização hidrológica na região hidrográfica capixaba, compreendida entre os limites da bacia do rio doce e do rio itabapoana. *XX Simpósio de Recurso Hídricos*, 1-8.
- Ewen, J., Parkin, G.,** 1996. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. *Journal of hydrology*, 175 (1 et 4), 583-594.
- Ewen, J., Parkin G., O'Connell, P.E.,** 2000. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(3), 250-258.
- Exbrayat, J.F., Viney, N.R., Seibert, J., Frede, H.G., Breuer, L.,** 2011. Multi-model data fusion as a tool for PUB: example in a Swedish mesoscale catchment. *Advances in Geosciences*, 29, 43-50.
- Fadika, V., Goula, B.T.A., Kouassi, F.W., Doumouya, I., Koffi, K., Kamagate, B., Savane, I., Srohorou, B.,** 2008. Variabilité interannuelle et saisonnière de l'écoulement de quatre cours d'eau de l'ouest côtier de Côte d'Ivoire (Tabou, Dodo, Néro et San Pédro) dans un contexte de baisse de la pluviométrie en Afrique de l'ouest. *European Journal of Scientific Research*, 21(3), 406-418.
- Fenicia, F., Savenije, H., Matgen, P., Pfister, L.,** 2008. Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resources Research*, 44(1): W01402. Doi : 10.1029/2006WR005563
- Folton, N., Arnaud, P.,** 2012. *Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen annuel en France*. Rapport final. IRSTEA. Office National de l'Eau et des Milieu Aquatiques.
- Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., Villeneuve, J.,** 2001. Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. II : Application to Chaudière Watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), 100-108.
- Fouchier, C.,** 2010. *Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues*. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technique du Languedoc. Montpellier II. CEMAGREF.
- François, D., Gille, E., Zurnstein, J.F.,** 1993. *Analyse statistique des séries chronologiques et applications aux données hydroclimatiques*. In L'Eau, la Terre et les Hommes. Ed. Presses Universitaires de Nancy. France.
- Gan, K.C., McMahon, T.A., O'Neill, I.C.,** 1990. Errors in estimated streamflow parameters and storages for ungauged catchments. *Water Resources Bulletin*, 26(3), 443-450.
- Gascuel-Oudou, C., Hubert-Moy, L., Robin, P., Walter, C.,** 1994. *Quelle échelle est pertinente pour définir des paramètres de fonctionnement d'un modèle hydrologique en milieu agricole intensif?* Rapport final de contrat. CNRS-Programme Environnement. « Méthodes, Modèles et Théories : Les problèmes de multiplicité d'échelle d'espace et de temps dans les recherches sur l'environnement ».
- Gaume, E.,** 2002. *Eléments d'analyse sur les crues éclaircies*. Thèse de Doctorat. ENGREF. INRS.
- Gentil, L.,** 1902. *Esquisse stratigraphique et pétrographique du bassin de la Tafna (Algérie)*. Ed. Adolphe Jourdan.
- Gérard, L.,** 2010. *Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage*. Rapport de stage. CEMAGREF.
- Ghenim, A.,** 2001. *Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna cas de Oued Isser, Oued Mouillah et la Haute Tafna*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Ghenim, A., Terfous, A., Seddini, A.,** 2007. Production et exportation des sédiments en suspension lors des événements de crue, cas du bassin versant de l'Oued Mouillah. *Larhyss Journal*, 35-44.

- Ghenim, A., Terfous, A., Seddini, A.,** 2008. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérien). *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 448-456.
- Ghenim, A., Megnounif, A., Seddini, A., Terfous, A.,** 2010. Fluctuations hydro-pluviométrique du bassin versant de l'oued Tafna à Béni-Bahdel (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 21(2), 115-120,
- Ghenim, A., Megnounif, A.,** 2013a. Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Mefrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). *Géographie Physique et Environnement*, 7, 35-49, Disponible : <http://physio-geo.revues.org/3173>
- Ghenim, A., Megnounif, A.,** 2013b. Analyse des précipitations dans le Nord-Ouest algérien. *Sécheresse*, 24(2), 107-114. doi : 10.1684/sec.2013.0380
- Gherissi, R.,** 2012. *Hydrologie et modélisation pluie-débit : Cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna-NW algérien*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Gnouma, R.,** 2006. *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué à moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*. Thèse de Doctorat. Unité de recherche en hydrologie-hydraulique, CEMAGREF.
- Goswami, M., O'Connor, K.M., Bhattarai, K.P.,** 2007. Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. *Journal of Hydrology*, 333, 517– 531.
- Gottschalk, L.,** 1985. Hydrological regionalization of Sweden. *Hydrological Sciences Journal*, 30, 65-83.
- Götzinger, J., Bardossy, A.,** 2007. Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 333, 374- 384.
- Gray, D.M.,** 1972. *Manuel des principes d'hydrologie*. Le Comité National Canadien de la Décennie Hydrologique Internationale. Canada.
- Grayson, R.B., Moore, I.D., McMahon, T.A.,** 1992. Physically-based hydrologic modeling. 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 26(10), 2659-2666.
- Grayson, R., Blöschl, G., Western, A., McMahon, T.,** 2002. Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response. *Water Resources*, 25, 1313–1334.
- Gupta, V.K., Sorooshian, S.,** 1985. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 81, 57-77.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., Yapo, P.O.,** 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and no commensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751-763.
- Gupta, H.V., Wagener, T., Liu, Y.,** 2008. Reconciling theory with observations: Elements of a diagnostic approach to model evaluation. *Hydrological Processes*, 22(18), 3802-3813.
- He, Y., Bardossy, A., Zehe, E.,** 2011. A review of regionalisation for continuous stream flow simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3539-3553.
- Hewlett, J., Hibbert, A.,** 1967. *Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas*. Ed. In International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press-Oxford & N.Y.
- Hingray, B., Picouet, C., Musy, A.,** 2009. *Hydrologie 2. Une science pour l'ingénieur*. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Horton, R.,** 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transaction American Geophysical Union*, 14, 446–460.

- Hosseini, S.M., Mahjouri, N., Riahi, S.,** 2016. Development of a Direct Geomorphologic IUH Model for Daily Runoff Estimation in Ungauged Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(6), 10,1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001333
- Hsu, K.L., Gupta, H.V., Sorooshian, S.,** 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31(10), 2517-2530.
- Hubert, W.,** 2003. *Dictionnaire français d'hydrologie*. Centre National Français des Sciences Hydrologiques. Commission de Terminologie.
- Hufty, A.,** 2001. *Introduction à la climatologie : Le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. Editions De Boeck Université.
- Hundecha, Y., Bardossy, A.,** 2004. Modelling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 292, 281-295.
- Indarto, K.,** 2002. *Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique : Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée*. Thèse de Doctorat. ENGREF.
- Ivanov, V.Y., Vvoni, E.R., Bras, R.L., Entekhabi, D.,** 2004. Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. *Water Resources Research*, 40(W11102), 1-23. doi :10.1029/2004WR003218
- Jacquet, J.,** 1971. Aspects généraux de la représentation mathématique des phénomènes en hydrologie de surface. *La Houille Blanche*, N°2, 105-110.
- Jakeman, A.J., Hornberger, G.M.,** 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? *Water Resources Research*, 29(8), 2637-2649.
- James, C., Dooge, J.C.I.,** 1968. The hydrologic cycle as a closed system. *International Association of Scientific Hydrology*, 13(1), 58-68.
- Jarboe, J.E., Haan, C.T.,** 1974. Calibrating a water yield model for small ungauged watersheds. *Water Resources Research*, 10(2), 256-262.
- Javelle, P.,** 2001. *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée fréquence convergent. Approche locale et régionale*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Jensen, R.C.,** 1993. Effect of Forestry on suspended solids and bedload yields in the Balquhiddy catchment. *Journal of Hydrology*, 145, 403-417.
- Joseph, G., Chokmani, K., Ouarda, T.B.M.J., Saint-Hilaire, A.,** 2007. Une évaluation de la robustesse de la méthode du krigeage canonique pour l'analyse régionale des débits. *Revue des Sciences de l'Eau*, 20(4), 367-380.
- Kabouya, M.,** 1990. *Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale*. Thèse de Doctorat. Université Paris Sud.
- Kabouya, M., Michel, C.,** 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des sciences de l'eau*, 4(4), 569-587.
- Kamagaté, B.,** 2006. *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l'Ouémé)*. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc.
- Kauark-Leite, L.A., 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.

- Kay, A. L., Jones, D. A., Crooks, S., M., Calver, A., Reynard, N. S.,** 2006. A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models. *Hydrological Processes*, 20, 3953–3973.
- Kendall, M.G.,** 1975. *Rank Correlation Methods*. 4th Edition Charles Griffin. London.
- Ketrouci, K., Meddi, M., Abdesselam, B.,** 2012. Etude des crues extrêmes en Algérie : cas du bassin versant de la Tafna. *Sécheresse*, 23(4), 297-305. doi : 10.1684/sec.2012.0353
- Ketrouci, K.,** 2014. *Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie*. Thèse de Doctorat. Université d'Oran.
- Khadidda, R.,** 1996. *Geomorphological Evolution of the Oued Tafna Basin (Algeria, North-West of Oranian Country)*. Thèse de Doctorat. Université de Chambéry.
- Khalifa, A.,** 2011. *Tentative d'amélioration des techniques de régionalisation des modèles hydrologiques pluie-débit*. Rapport de Stage. Université Pierre et Marie Curie. École des Mines de Paris & ENGREF. CEMAGREF (Antony).
- Khaoui, B.,** 2011. *Les résineux dans la région de Tlemcen (Nord Ouest Algérien) aspects écologique, impacts du feu et cartographie*. Mémoire de Magister. Université d'Oran.
- Khemies, F.,** 2013. *Inventaire des variétés locales d'arboriculture fruitière et leurs biotopes respectifs dans la wilaya de Tlemcen*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Kingumbi, A.,** 2006. *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale*. Thèse de Doctorat. Université de Tunis El Manar.
- Kite, G.,** 1995. *The SLURP model*, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Ed. Water Resources Publications. Highlands Ranch. Colorado.
- Klemeš, V.,** 1983. Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of hydrology*, 65, 1-23.
- Klemeš, V.,** 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.
- Koffi, Y.B.,** 2007. *Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat. Université de Cocody Abidjan.
- Koffi, Y.B., Ahoussi, K.E., Kouassi, A.M., Kouassi, O., Kpangui, L.C., Biemi, J.,** 2014. Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Afrique Science*, 10(3), 134 – 145, ISSN 1813-548X. <http://www.afriquescience.info>
- Kouamé, K.F., Kouassi, A.M., N'Guessan Bi, T.M., Kouao, J.M., Lasm, T., Saley, M.B.,** 2013. Analyse de tendances dans la relation pluie-débit dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'zo-Sassandra (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2(2), 92-103. Disponible sur : <http://www.issr-journals.org/ijias/>
- Kouassi, A.M.,** 2007. *Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat. Université de Cocody-Abidjan.
- Kouassi, A.M., Kouamé, K.F., Yao, K.B., Dje, K.B., Paturel, J.E., Oularé, S.,** 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Européenne de Géographie (Cybergeo)*. Disponible sur : <http://cybergeo.revues.org/index23388.html>
- Kouassi, A.M., N'Guessan Bi, T.M., Kouamé, K.F., Kouamé, K.A., Okaingni, J.C., Biémi, J.,** 2012. Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation

- pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus Geoscience*, 344, 288-296. doi: 10.1016/j.crte.2012.02.003
- Kundzewicz, Z.W., Robson, A.J.**, 2004. Change detection in hydrological records— a review of the methodology. *Hydrological Sciences–Journal*, 49(1), 7-19.
- Laborde, J.P.**, 1993. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500 000, notice explicative. Projet PNUD/ALG/88/021. Alger : Agence nationale des ressources hydrauliques.
- Laborde, J.P.**, 2000. *Élément d'hydrologie de surface*. Université de Nice-Sophia Antipolis.
- Ladlani, I.**, 2007. *Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée « choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba »*. Mémoire de Magister. Université El Hadj Lakhdar.
- Latron, J., Gallart, F.**, 2008. Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of hydrology*, 358, 206-220.
- Le Lay, M.**, 2006. *Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Le Moine, N.**, 2008. *Le bassin versant de surface vue par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?* Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie.
- Le Xuan, K.**, 2008. *Variabilité des processus hydrologiques entrant dans le mécanisme de la genèse des crues sur les bassins à cinétique rapide*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Lerat, J.**, 2009. *Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues*. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie. Paris VI.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S.**, 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201, 272-288.
- Linsley, R.K.**, 1982. *Rainfall-runoff models-an overview*, In: Rainfall-runoff relationship. V. P. Singh, Ed. Water Resources Publications. Littleton, CO.
- Liu, Z., Todini, E.**, 2005. Assessing the TOPKAPI non-linear reservoir cascade approximation by means of a characteristics lines solution. *Hydrological Processes*, 19(10), 1983-2006.
- Llamas, J.**, 1993. *Hydrologie générale : Principes et applications*. 2eme édition. Gaëtan morin éditeur, Québec, Canada. ISBN 2-89105-485-7
- Loumagne, C.**, 1988. *Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit*. Thèse de Doctorat. Université Paris Sud-Centre d'Orsay. CEMAGREF Antony.
- Loumagne, C., Chkir, N., Normand, M., Ottlé, C., Vidal-Madjar, D.**, 1996. Introduction of the soil-vegetation-atmosphere continuum in a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrological Sciences*. 41(6), 889-902.
- Lubès, H., Masson, J.M., Servat, E., Parturel, J.E., Kouamè, B., Boyer J.F.**, 1994. *Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par l'application de tests statistiques, étude bibliographique*. Rapport n°3, ORSTOM.
- Lubes-Niel, H., Masson, J.M., Patuere, J.E., Servat, E.**, 1998. Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, 383-408.
- Luyet, G.**, 1990. Estimation des débits moyens mensuels sur cours d'eau alpins non mesurés : application à la Dranse de Bagnes. *IAHS Publication*, 193, 581-590.

- Madsen, H.**, 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235, 276-288.
- Magette, W.L., Shanholtz, V.O., Carr, J.C.**, 1976. Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resources Research*, 12(3), 472-476.
- Mahé, G., Olivry, J.C.**, 1999. Evaluation des apports en eau douce à l'Atlantique depuis les côtes de l'Afrique intertropicale (1951-1989). *Sciences de la Terre et des Planètes*, 328, 621-626.
- Mahé, G., Olivry, J.C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F., Sevat, E.**, 2000. Relation eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Sciences de la Terre et des Planètes*, 330, 689-692.
- Makhlouf, Z., Michel, C.**, 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.
- Makungo, R., Odiyo, J.O., Ndiritu, J.G., Mwaka, B.**, 2010. Rainfall-runoff modelling approach for ungauged catchments: A case study of Nzhelele River sub-quadernary catchment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 596-607.
- Mann, H.B.**, 1945. Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- Maréchal, D.**, 2004. *A soil-based approach to rainfall-runoff modelling in ungauged catchments for England and Wales*. Thèse de Doctorat. Cranfield University.
- Marok, A.**, 1996. *Stratigraphie, sédimentologie et interprétation géodynamique du Lias début du Dogger : Exemple de sédimentation carbonatée de plate-forme en Oranie (Monts de Sidi-El-Abed, Hautes Plaines, Algérie occidentale)*. Document. Laboratoire. Géologie, 141.
- Marsily, G.**, 1994. Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 7(3), 219-234.
- Masmoudi, R.**, 2009. *Etude de la fiabilité des systèmes de distribution d'eau potable en zones arides cas de la région de Biskra*. Thèse de Doctorat. Université de Biskra.
- Matari, A., Kerrouche, M., Bousid, H., Douguedroit, A.**, 1999. Sécheresse dans l'Ouest algérien. *Publications de l'association Internationale de Climatologie*, 12, 98-106.
- Mateescu, M.**, 2011. *Etude statistique des chroniques des paramètres climatiques en Europe dans la période instrumentale. L'analyse des cycles par la méthode fréquentielle ondelette*. Thèse de Doctorat. Université Babeş-Bolyai. Roumanie. Université Sophia Antipolis. Nice.
- Mazenc, B., Sanchez, M., Thiery, D.**, 1984. Analyse de l'influence de la physiographie d'un bassin versant sur les paramètres d'un modèle hydrologique global et sur les débits caractéristiques à l'exutoire. *Journal of Hydrology*, 69, 97-118.
- Mazour, M.**, 1992. *Les facteurs de risque de l'érosion en nappe dans le bassin versant d'Isser – Tlemcen – Algérie*. Bulletin Réseau-Erosion, 12. Ed. Institut de Recherche pour le Développement, 300-313.
- Meddi, M., Hubert, P.**, 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie. In: E. Servat, et al., eds, *Hydrology of Mediterranean and semiarid regions*. Wallingford: IAHS Press: *IAHS Publication*, 278, 229-235.
- Meddi, H., Meddi, M.**, 2004. Sécheresse et spatialisation des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie. *Colloque International « Terre et Eau »*. Annaba du 21, 22 & 23 Novembre.
- Meddi, M., Meddi, H., Ketrouti, K., Matari, A.**, 2005. Tendances du régime pluviométrique et sécheresse dans le nord ouest algérien. *IVe colloque du département de géographie. Eau et Espace : ressources, enjeux et aménagements*, Tunis.

- Meddi, H., Meddi, M.,** 2009. Variabilité des précipitations annuelles du nord ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 20(1), 57-65. Doi : 10.1684/sec.2009.0169
- Medjerab, A., Henia, L.,** 2011. Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale. *Courrier du savoir*, 11, 71-79.
- Megnounif, A., Terfous, A., Bouanani, A.,** 2003. Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau*, 16(3), 369-380.
- Merz, B., Blöschl, G.,** 2004. Regionalization of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, 95-123.
- Merz, R., Blöschl, G., Piöck-Ellena, U., Rieger, W.,** 2000. Regionalisierung von Bemessungshochwässern mit geostatistischen Verfahren (Regional estimation of design floods by geostatistical techniques). *Interpraevent*, 1, 71-84.
- Merz, R., Btoschl, G., Parajka, J.,** 2006. Regionalization methods in rainfall-runoff modelling using large catchment samples. *Large sample basin experiments for hydrological model parametrization: Results of the model parameter experiment MOPEX. IAHS Publication*, 307, 177-125.
- Michel, C.,** 1989. *Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux*. Ed. CEMAGREF, Antony.
- Miossec, M.P.,** 2004. *Apport des Multi-Modèles pour la modélisation sur des bassins versants non jaugés*. Mémoire de DEA. Université Pierre et Marie Curie. Université Paris-Sud. École des Mines de Paris. ENGREF.
- Moore, R.J.,** 1999. *Real-time flood forecasting systems: Perspectives and prospects*. In *Floods and landslides: integrated Risk Assessment*. Ed. *Floods and landslides: Integrated risk assessment*. Springer-Verlag. Berlin.
- Morel, M.,** 1986. *Les problèmes posent par les normes pluviométriques dans la région sahélienne*. In colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. Ouagadougou 20-24 mai. CIEH. Série hydrologique, 1-15.
- Mosley, M.P.,** 1981. Delimitation of New Zealand hydrologic regions. *Journal of Hydrology*, 49, 173-192.
- Mostefai, N.,** 2010. *La diversité avienne dans la région de Tlemcen (Algérie occidentale) : Etat actuel, impact des activités humaines et stratégie de conservation*. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen.
- Mouelhi, S.,** 2003. *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. Thèse de Doctorat. ENGREF. CEMAGREF (Antony).
- Musy, A.,** 2005. Cours d'hydrologie générale. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Nascimento, N.O.,** 1995. *Appréciation l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit, l'échelle d'un bassin versant*. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V.,** 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 27(3), 282-290.
- Nebbache, R.,** 2012. *Etude de l'impact de l'irrigation par les eaux épurées sur les eaux souterraines. Cas de la station d'épuration d'Ain El-Houtz et le périmètre irrigué d'Hennaya*. Mémoire de Master 2. Université de Tlemcen.
- Ondo, J.C.,** 2002. *Étude comparative des tests de stationnarité*. Thèse de Doctorat. Université du Québec. INRS.

- Ouarda, T.B.M., Bobée, B., Rasmussen, P.,** 1998. Etude de la variabilité spatiale des régimes hydrologiques : comparaison de différents modèles d'homogénéité. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceeding of the Abidjan 98 Conference held at Abidjan. Côte d'Ivoire). IAHS Publication, 252, 199-205.*
- Ouarda, T.B.M., Lang, M., Bobée, B., Bernier, J., Bois, P.,** 1999. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Revue des Sciences de l'Eau, 12(1), 155-182.*
- Oudin, L.,** 2004. *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global.* Thèse de Doctorat. ENGREF. CEMAGREF.
- Oudin, L., Michel, C., Anctil, F.,** 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1-Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology, 303, 275-289.*
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Le Moine, N.,** 2008, Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research, 44, W03413, 1-15.* doi:10.1029/2007WR006240
- Oudin, L., Kay, A., Andréassian, V., Perrin, C.,** 2010. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resources Research, 46, W11558:* doi:10.1029/2009WR008887
- Ouedraogo, M., Servat, E., Paturel, J. E., Lubes-Niel, H., Masson, J.M,** 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *IAHS Publication, 252,315-321.*
- Ouedraogo, M.,** 2001. *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest, Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale.* Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II.
- Pandey, G.R., Nguyen, V.T.V.,** 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology, 225, 92-101.*
- Parajka, J., Merz, R., Blöschl, G.,** 2005. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences, 9, 157-171.*
- Parent, E., Perreault, L., Chauouche, A., Duckstein, L., Bernier, J., Vazken, A., Tangara, M., Michel, C.,** 2001. *Approche statistique décisionnelle d'évaluation récente du régime des hautes eaux.* Rapport d'avancement de fin de travaux : Développement du cadre méthodologique et validation sur des exemples d'hydrologie forestière. Projet 38 du GIP HYDROSYSTEMES.
- Paturel, J.E., Servat, E., Vassiliadis, A.,** 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data-case of the GR2M model. *Journal of Hydrology, 168, 111-125.*
- Paturel, J.E., Servat, E., Kouamé, B., Lubès, H., Masson, J.M., Boyer, J.F., Travaglio, M., Mariou, B.,** 1996. Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du golfe de guinée, approche régionale intégrée. *Premier Atelier Scientifique FRIEND AOC, PHIV. Documents Techniques en Hydrologie, 16, 1-31.*
- Paturel, J.E., Boubacar, I., L'Aour, A., Mahé, G.,** 2010. Analyses de grilles pluviométriques et principaux traits des changements survenus au 20^{ème} siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Hydrological Sciences Journal, 55(8), 1281-1288.* DOI: 10.1080/02626667.2010.527846
- Pédélaborde, P.,** 1968. Les bilans hydriques. *Cahiers de géographie du Québec, 12(25), 5-23.* DOI : 10.7202/020784ar
- Penman, H.L.,** 1961. *Weather, plant and soil factors in hydrology.* *Weather, 16, 207.*

- Perrin, C.**, 2000. *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V.**, 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), CEMAGREF. Disponible sur : <http://www.cemagref.fr/webgr>
- Pettitt, A.N.**, 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- Post, D.A., Jones, J.A., Grant, G.E.**, 1998. An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments. *Environmental Modelling & Software*, 13, 395-403.
- Rahmi, A.**, 2014. *Contribution à l'étude des Trichoptères au niveau d'oued Chouly (Nord-Ouest Algérie)*. Mémoire de Master. Université de Tlemcen.
- Randrianasolo, R.A.**, 2012. *Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés*. Thèse de Doctorat. Institut des Sciences et Technologies. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).
- Refsgaard, J.C., Abbott, M.B.**, 1996. *The role of distributed hydrological modelling in water resources management* - Chapter 1. In: Distributed Hydrological modeling. M. B. Abbott et J. C. Refsgaard (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Riggs, H.C.**, 1973. *Regional analyses of stream flow characteristics*. Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, Ch. B3. US. Geological Survey, Washington, D. C.
- Roche, P. A.**, 1988. *Les modèles*. In : Valiron, F (ed). *Gestion des eaux : Automatisation, Informatisation et Télégestion*. Tome III. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Rodier, J.**, 1964. *Régime hydrologique de l'Afrique noire à l'ouest du Congo*. ORSTOM. France.
- Rogers, C.C.M., Beven, K.J., Morris, E.M., Anderson, M.G.**, 1985. Sensitivity analysis, calibration and predictive uncertainty of the Institute of Hydrology Distributed Model. *Journal of Hydrology*, 81, 179-191.
- Rojas Serna, C., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V.**, 2006. Ungauged catchments: how to make the most of a few streamflow measurements. Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter. *Experiment MOPEX. IAHS Publication*, 307, 230-236.
- Rosen, R.**, 1991. *A comprehensive inquiry into the nature, origin and fabrication of life*. New York: Columbia University Press.
- Roy, R.**, 1993. *Régionalisation des caractéristiques des crues. Utilisation d'une méthode combinant les approches déterministes et stochastiques*. Thèse de Doctorat. INRS. Université de Québec.
- Saidouni, D.**, 2003. *Modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps horaire par différentes approches (DPFT- Réseaux Neurones- ACP)*. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique. Laboratoire Construction et Environnement.
- Sauquet, E.**, 2006. Mapping mean annual river discharges: Geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *Journal of Hydrology*, 331, 300- 314.
- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., Carrillo, G.**, 2011. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 2895–2911.
- Sebaïbi, A.**, 2014. *Potentialités agro-climatiques de la région de Zenata et de Maghnia. Étude d'une longue série climatique*. Mémoire d'Ingénieur. Université de Tlemcen.

- Sefton, C.E.M., Whitehead, P.G., Eatherall, A., Littlewood, I.G., Jakeman, A.J.,** 1995. Dynamic response characteristics of the Plynlimon catchments and preliminary analysis of relationships to physical descriptors. *Environmetrics*, 6, 465-472.
- Sefton, C.E.M., Howarth, S.M.,** 1998. Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology*, 211, 1-16.
- Seibert, J.,** 1999. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology*, (98-99), 279 -293.
- Servat, E.,** 1986. *Présentation de Trois Modèles Globaux Conceptuels Déterministes : CREC5, MODGLO et MODIBI*. Rapport ORSTOM.
- Servat, E., Dezetter, A., Lapetite, J.M.,** 1989. *Modélisation pluie – débit. Etude et sélection des critères de calage des modèles pluie – débit*. Note 2 Programme ERREAU ORSTOM. Rapport N°42.
- Servat, E., Dezetter, A.,** 1991. Prise en compte du type d'occupation des sols dans une modélisation pluie-débit en savane soudanaise. *Symposium "Hydrological Interactions Between Atmosphere, Soil and Vegetation". Proceedings of the Vienna Symposium. IAHS Publication*, 204, 401-410.
- Servat, E., Dezetter, A.,** 1992. Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Hydrologie Continentale*, 7(2), 129-142.
- Servat, E., Dezetter, A.,** 1993. Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 148, 231-248.
- Servat, E., Paturel, J.E., Kouame, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J.F., Lubes-Niel, H., Fritsch, J.M., Masson, J.M., Marieu, B.,** 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IAHS Publication*, 252, 323-337.
- Shifteh Some'e, B., Ezani, A., Tabari, H.,** 2012. Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmospheric Research*, 113, 1-12. doi : 10.1016/j.atmosres.2012.04.016
- Sighomnou, D.,** 2004. *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau*. Thèse de Doctorat. Université de Yaoundé 1.
- Singh, V.P.,** 1995. *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications. Littleton.
- Singh, V.P., Woolhiser, D.A.,** 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292.
- Sivapalan, M., Blöschl, G., Zhang, L., Vertessy, R.,** 2003. Downward approach to hydrological prediction. *Hydrological Processes*, 17, 2101-2111.
- Sneyers, R.,** 1975. *Sur l'analyse statistique des séries d'observations*. OMM. Note technique n° 143, Genève.
- SOGREAH.,** 2007. *Etude d'inventaire de développement de la Petite et Moyenne Hydraulique-PMH- Sous-Mission A2-Définition de la méthodologie d'inventaire et Restitution des tests de Tlemcen*. TT7-0123/MBE-CPC/234007R5.
- Sugawara, M.,** 1979, Automatic calibration of the tank model. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(3), 375-388.
- Sutcliffe, J.V., Piper, B.S.,** 1985. Bilan hydrologique en Guinée et Togo-Bénin. *Hydrol, Continent*, I(1), 51-61.
- Taleb, A.,** 2004. *Contribution à l'étude du fonctionnement de l'écosystème Oued. Rôle du milieu hyporhéique dans l'évolution de la qualité des eaux en aval du barrage d'Hamman-Boughrara sur la Tafna*. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen.

- Tapsoba, D., Perreault, L., Roy, R.,** 2004. L'approche bayésienne et les cubes spatiotemporels, une alternative intéressante pour l'analyse de la stationnarité des séries hydroclimatologiques. Application aux données d'Afrique de l'Ouest. *Journal of Climate*, 17 (5), 1069-1082.
- Tarboton, D.G.,** 2003. *Rainfall-runoff processes*. Utah State University.
- Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani, A.,** 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nort Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau*, 14(2), 173-185.
- Thom, R.,** 1979. *Modélisation et Scientifïcité*. In, Delattre, P et Thellier M, (ed), Actes du colloque « Elaboration et Justification des modèles : Application en Biologie ». Tome I. Ed, Malione, Paris.
- Todini, E.,** 1995. *The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change*. Series I, 31, Oliver HR.
- Todini, E.,** 1988. Rainfall-runoff modelling - Past, present and future. *Journal of Hydrology*, 100, 341-352.
- Troutman, B.M.,** 1983. Runoff prediction errors and bias in parameter estimation induced by spatial variability of precipitation. *Water Resources Research*, 19(3), 791-810.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., Rodhe, A.,** 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (5), 779-797.
- UNESCO.,** 1975. *Contribution à la décennie hydrologique internationale. L'enseignement de l'hydrologie*. Les presses de l'UNESCO.
- UNESCO-OMM.,** 1992. Glossaire international d'hydrologie, *Deuxième édition quadrilingue (EN, ES, FR, RU)*.
- Vandewiele, G.L., Xu, C.Y., Huybrecht, W.,** 1991. Regionalisation of physically-based water balance models in Belgium. Application to ungauged catchments. *Water Resources Management*, 5, 199-208.
- Vissin, E.W.,** 2007. *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne. Centre de Recherches de Climatologie.
- Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R.,** 2009. Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377, 191-207.
- Wagner T., Wheeler H. S., Gupta, H. V.,** 2004. *Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments*. Ed I. Imperial College Press. London. UK.
- Wagner, T., Gupta, H.V.,** 2005, Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 378-387. doi : 10,1007/s00477-005-0006-5
- Warin, F.,** 1994. *Etude statistique de la série pluviométrique de Padova (Italie)*. DEA National d'Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie. Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Weglarczyk, S.,** 1998. The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *Journal of Hydrology*, 206, 98-103.
- Wigmosta, M.S., Vail, L., Lettenmaier, D.P.,** 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30(6), 1665-1679.
- Wurbs, R.A.,** 1998. Dissemination of generalized water resources models in the United States. *International water*, 23(3), 190-198.

- Xu, C.Y., Vandewiele, G.L.**, 1995. Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements. *Advances in Water Resources*, 18, 39-48.
- Yadav, M., Wagener, T., Gupta, H.**, 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*, 30, 1756-1774.
- Yadi, H.B.**, 1991. *Nature et évolution de la matière minérale et organique dans le bassin de la Tafna (NW Algérien)*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.
- Yang, X.**, 1993. *Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel*. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Yang, X., Parent, E., Michel, C., Roche, P.A.**, 1995. Comparison of real-time reservoir operation techniques. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(5), 345-351.
- Yang, X., Michel, C.**, 2000. Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating. *Hydrological Sciences Journal*. 45(4), 537-546.
- Yao, C., Zhang, K., Yu, Z., Li, Z., Li, Q.**, 2014. Improving the flood prediction capability of the Xinanjiang model in ungauged nested catchments by coupling it with the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Journal of Hydrology*, 517, 1035-1048.
- Yebdri, D., Errih, M., Hamlet, A., El-Bari Tidjani, A.**, 2007. The water resources management study of the Wadi Tafna basin (Algeria) using the swat model. *A Publication of UN-Water/ Africa*, 1(1), 36-50.
- Yonaba, H.**, 2009. *Modélisation hydrologique hybride réseau de neurones - modèle conceptuels*. Thèse de Doctorat. Université LAVAL.
- Young, A.**, 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320, 155-172.
- Yu, Z.**, 1996. *Development of a physically-based distributed-parameter watershed – basin scale hydrology model! And its application to Big Darby Creek watershed*. Thesis of Doctorate. State University Of Columbus. Ohio.
- Zakhrouf, M.**, 2012. *Modélisation pluie-débit à l'aide des systèmes d'inférence neuro-flous adaptatifs de quelques bassins versants représentatifs d'Algérie*. Mémoire de Magister. Université de Laghouat.
- Zannou, A.B.Y.**, 2011. *Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin. Cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou*. Thèse de Doctorat. Université d'Abomey.
- Zin, I.**, 2002. *Incertitudes et ambigüité dans la modélisation hydrologique. Discussion, développement méthodologiques et application à l'hydrologie de crue en Ardèche*. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.

Annexes

Annexe.1**Retenues Collinaires intégrées dans le bassin versant de la Tafna.**

Code sous bassin	Code RC	Nom du site	Superficie (Km ²)	Hauteur Retenue (m)	Capacité (Mm ³)	Année mise en service	Etat de l'ouvrage
1608	RC1656	Oued Ghodani	11	6,75	0,07	1985	Envasé
1604	RC1601	Chaâbet Moutas	6,6	5,1	0,04	1985	Envasé
1605	RC1602	Chaâbet Tenouga	7,6	6,5	0,08	1985	Envasé
1605	RC1603	Oued Dahmane	34,75	6,36	0,12	1985	Envasé
1608	RC1605	Oued Bounekhala	11,2	7,3	0,08	1985	Envasé
1605	RC1606	Oued Khiar	10,27	6,3	0,052	1985	Envasé
1604	RC1607	Oued Taoudlala	51	7	0,06	1985	Envasé
1604	RC1608	Oued El Ma	1,3	5,5	0,06	1985	Envasé
1606	RC1609	Hassi El Bassel	4,75	6	0,04	1985	Envasé
1606	RC1610	Chaâbet Afrak	5,2	5	0,045	1985	Envasé
1605	RC1611	Oued Zailou	10,3	5,5	0,08	1985	Envasé
1605	RC1612	Oued Chetibia2	25,6	5,8	0,05	1985	Envasé
1605	RC1613	Oued Chetibia1	27,6	5,3	0,05	1985	Envasé
1605	RC1614	Oued Hamri	3,2	4,4	0,06	1985	Envasé
1605	RC1615	Oued el Habalet	5,4	4,1	0,03	1985	Envasé
1602	RC1616	Oued Maisser	9,2	10	0,13	1985	Envasé
1602	RC1617	Oued Boussetta	3,35	5,1	0,095	1985	Envasé
1602	RC1618	Oued Kerkabia	6,7	6	0,05	1985	Envasé
1602	RC1619	Oued Gheraba	10	6,5	0,11	1985	Envasé
1602	RC1620	Chbikia (Maghnia)	9	5,1	0,05	1985	Envasé
1608	RC1621	Oued Boumetlas	7,27	9	0,15	1985	Envasé
1606	RC1622	Chaâbet Bentlessin	6,7	5	0,04	1985	Envasé
1605	RC1623	Sidi AEK Boudia	3,5	6,6	0,03	1985	Envasé
1606	RC1624	Oued Bezzaz	6,4	6,4	0,05	1985	Envasé
1607	RC1625	Guitnat El Maghraoui	3,62	6	0,35	1985	Envasé
1607	RC1626	Oued Andouz	15	5,2	0,03	1985	Envasé
1607	RC1627	Chaâbet Bouraidene	3,8	5,5	0,05	1985	Envasé
1606	RC1628	Chaâbet Kremissat	2,6	5,4	0,05	1985	Envasé
1607	RC1629	Oued Alaâ	3,7	6,5	0,08	1985	Envasé
1605	RC1630	Oued noukhala	11,2	0	0,08	1985	Envasé
1606	RC1631	Ain Bezzaz	9,6	6,8	0,04	1985	Envasé
1607	RC1632	Chaâbet Tad Maya	11	7,6	0,1	1985	Envasé
1607	RC1633	Chaâbet Lalla Fatma	10	6,8	0,08	1985	Envasé
1607	RC1634	Oued Bel Adjoul	11,5	6,5	0,1	1985	Envasé
1607	RC1635	Chaâbet Ghouliamas	25,37	5,2	0,1	1985	Envasé
1606	RC1636	Chaâbet Mouilah	9,9	8	0,24	1985	Envasé
1605	RC1637	Chaâbet Tahar berig	2,8	4,5	0,03	1985	Envasé
1605	RC1638	Chaâbet Sidi Hamed	2,85	6,6	0,04	1985	Envasé
1605	RC1639	Ain Louiza	11,3	4,7	0,035	1985	Envasé
1607	RC1640	Chaâbet ain Kahla	14,7	4,7	0,03	1985	Envasé
1605	RC1641	Chaâbet Leshoub	7,1	5,2	0,03	1985	Envasé
1605	RC1642	Oued El Kharoub	3,3	4,6	0,06	1985	Envasé
1605	RC1643	Oued EL Aricha	3,6	5,5	0,03	1985	Envasé
1605	RC1644	Chaâbet Ouled Hammou	17,1	4,6	0,04	1985	Envasé
1607	RC1645	Ain Rexoug	6,6	8,1	0,055	1985	Envasé
1607	RC1646	Chaâbet Bouzrellou	6,21	7,8	0,06	1985	Envasé
1605	RC1647	Oued Ouled bouzar	5,2	4,6	0,08	1985	Envasé
1605	RC1648	Oued Sidi Lahcene	3,2	5,1	0,045	1985	Envasé
1606	RC1649	Sidi Mohamed Benfrakis	472	6	0,05	1985	Envasé
1608	RC1650	Oued Ferd El Ma	4,02	7,8	0,04	1985	Envasé
1605	RC1651	Oued Mekralfa	9	6	0,051	1985	Envasé
1604	RC1652	Beni Senous	48	5	0,14	2010	En exploitation
1606	RC1654	Oued Benfrakis	6,8	5	0,3	1985	Envasé
1605	RC1655	Chaabet Remaimi	14	4,8	0,1	1985	Envasé
1604	RC1658	Oued Mezzar	48		0,1	2010	En exploitation
1608	RC1652	Ouled Azzouz	415	10,5	0,11	2007	En exploitation

Source : ABHOCC, 2006.

Annexe.2**Stations pluviométriques. Code et position géographique.**

Code	Nom	X (m)	Y (m)	Z (m)
160104	El Abed	97 300	140 250	1275
160209	Souani Barrage	77 200	190 670	535
160302	Maghnia frontière	88 300	176 400	430
160303	Béni Ouassine	91 600	180 650	413
160315	Béni Boussaid	92 350	159 600	675
160403	Béni-Bahdel	115 200	165 500	660
160405	Sebdou	131 250	158 570	875
160406	Khemis Ouled Moussa	109 550	157 300	870
160407	Smala Sidi Medjahed	102 800	173 150	390
160501	Hammam Boughrara	103 700	185 800	225
160502	Sabra	113 000	178 700	608
160516	Hennaya Mellilia	126 750	188 250	510
160517	Zaouiat Sidi Benamar	102 750	202 500	370
160518	Djebel Chouachi	117 470	203 450	130
160601	Oued Chouly	149 630	181 060	747
160602	Meurbah	145 750	167 600	1125
160607	Ouled Mimoun	159 000	185 100	718
160609	Sidi Heriz	161 120	199 120	524
160610	Sidi Bounakhla	158 000	201 500	430
160613	Sidi Abdelli	152 500	205 450	323
160701	Mefrouche	135 750	179 700	1110
160702	Bensekrane	142 450	204 650	247
160705	Lala Setti	133 950	181 850	1007
160724	Tlemcen DHW	132 450	181 600	810
160725	Djebel Nador	132 750	173 900	1575
160729	Sikkak	129 500	205 150	224
160802	Pierre du chat (Fatmi El Arbi)	123 100	213 350	60

Source : ANRH, 2016.

Annexe.3**Stations hydrométriques. Code et position géographique.**

Code	Nom	X (m)	Y (m)	Z (m)
160202	Pont RN7/A	083 200	182 000	418
160316	Lagfaf	100 000	183 300	325
160401	Sebdou	131 250	158 500	870
160402	Béni Bahdel	118 950	163 350	669
160408	Kef Oued	108 000	168 720	468
160409	Zahra	114 650	161 500	663
160425	Kef Canal	105 450	170 800	435
160426	Village Tafna	102 050	178 600	316
160501	Hammam Bouhrara	103 700	185 800	270
160503	Djebel Chouachi	115 900	202 950	127
160504	Sidi Belkheir	101 900	185 500	285
160507	Zenata	120 150	194 600	218
160509	Hennaya CD 45	125 500	188 100	373
---	Ouled Mimoune	158 900	184 950	710
160601	Chouly Pont Rn7	149 650	181 150	718
160608	Sidi Gourari	152 200	172 800	970
160609	Sidi Heriz	160 400	200 000	472
160610	Sidi Bounakhla	158 000	201 050	397
160611	Sidi Bekai	152 400	208 000	325
160614	Sidi Aissa	157 350	199 800	389
160702	Bensekrane	143 410	205 200	356
160703	Remchi	122 900	208 850	75
160704	Ain Youcef	131 700	201 700	210
160726	Mefrouche	133 250	177 900	1135
160727	Sidi Moussa	133 150	197 250	242
160801	Pierre du Chat	122 925	213 325	43

Source : ANRH, 2016.

Annexe.4*Matrice de corrélation. Totaux pluviométriques annuels (1941-2006).*

	160702	160607	160403	605310
160702	1			
160607	0,84	1		
160403	0,77	0,7	1	
605310	0,74	0,75	0,75	1

 Station de Béni-Bahdel
 Station de Zenata

Annexe.5**Matrice de corrélation. Totaux pluviométriques annuels (1970-2010).**

	160802	160701	160601	605220	040101	160403	605310
160802	1						
160701	0,74	1					
160601	0,71	0,84	1				
605220	0,69	0,83	0,77	1			
040101	0,44	0,53	0,43	0,41	1		
160403	0,72	0,87	0,8	0,85	0,49	1	
605310	0,79	0,81	0,8	0,76	0,63	0,73	1

 Station de Béni-Bahdel
 Station de Zenata

Annexe.6**Matrice de corrélation. Températures moyennes annuelles (1976-2007).**

	160403	160701	605220	605310
160403	1			
160701	0,270	1		
605220	0,203	0,043	1	
605310	0,609	0,423	0,578	1

 Station de Béni-Bahdel
 Station de Zenata

■ **Formule de THORNTHWAITE**

La formule de Thornthwaite est basée essentiellement sur les températures de l'air, elle s'écrit comme suite (Bouanani, 2010 ; Amiar, 2014) :

$$ETP(m) = 16 \left(\frac{10 \bar{T}(m)}{I} \right)^a F(m, \varphi) \dots \dots \dots (7. 1)$$

ETP(m): Evapotranspiration moyenne du mois m (m=1 à12) en mm ;

$\bar{T}(m)$: Moyenne interannuelle des températures du mois en °C ;

I : Indice thermique annuel ;

i : Indice thermique mensuel ;

$$I = \sum_{i=1}^{12} i(m) \text{ Avec } i(m) = \left(\frac{\bar{T}(m)}{5} \right)^{1,514} \dots \dots \dots (7. 2)$$

a : Coefficient calculé par la formule suivante:

$$a = 0,016 I + 0,5 \dots \dots \dots (7. 3)$$

F(m, φ): Facteur correctif fonction du mois m et de la latitude φ

Coefficient de correction F(m, φ) de la formule de Thornthwaite.

Latitude nord	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
20°	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25°	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26°	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27°	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.90	0.90
28°	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.90	0.90
29°	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89
30°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32°	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33°	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34°	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35°	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36°	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37°	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38°	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39°	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41°	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42°	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43°	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44°	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45°	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46°	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47°	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48°	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72
49°	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71
50°	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Source : Pédaborde, 1968.

■ Formule de Turc

En 1962, Turc a proposé les formules simplifiées suivantes (Ladlani, 2007 ; Pédelaborde, 1968) :

$$ETP = 0,4 (I_g + 50) \frac{t}{t+15} \dots\dots\dots(7. 4)$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm d'eau ;

I_g : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (quelques calories/cm²/jour);

t : Température moyenne mensuelle de l'air du mois considéré en °C ;

Le coefficient 0,40 est le résultat du produit 0,013 j,

Donc :

Pour le mois de 31 jours on a : 0,013 × 31 = 0,40

Pour le mois de 30 jours on a : 0,013 × 30 = 0,39

Pour le mois de février le coefficient est 0,37

I_g s'obtient en fonction de la durée d'insolation h, d'après :

$$I_g = I_{gA} \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) \dots\dots\dots(7. 5)$$

Où ;

I_{gA} : Radiation globale quotidienne moyenne, si l'atmosphère n'existait pas (valeur qui ne dépend que de la latitude et qui est fournie par des tables) ;

h = durée quotidienne moyenne de l'insolation pendant le mois considéré ;

H = même valeur, mais en l'absence de nuages (durée maximum, par conséquent, déterminée uniquement par la latitude et fournie par des tables).

**Radiation globale en calories/cm² et par jour, en supposant qu'il n'y a pas d'absorption
(Absence d'atmosphère).**

<i>Latitude sud</i>	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janvier	858	893	986	1.009	1.010	990	961
Février	888	888	937	923	887	820	738
Mars	890	872	845	783	697	590	466
Avril	862	820	726	629	507	376	235
Mai	816	754	616	495	364	226	96
Juin	790	724	571	439	303	167	49.5
Juillet	804	748	597	473	338	205	98.5
Août	833	804	691	586	960	330	189
Septembre	875	871	808	734	639	527	397
Octobre	880	896	904	880	836	753	657
Novembre	860	900	970	987	977	949	905
Décembre	842	891	992	1.031	1.045	1.040	1.025

<i>Latitude nord</i>	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Janvier	858	759	642	508	364	222	87.5	5	0
Février	888	821	732	624	495	360	215	82	2.9
Mars	890	873	834	764	673	562	432	289	146
Avril	862	894	902	880	833	764	676	577	508
Mai	816	885	930	950	944	920	880	860	889
Juin	790	873	934	972	985	983	970	992	1 042
Juillet	804	879	930	955	958	938	908	905	945
Août	833	880	902	891	858	800	728	651	610
Septembre	875	872	843	788	710	607	487	341	213
Octobre	880	830	755	658	536	404	262	119	17.5
Novembre	860	767	656	528	390	246	111	17	0
Décembre	842	735	610	469	323	180	55.5	0	0

Source : Pédelaborde, 1968.

Durée astronomique du jour Valeurs mensuelles moyennes en heures par jour (H).

<i>Latitude nord</i>	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janv. (31)	12.10	11.62	11.09	10.45	9.71	8.58	6.78
Février (28¼)	12.10	11.80	11.49	11.09	10.64	10.07	9.11
Mars (31)	12.10	12.08	12.04	12.00	11.96	11.90	11.81
Avril (30)	12.10	12.35	12.60	12.90	13.26	13.77	14.61
Mai (31)	12.10	12.59	13.11	13.71	14.39	15.46	17.18
Juin (30)	12.10	12.70	13.33	14.07	14.96	16.33	18.73
Juillet (31)	12.10	12.64	13.24	13.85	14.68	15.86	17.97
Août (31)	12.10	12.44	12.80	13.21	13.72	14.49	15.58
Septembre (30)	12.10	12.18	12.26	12.36	12.46	12.63	12.89
Octobre (31)	12.10	11.90	11.70	11.45	11.15	10.77	10.14
Novembre (30)	12.10	11.69	11.19	10.67	10.00	9.08	7.58
Décembre (31)	12.10	11.51	10.91	10.23	9.39	8.15	6.30

<i>Latitude sud</i>	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janvier (31)	12.10	12.64	13.24	13.84	14.64	15.82	17.87
Février (28¼)	12.10	12.39	12.73	13.13	13.62	14.31	15.38
Mars (31)	12.10	12.16	12.22	12.26	12.34	12.46	12.64
Avril (30)	12.10	11.90	11.63	11.33	11.03	10.62	9.91
Mai (31)	12.10	11.68	11.18	10.62	9.95	9.00	7.44
Juin (30)	12.10	11.51	10.91	10.25	9.38	8.15	6.01
Juillet (31)	12.10	11.60	11.06	10.40	9.64	8.50	6.63
Août (31)	12.10	11.80	11.47	11.07	10.56	9.92	8.88
Septembre (30)	12.10	12.06	11.09	11.91	11.83	11.74	11.55
Octobre (31)	12.10	12.30	12.53	12.83	13.14	13.57	14.33
Novembre (30)	12.10	12.57	13.07	13.64	14.32	15.34	17.01
Décembre (31)	12.10	12.70	13.80	14.06	14.94	16.28	18.70

Source : Pédelaborde, 1968.

▪ **Test de Spearman**

Pour ce test, les observations originales x_i de la série avec ($i = 1, \dots, n$) sont remplacées par le rang y_i qui leur est attribué lorsqu'on les range par ordre croissant et la statistique du test est le coefficient de corrélation r_s entre les séries i et y_i , coefficient qui peut se calculer au moyen de la formule :

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n^2-1)} \sum (y_i - 1)^2 \dots\dots\dots(8. 1)$$

Sous l'hypothèse nulle, la distribution de cette quantité est asymptotiquement normale avec :

$$E(r_s) = 0 \text{ et } \text{var}(r_s) = \frac{1}{n-1} \dots\dots\dots(8. 2)$$

Après avoir calculé r_s , il convient de déterminer à l'aide de la table de la loi normale réduite la probabilité α_1 telle que :

$$\alpha_1 = P(|u| > |u(r_s)|) \text{ et } u(r_s) = r_s \sqrt{n-1} \dots\dots\dots(8. 3)$$

L'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau α_0 selon que $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$. Dans le cas de valeurs significatives de $|r_s|$ on conclut à une tendance croissante ou décroissante (*Sneyers, 1975*).

▪ **Test de Mann-Kendall**

Si l'on considère chaque élément x_i de la série avec ($i = 1, \dots, n$), on calcule la statistique de tendance t' du test, donnée par la relation (8. 4) (*Mann, 1945; Kendall, 1975; Shifteh Some'e et al., 2012*):

$$t' = \sum_{i=1}^n n_i \dots\dots\dots(8. 4)$$

La moyenne et la variance de la statistique du test sont calculées par les équations (8. 5) et (8. 6) respectivement :

$$E(t') = \frac{n(n-1)}{4} \dots\dots\dots(8. 5)$$

$$\text{Var}(t') = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \dots\dots\dots(8. 6)$$

La statistique réduite du test est donnée par l'équation (8. 7)

$$u(t') = \frac{[t' - E(t')]}{\sqrt{\text{Var}(t')}} \dots\dots\dots(8. 7)$$

On cherche la probabilité α_1 à l'aide de la loi normale centrée réduite telle que $\alpha_1 = \text{Prob}(|u| > |u(t')|)$, l'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau α selon que l'on $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$. Lorsque les valeurs de $u(t')$ sont significatives, on conclut une tendance croissante ou décroissante selon que $u(t') > 0$ ou $u(t') < 0$ (*Sneyers, 1975*).

Toutefois, lorsqu'on désire situer l'époque à partir de laquelle la tendance s'est manifestée, la statistique du test se prête mieux au calcul progressif et rétrograde nécessaire à cet effet. En inversant la direction du calcul, la variable $u(t')$ obtenue est appelée série rétrograde. Le point d'intersection de $-u(t')$ avec $u(t')$ donne le début de la tendance (*Meddi et al., 2005*).

▪ **Test de Pettitt**

Pettitt définit la variable $U_{t,n}$, comme suite :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n D_{ij} \dots\dots\dots(8. 8)$$

Où

$$D_{i,j} = \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i > x_j \\ 0 & \text{si } x_i = x_j \\ -1 & \text{si } x_i < x_j \end{cases}$$

Pettitt propose de tester l’hypothèse nulle en utilisant la statistique K_n définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,n}$ pour t variant de 1 à $n-1$, A partir de la théorie des rangs, il montre que si k désigne la valeur de K_n prise sur la série étudiée, sous l’hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par la relation (8. 9) (Pettitt, 1979 ; Paturel et al., 1996 ; Lubès-Niel et al., 1998) :

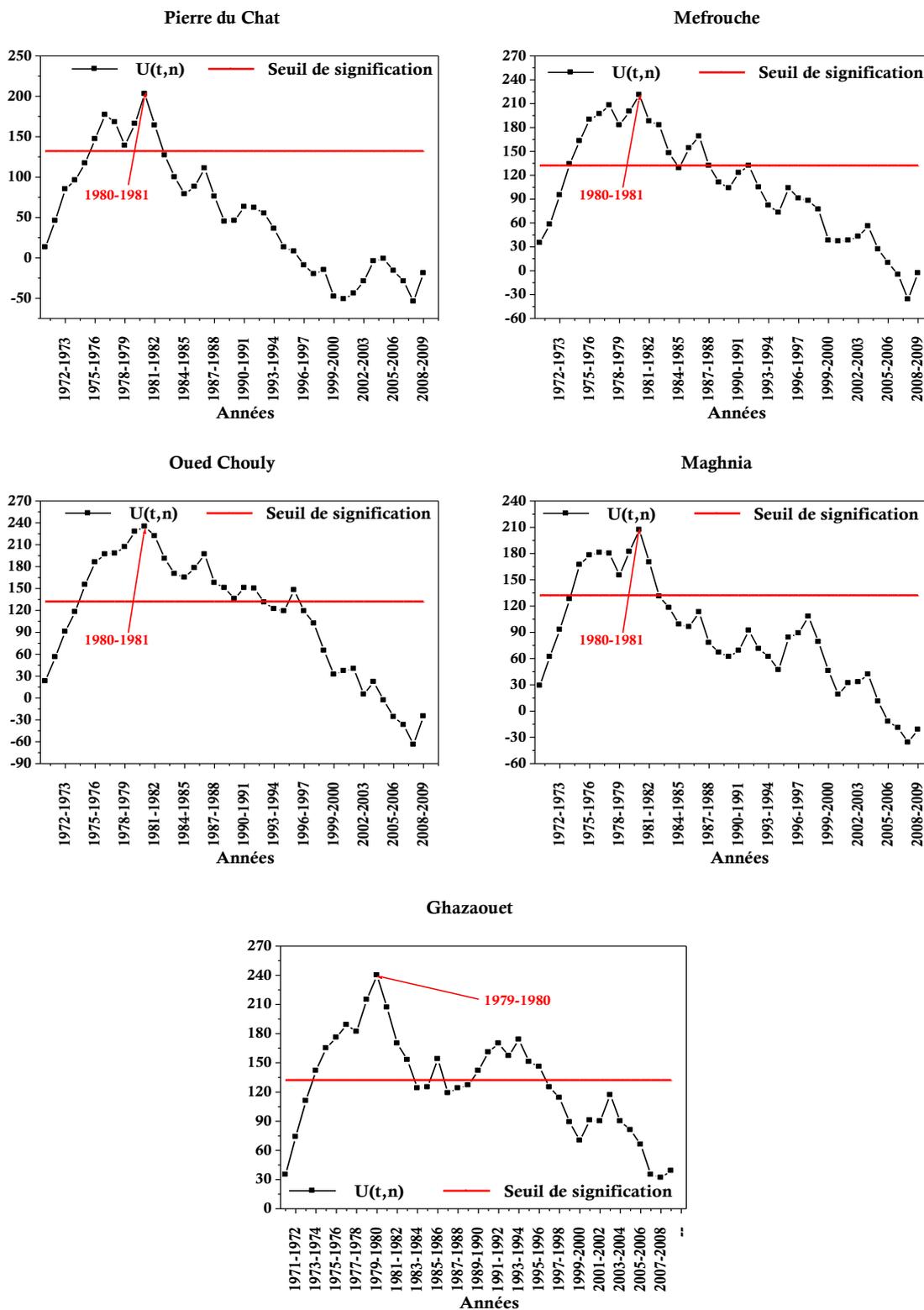
$$\text{Prob}(K_n > k) \approx 2 \exp \left[\frac{-6k^2}{(n^3 + n^2)} \right] \dots\dots\dots(8. 9)$$

Pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l’hypothèse nulle, H_0 est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observée $\max|U_{t,n}|_{t=1,\dots,n-1}$ (Kingumbi, 2006).

Annexe.9

Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels par les tests de Pettitt et de Mann-Kendall.
Période d'étude (1970-2010).

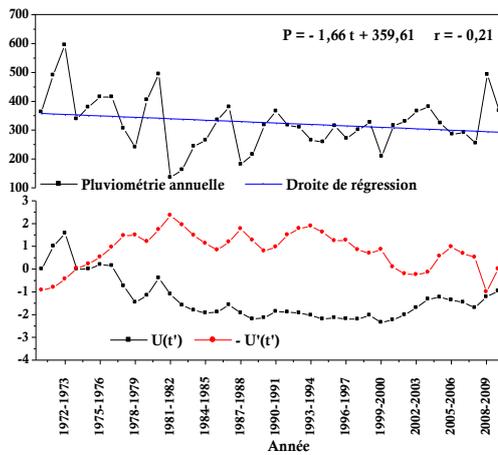
▪ Test de Pettitt



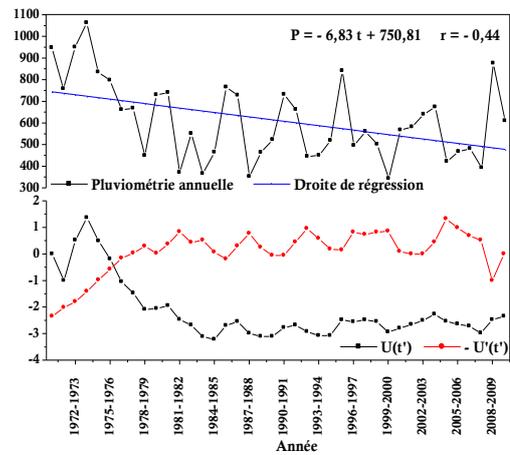
Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels des stations de Pierre du Chat, de Mefrouche, d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet par le test de Pettitt.
Période d'étude (1970-2010).

▪ Test de Mann-Kendall

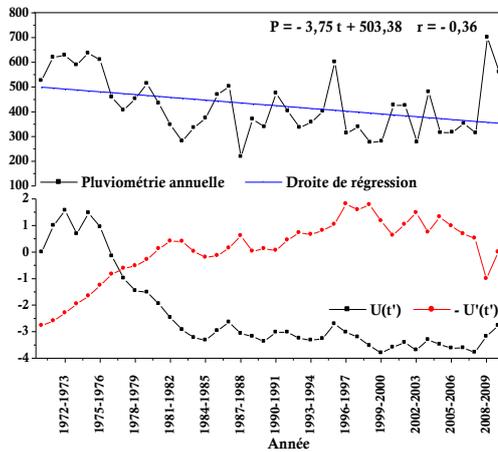
Pierre du Chat



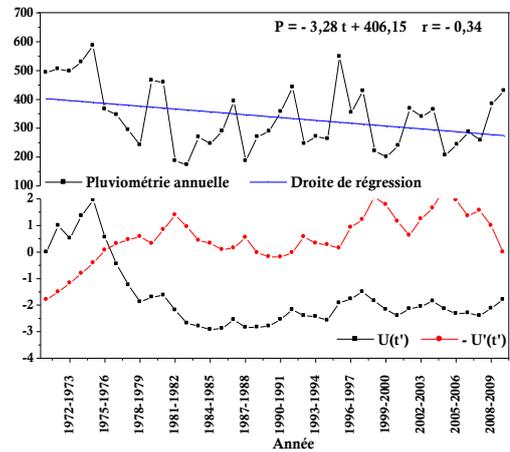
Mefrouche



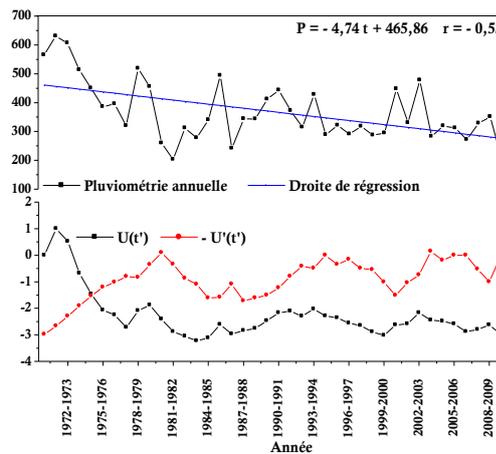
Oued Chouly



Maghnia



Ghazaouet



Etude de la tendance des totaux pluviométriques annuels des stations de Pierre du Chat, de Mefrouche, d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet par le test de Mann-Kendall. Période d'étude (1970-2010).

Annexe.10*Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles pluviométriques*

Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles pluviométriques.
Période d'étude 1941-2006.

Bensekrane		1941- 2006 (mm)	Avant rupture 1941-1965 (mm)	Après rupture 1965-2006 (mm)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	65,54	93,25	49,32	47,12
	Janvier	58,57	75,54	48,63	35,61
	Février	57,21	59,04	56,13	4,92
		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1976 (mm)	Après rupture 1976-2006 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	56,91	68,35	43,56	36,27
	Avril	42,54	51,66	31,91	38,23
	Mai	34,41	39,23	28,80	26,59

Ouled Mímoun		1941- 2006 (mm)	Avant rupture 1941-1966 (mm)	Après rupture 1966-2006 (mm)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	52,19	72,86	39,27	46,11
	Janvier	51,67	70,45	39,93	43,32
	Février	50,21	53,92	47,89	11,18
		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1982 (mm)	Après rupture 1982-2006 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	50,32	58,60	36,18	38,26
	Avril	44,35	54,14	27,62	48,99
	Mai	38,84	44,54	29,10	34,64
		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1979 (mm)	Après rupture 1979-2006 (mm)	Déficit (%)
Eté	Juin	10,96	14,13	6,98	50,61
	Juillet	4,27	5,80	2,34	59,69
	Aout	5,09	6,06	3,91	35,48

Béni-Bahdel		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1974 (mm)	Après rupture 1974-2006 (mm)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	66,40	88,48	43,64	50,67
	Janvier	64,06	76,65	51,08	33,36
	Février	59,89	61,85	51,78	16,28
		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1976 (mm)	Après rupture 1976-2006 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	66,75	77,19	54,57	29,31
	Avril	54,68	73,39	32,85	55,24
	Mai	44,83	50,47	38,24	24,23

Zenata		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1980 (mm)	Après rupture 1980-2006 (mm)	Déficit (%)
Automne	Septembre	18,77	22,67	12,92	42,99
	Octobre	45,35	62,62	19,46	68,92
	Novembre	52,05	56,62	45,19	20,18
		1941- 2006 (mm)	Avant rupture 1941-1972 (mm)	Après rupture 1973-2006 (mm)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	74,54	112,06	38,15	65,96
	Janvier	67,26	93,66	41,67	55,51
	Février	61,23	72,69	50,12	31,05
		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1976 (mm)	Après rupture 1976-2006 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	67,08	85,14	46,00	45,97
	Avril	67,54	96,20	34,10	64,55
	Mai	49,45	67,74	28,10	58,52
		1941-2006 (mm)	Avant rupture 1941-1977 (mm)	Après rupture 1977-2006 (mm)	Déficit (%)
Eté	Juin	11,48	16,75	4,93	70,56
	Juillet	2,09	2,78	1,24	55,31
	Août	4,91	5,94	3,62	39,09

Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles pluviométriques.
Période d'étude 1970-2010.

Pierre du Chat		1970- 2010 (mm)	Avant rupture 1970-1977 (mm)	Après rupture 1977-2010 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	46,33	79,11	39,37	50,24
	Avril	33,89	66,69	26,93	59,61
	Mai	23,54	36,40	20,81	42,84
Mefrouche		1970- 2010 (mm)	Avant rupture 1970-1976 (mm)	Après rupture 1976-2010 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	99,54	207,23	80,53	61,14
	Avril	66,96	141,38	53,83	61,93
	Mai	56,06	88,88	50,26	43,45
Oued Chouly		1970- 2010 (mm)	Avant rupture 1970-1977 (mm)	Après rupture 1977-2010 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	63,96	128,20	50,33	60,74
	Avril	43,88	82,34	35,72	56,62
	Mai	37,11	56,93	32,91	42,20
Maghnia		1970- 2010 (mm)	Avant rupture 1970-1981 (mm)	Après rupture 1981-2010 (mm)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	35,14	48,59	30,04	38,15
	Janvier	40,81	45,48	39,04	14,16
	Février	42,18	68,72	32,12	53,26
		1970-2010 (mm)	Avant rupture 1970-1978 (mm)	Après rupture 1978-2010 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	43,77	63,26	38,89	38,52
	Avril	45,13	88,61	34,27	61,33
	Mai	32,96	49,73	28,76	42,15
Ghazaouet		1970- 2010 (mm)	Avant rupture 1970-1980 (mm)	Après rupture 1980-2010 (mm)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	48,50	77,07	38,97	49,43
	Janvier	40,91	41,05	40,86	0,45
	Février	54,58	73,53	48,26	34,37
		1970-2010 (mm)	Avant rupture 1970-1994 (mm)	Après rupture 1994-2010 (mm)	Déficit (%)
Printemps	Mars	55,76	64,26	42,99	33,10
	Avril	36,06	45,30	22,19	51,01
	Mai	25,29	32,08	15,10	52,91

Annexe.11*Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles hydrométriques*

Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles hydrométriques.
Période d'étude 1912-2000.

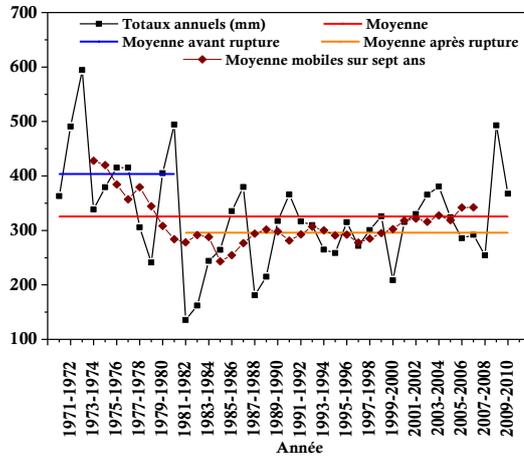
Remchi		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1963 (m³/s)	Après rupture 1963-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Automne	Septembre	0,61	0,76	0,41	46,91
	Octobre	1,17	1,54	0,66	57,14
	Novembre	2,03	2,59	1,27	51,05
		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1962 (m³/s)	Après rupture 1962-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	3,90	5,14	2,27	55,90
	Janvier	5,05	6,83	2,70	60,56
	Février	7,66	10,67	3,69	65,37
		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1976 (m³/s)	Après rupture 1976-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Printemps	Mars	6,57	7,92	2,96	62,65
	Avril	6,15	8,00	1,23	84,66
	Mai	4,00	5,21	0,78	84,96
		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1976 (m³/s)	Après rupture 1976-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Eté	Juin	1,24	1,59	0,30	80,90
	Juillet	0,48	0,63	0,10	84,10
	Aout	0,31	0,42	0,02	95,46
Pierre du Chat		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1964 (m³/s)	Après rupture 1964-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	5,62	6,41	4,42	30,97
	Janvier	8,99	11,66	4,94	57,59
	Février	12,32	16,28	6,31	61,27
		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1975 (m³/s)	Après rupture 1975-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Printemps	Mars	16,87	19,72	9,70	50,81
	Avril	14,19	18,88	2,35	87,54
	Mai	9,42	12,30	2,15	82,48
		1912-2000 (m³/s)	Avant rupture 1912-1977 (m³/s)	Après rupture 1977-2000 (m³/s)	Déficit (%)
Eté	Juin	2,56	3,25	0,61	81,18
	Juillet	0,97	1,23	0,23	81,03
	Aout	0,82	1,05	0,18	82,60

Déficits et variations des moyennes des répartitions mensuelles hydrométriques.
Période d'étude 1973-2009.

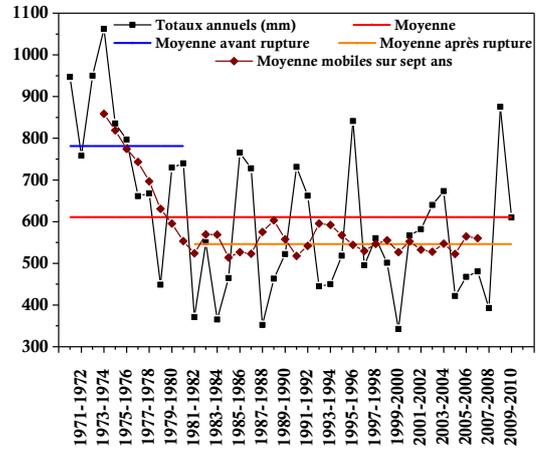
Béni-Bahdel		1973 2009 (m³/s)	Avant rupture 1973-1983 (m³/s)	Après rupture 1983-2009 (m³/s)	Déficit (%)
Automne	Septembre	0,53	0,68	0,47	31,01
	Octobre	0,74	0,72	0,75	+3,82
	Novembre	0,59	0,86	0,48	43,53
		1973 2009 (m³/s)	Avant rupture 1973-1988 (m³/s)	Après rupture 1988-2009 (m³/s)	Déficit (%)
Hiver	Décembre	0,79	0,94	0,69	26,56
	Janvier	1,09	1,26	0,97	23,19
	Février	1,39	2,16	0,84	61,13
		1973 2009 (m³/s)	Avant rupture 1973-1982 (m³/s)	Après rupture 1982-2009 (m³/s)	Déficit (%)
Printemps	Mars	1,79	3,21	1,31	59,13
	Avril	1,17	2,64	0,68	74,17
	Mai	0,81	1,56	0,56	64,22
		1973 2009 (m³/s)	Avant rupture 1973-1987 (m³/s)	Après rupture 1987-2009 (m³/s)	Déficit (%)
Eté	Juin	0,52	0,77	0,36	53,15
	Juillet	0,36	0,60	0,22	63,77
	Aout	0,36	0,52	0,26	49,81

▪ Méthode des moyennes mobiles sur sept ans

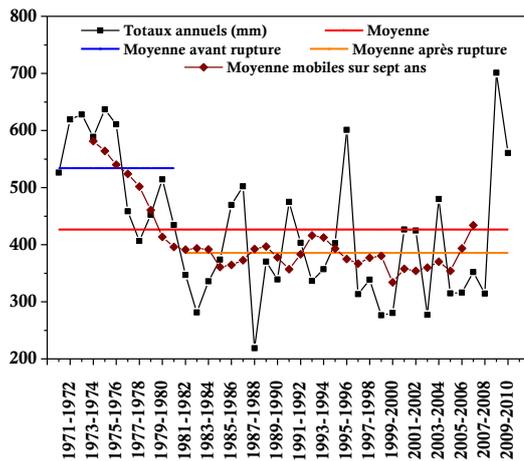
Pierre du Chat



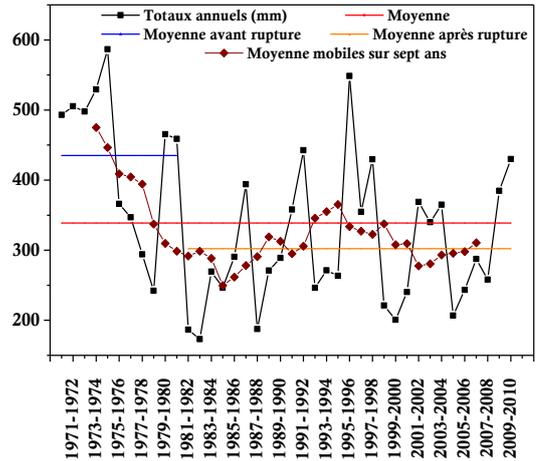
Mefrouche



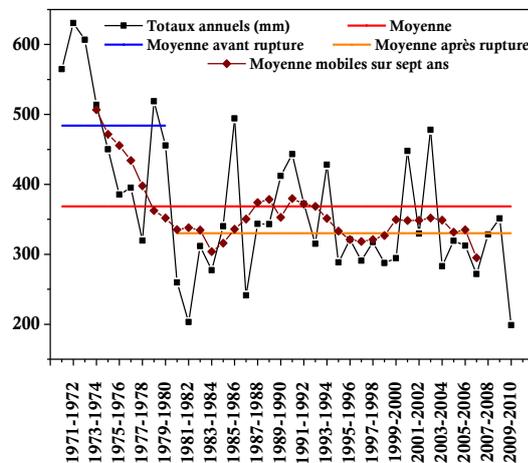
Oued Chouly



Maghnia

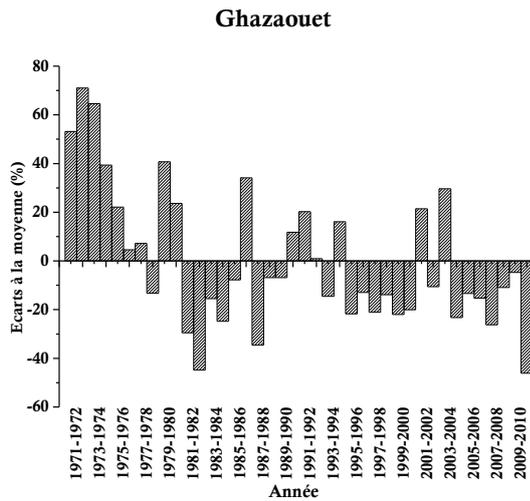
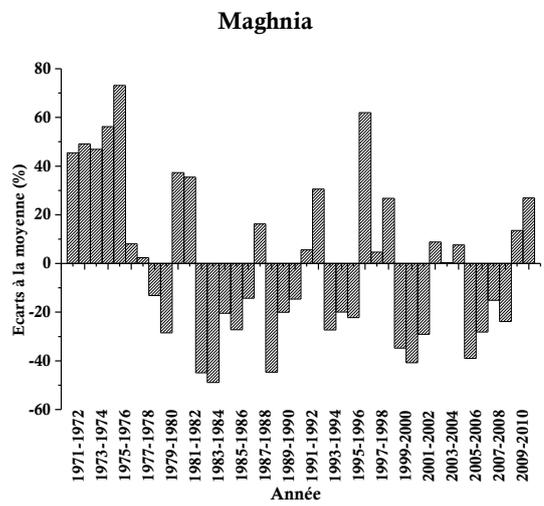
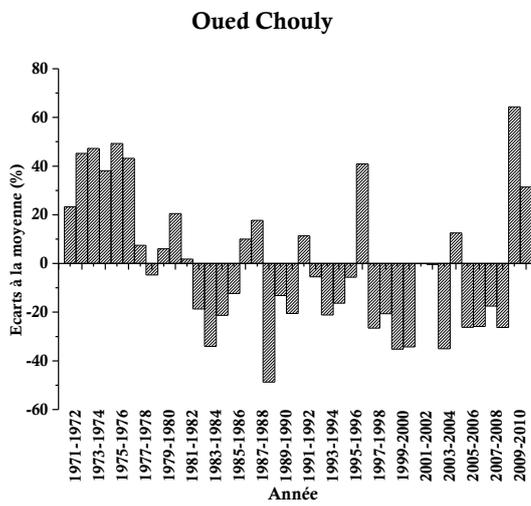
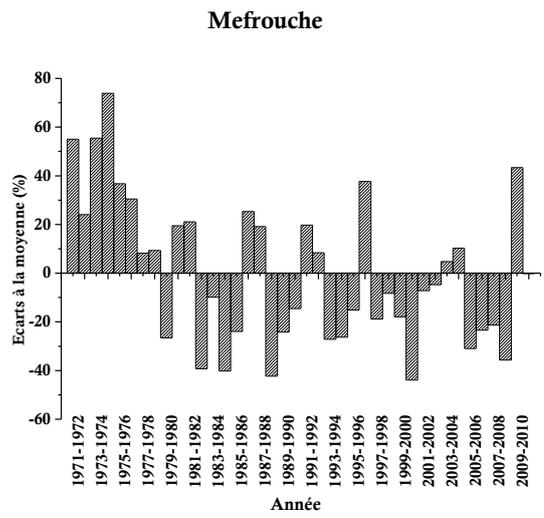
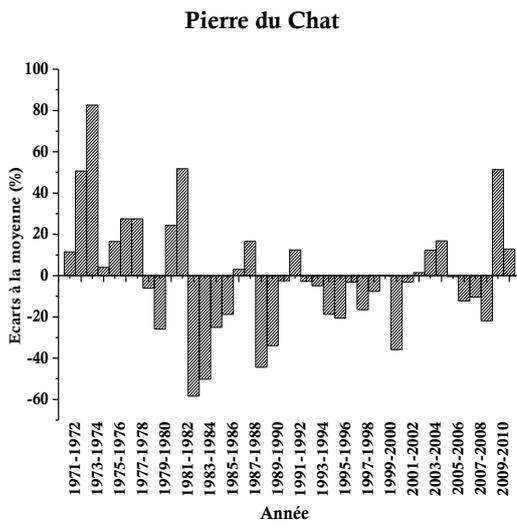


Ghazaouet



Variabilité interannuelle des totaux pluviométriques annuels des stations de Pierre du Chat, de Mefrouche, d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet. Période d'étude (1970-2010).

▪ Ecart moyen relatif



Ecart moyen relatif de la pluviométrie annuelle des stations de Pierre du Chat, de Mefrouche, d'Oued Chouly, de Maghnia et de Ghazaouet. Période d'étude (1970-2010).

▪ **Loi normale ou loi de Gauss**

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \dots\dots\dots(13. 1)$$

Avec $u = \frac{x-\bar{X}}{S_e}$

u: Variable réduite de Gauss ;

\bar{X} : Moyenne de l'échantillon ;

S : Ecart-type de l'échantillon.

Détermination des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

Moyenne : $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ (13. 2) avec n, nombre d'observation dans l'échantillon

$$\text{Ecart-type : } S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \dots\dots\dots(13. 3)$$

▪ **Loi log-normale ou loi de Galton**

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \dots\dots\dots(13. 4)$$

$u = a \log(X - X_0) + b$ L'intervalle de définition : $X \in]X_0, +\infty[$

On opère un changement de variable par rapport à la loi normale en prenant comme variable gaussienne le logarithme ou une fonction linéaire du logarithme de la variable étudiée.

Détermination des paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance

On obtient trois équations à trois inconnues, a et b :

$$2,3026 \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i - x_0} \right] \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log^2(x_i - x_0) - \frac{1}{n^2} (\sum_{i=1}^n \log(x_i - x_0))^2 \right] = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \log(x_i - x_0) \right] \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i - x_0} \right] - \sum_{i=1}^n \frac{\log(x_i - x_0)}{x_i - x_0} \dots\dots\dots(13. 5)$$

$$a^2 = \frac{1}{\frac{1}{n} S \log^2(X_i - X_0) - \frac{1}{n^2} [S \log(X_i - X_0)]^2} \dots\dots\dots(13. 6)$$

$$b^2 = - \frac{a S \log(X_i - X_0)}{n} \dots\dots\dots(13. 7)$$

L'équation (13. 5) ne dépend que X_0 de mais on doit la résoudre par approximations successives. Connaissant X_0 , la formule (13. 6) permet d'évaluer a ; enfin, avec X_0 et a, on détermine b par la formule (13. 7).

▪ **Loi Exponentielle**

$$F(X) = e^{-A(x-\alpha)^{\frac{1}{n}}} \dots\dots\dots(13. 8)$$

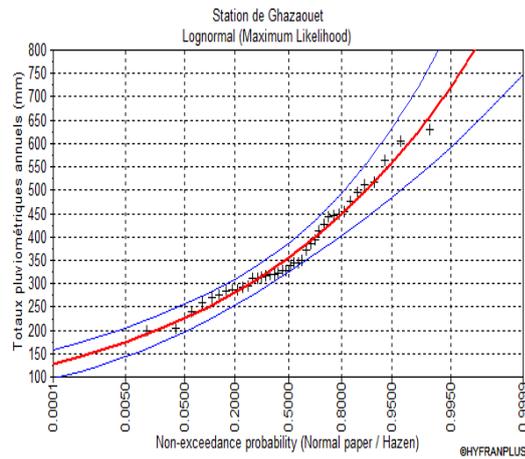
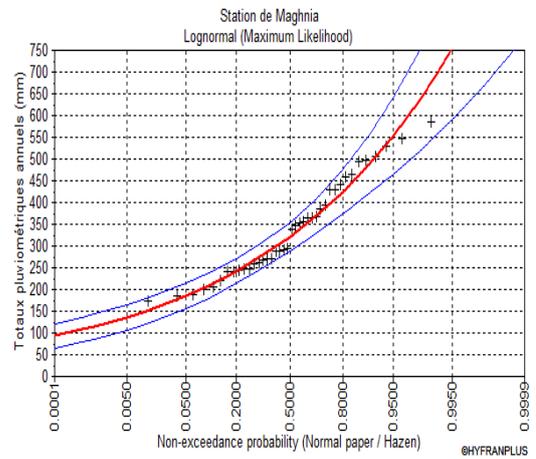
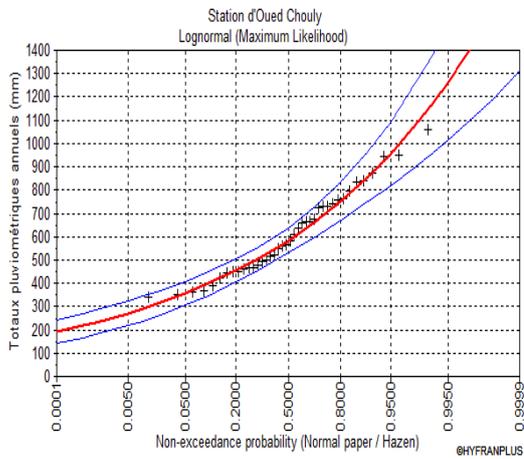
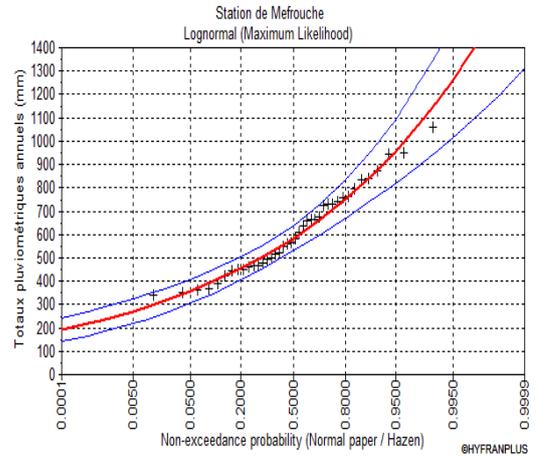
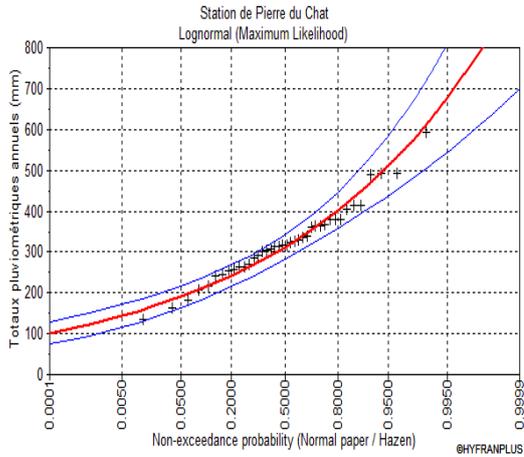
Estimation des paramètres

Les paramètres peuvent être estimés à partir de la moyenne arithmétique \bar{X} et des moments centrés de second ordre σ^2 et de troisième ordre μ^3 .

\bar{X} , S et μ^3 sont estimés à partir des observations qui composent l'échantillon.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots (13. 9) ; S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots (13. 10) \text{ et } \mu^3 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \dots (13. 11)$$

▪ Etude fréquentielle des précipitations



Ajustement graphique des totaux pluviométriques annuels à la loi log-normale.
Période d'étude (1970-2010).

Modélisation et régionalisation de la relation « pluie-débit » face au changement climatique : Impact sur les ressources en eau.

Résumé

Cette étude consiste à modéliser et à régionaliser la relation pluie-débit sous l'effet de changements climatiques et à analyser leur impact sur les ressources en eau. Les différentes recherches consacrées à l'analyse de la variabilité pluviométrique, en Algérie et particulièrement dans la partie occidentale du pays, montrent l'instauration d'une tendance à la baisse depuis les années 70. Cette dernière s'est répercutée sur les écoulements des Oueds.

Pour parvenir à analyser cette thématique, le travail s'articule autour de deux axes principaux visant (i) à analyser dans un premier temps la dynamique de la transformation de la lame d'eau précipitée en lame d'eau écoulée à l'échelle du bassin versant ; (ii) à exposer l'impact de cette transformation sur les ressources en eau. Le bassin versant de la Tafna est pris comme champ expérimental. L'approche adoptée consiste à analyser la variable hydro-pluviométrique à l'aide des méthodes statistiques, à modéliser, à tester la non stationnarité et à régionaliser la relation pluie-débit.

Les résultats des différentes méthodes statistiques appliquées aux séries de variables pluviométrique et hydrométrique montrent une diminution depuis le milieu des années 1970 et le début des années 1980. Le déficit pluviométrique annuel a atteint des valeurs moyennes de 38,11% durant la période 1941-2006 et 29,39% durant la période allant de 1970 à 2010. Les débits moyens annuels des Oueds quant à eux présentent des déficits moyens de 61,10% entre 1912 et 2000 et 53,13% entre 1973 et 2009. Le modèle conceptuel GR2M a simulé d'une manière acceptable les hydrogrammes observés en donnant des débits calculés, en calage comme en validation, proches par des valeurs supérieures ou inférieures aux débits observés. La régionalisation des paramètres de calage du modèle GR2M en utilisant l'information contenue dans les descripteurs des sous bassins jaugés et en faisant appel à la méthode de régression linéaire a donné des équations de prédétermination permettant le transfert vers un sous bassin mal jaugé. Le résultat de la régionalisation du modèle est jugé satisfaisant.

Mots clés : Bassin de la Tafna ; Pluie-débit ; Variabilité hydro-pluviométrique ; Modélisation conceptuelle ; Régression

نمذجة والأقلمة علاقة "أمطار-جريان" أمام تغير المناخ: تأثير على الموارد المائية.

المخلص

تعتمد هذه الدراسة على نمذجة وأقلمة العلاقة بين الأمطار وجريان المياه تحت تأثير التغيرات المناخية وتحليل أثرها على الموارد المائية. تظهر مختلف البحوث المكرسة لتحليل التغيرات المطرية في الجزائر وخصوصا في الجزء الغربي من البلاد، سيطرة الاتجاه التنازلي منذ 1970. حيث انعكس هذا الأخير على جريان الأودية.

لتحليل هذا موضوع، استند العمل على محورين أساسيين هادفا (i) في البداية بذلك على تحليل ديناميات تحول كمية الماء المتساقط إلى ماء جار على مستوى مستجمع مائي (ii)، عرض أثر هذا التحول على الموارد المائية. تم أخذ المستجمع مائي لتافنة كمجال تجريبي. تتمثل الطريقة المعتمدة في تحليل المتغير الهيدرولوجي باستخدام طرق إحصائية، نمذجة، اختبار عدم الثبات والعلاقة وأقلمة علاقة الأمطار-الريان.

تشير مختلفة نتائج الطرق الإحصائية المطبقة على سلسلة المتغيرات المطرية و الهيدرومترية أن هذه الأخيرة أخذت في التناقص منذ منتصف 1970 و بداية 1980. العجز السنوي لهطول الأمطار بلغ قيم وسطى 38,11% خلال الفترة 1941-2006 و 29,39% خلال الفترة الممتدة ما بين 1970 و 2010. متوسط التدفق السنوي للأودية بدوره بلغ متوسط عجز 61,10% بين 1912 و 2000، و 53,13% بين عامي 1973 و 2009. النموذج النظري GR2M حاكى بشكل مقبول منحى الجريان الملاحظ معطيا جريان محاكى، في التوتيد كما في التثبيت، قريب بقيم أعلى أو أدنى من الجريان الملاحظ. أقلمة معاملة معايرة النموذج GR2M باستخدام المعلومات الواردة في مواصفات الأحواض الفرعية المقاسة باستخدام أسلوب الانحدار الخطي أعطت التحديد المسبق للمعادلات سمحت بالانتقال الى حوض شبه مقياس. تعتبر نتيجة أقلمة النموذج مرضية.

كلمات المفتاحية: حوض تافنة؛ أمطار- جريان؛ تقلب جريان- الأمطار؛ النموذج النظري؛ ارتداد

Modeling and regionalization of "rainfall-runoff" relation in front to climate change: Impact on water resources.

Abstract

This study consists of modeling and regionalizing the rainfall-runoff relation under the effect of climate change and analyzing their impact on water resources. The various researches devoted to the analysis of rainfall variability, in Algeria and particularly in the western part of the country, show a downward trend since the 1970s. The latter was reflected on the runoff of the wadis.

In order to analyze this topic, the work is articulated around two aiming main axes (i) to analyze in the first stage the dynamics of the transformation of the precipitated water into water drained at the scale of watershed; (ii) to expose the impact of this transformation on water resources. The Tafna basin is taken as an experimental field. The approach adopted is to analyze the hydro-rainfall variable using statistical methods, to model, to test the non-stationarity and to regionalize the rainfall-runoff relation.

The results of the different statistical methods applied to the series of rainfall and hydrometric variables show a decrease since the mid-1970s and early 1980s. The annual rainfall deficit reached average values of 38,11% during the period 1941-2006 and 29,39% during the period from 1970 to 2010. The average annual runoff of the Wadis has average deficits of 61,10% between 1912 and 2000 and 53,13% between 1973 and 2009. The GR2M conceptual model has simulated the observed hydrographs in an acceptable manner by giving calculated runoff, in calibration as in validation, by values greater or less than the observed flows. The regionalization of the calibration parameters of the GR2M model using the information contained in the descriptors of the subgauged sub-basins and using the linear regression method gave predetermination equations allowing the transfer to the ungauged sub-basin. The result of the regionalization of the model is considered satisfactory.

Keywords: Tafna basin; Rainfall-runoff; Hydro-rainfall variability; Conceptual modeling; Regression.