



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بوعلي – الشلف –

Université Hassiba Ben Bouali Chlef

معهد العلوم الزراعية

Institut des Sciences Agronomiques

Département : SCIENCES AGRONOMIQUES

Mémoire en Vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : Hydraulique Agricole

Option : Hydrologie et Aménagement des Bassins Versants

Thème

**Ajustement des modèles de séries temporelles pour
prévoir les apports liquides du Barrage Hammam**

Présenté par : Mr. DAHKAL Ilyes

Devant le Jury composé de :

Mr. BOUTHIBA Abdelkader	Professeur	UHBC, Chlef	Président
Mr. HOUICHI Larbi	Professeur	UHL, Batna	Directeur de thèse
Mr. ACHITE Mohammed	MCA	UHBC, Chlef	Examineur
Mr. DJEMILI Lakhdar	Professeur	UBM, Annaba	Examineur
Mr. BENZERGA Noureddine	MAA	UHBC, Chlef	Examineur

Année universitaire : 2014–2015

DÉDICACE

*Avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail
à mes chères parents.*

*Pour ces deux être les plus chères de ma vie, pour leurs sacrifices,
et leurs soutient tout au long de mes études.*

A mon chère frère Ayoub.

A tout ma grande famille DAHKAL ET SAMAI

D'ici ou d'ailleurs vous seraient toujours proche de moi.

A tous mes chères amies sans exception

A toutes mes collègues et enseignants de la promotion de magistère

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse HOUICHI Larbi, Professeur au département d'Hydraulique de l'Université de Batna qui a consacré à l'encadrement de mon mémoire un temps et une disponibilité considérables, j'ai ainsi largement pu profiter de sa grande acuité scientifique. Je lui suis donc reconnaissant d'avoir pu achever ma thèse dans des conditions acceptables malgré le retard.

Je remercie tous les membres du jury d'avoir accepté l'invitation à participer à mon jury de Magistère : M. Bouthiba Abdelkader, président de jury, professeur à l'université de Chlef, M. Achite Mohammed, examinateur, maître de conférence à l'université de Chlef, M. Djemili Lakhdar, examinateur, professeur de l'université d'Annaba, M. Benzerga Nouredine, examinateur, maître assistant à l'université de Chlef.

Mes remerciements vont encore une fois à M. Achit Mohammed et M. Nedjai Sasi pour les efforts qu'ils ont manifestés et leurs conseils durant l'année théorique.

Mes remerciements à mes collègues et aux enseignants de la promotion de Magistère, surtout M. Bradai, Mme. Touaibia, M. Douaoui, et M. Germah.

Je remercie mes parents pour les sacrifices qu'ils ont faits depuis que je suis né jusqu'à ce jour-là.

Il m'est agréable d'exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé à élaborer ce mémoire et à toute personne ayant participé à ma formation éducative et scientifique.

RESUME

Dans le bassin versant Oued Bouhamdane, les débits mensuels observés à la station hydrométrique Medjez Amar II ainsi que les apports liquides du barrage Hammam Debagh ont été modélisés par le modèle conceptuel GR2M et les modèles ARIMA. Le modèle GR2M a prouvé son adéquation pour les débits mensuels avec un Nash qui s'élève à 78.5% quoi qu'il ne reproduise pas les valeurs extrêmes. Par contre les modèles ARIMA se sont démontré plus commodes à l'échelle décadaire et surtout journalière où les apports liquides sont caractérisés par une forte dépendance entre les observations successives. Cette commodité est justifiée au pas de temps journalier par une faible RMSE de 0.5 mm et un rapport des coefficients de variation (I) de 1.05 très proche de l'unité, ce qui indique que le modèle ARIMA journalier surmonte la contrainte des valeurs fortes. Les apports liquides décadaires et mensuels simulés peuvent être déduits des valeurs journalières simulées par simple cumul.

Mots clés : Débit, Apport liquide, Modèle conceptuel, Série temporelle, Modélisation, Simulation, Oued Bouhamdane, Barrage Hammah Debagh.

ملخص:

باستعمال النموذج التصوري GR2M و نماذج السلاسل الزمنية ARIMA، تمت نمذجة التدفقات الشهرية لوادي بوحمدان المسجلة في محطة قياس الجريان مجاز عمار 2 و كذا التصاريف الوافدة على سد حمام دباغ. أثبت النموذج GR2M صلاحيته بالنسبة للتدفقات الشهرية بمعيار Nash و صل إلى مقدار 78.5% إلا أنه لا ينمذج القيم الأعظمية. في حين أثبتت نماذج ARIMA نجاعتها بالنسبة لسلم 10 أيام و خصوصا السلم اليومي حيث تمتاز الوافدات اليومية من التصاريف بتراطبات شديد بين قيمها المتلاحقة. بررت هذه النجاعة المتعلقة بالزمن اليومي بقيمة دنيا لـ RMSE تقدر بـ 0.5 مم و نسبة معاملات التغير لا تختلف عن الوحدة وهي 1.05 مبينة أن النموذج اليومي ARIMA يتخطى عائق القيم الكبرى كما يمكن استخلاص قيم 10 أيام و القيم الشهرية بمجرد جمع قيم المحاكاة اليومية.

كلمات مفتاحية : جريان، الوافد المائي، نموذج تصوري، سلسلة زمنية، نمذجة، محاكاة، وادي بوحمدان، سد حمام دباغ.

ABSTRACT

In Oued Bouhamdane watershed, monthly streamflow observed at the gauging station Medjez Amar II and liquid inflow of Hammam Debagh dam were modeled by the GR2M conceptual model and ARIMA models. The GR2M model has proven suitability for monthly streamflow with Nash which rises to 78.5% whatever it does not reproduce the extreme values.

As against the ARIMA models have shown more convenient for decadal scale and especially for daily scale where daily liquid inflows are characterized by a strong dependence between successive observations. This convenience is justified in daily time step by a low RMSE of 0.5 mm and by ratio coefficients of variation (I) of 1.05 which is very close to unity, indicating that the daily ARIMA model overcomes the constraint of strong values. Decadal and monthly simulated liquid inflows can be derived from daily simulated values by mere summation.

Keywords:

Streamflow, Fluid inflow, Conceptual Model, Time Series, Modelling, Simulation, Oued Bouhamdane Hammah Debagh Dam.

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

- ABH** Agence des **B**assins **H**ydrographiques
- ANB** Agence Nationale des **B**arrages
- ANBT** Agence Nationale des **B**arrages et **T**ransferts
- ANRH** Agence Nationale des **R**essources **H**ydrauliques
- ARIMA** Auto-**R**egressive **I**ntegrated **M**oving **A**verage
- ETP_ANRH** Evapotranspiration évaluée par la relation de l'ANRH
- ETP_PM56** Evapotranspiration évaluée par la relation de Penman-Monteith (FAO56)
- FAO** Food and **A**griculture **O**rganization
- GR2M** Génie **R**ural à **2** paramètres à l'échelle **M**ensuelle
- ONM** Office National de la **M**étéorologie
- PNE** Plan National de l'**E**au
- X1** Capacité du réservoir de production (mm)
- X2** Coefficient d'échanges souterrains

SOMMAIRE

Introduction générale	01
PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE (BASSIN VERSANT OUED BOUHAMDANE) ET DU BARRAGE HAMMAM DEBAG	
CHAPITRE I :PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE (BASSIN VERSANT OUED BOUHAMDANE) ET DU BARRAGE HAMMAM DEBAGH	03
I.1. Introduction.....	03
I.2. Le bassin versant Oued Bouhamdane dans le contexte général du territoire national.....	03
I.2.1. Présentation géographique du bassin versant et délimitation	05
I.2.2. Les caractéristiques de la disposition dans les plans du bassin Oued Bouhamdane.....	07
a. Le Périmètre et la Surface.....	07
b. La forme	07
c. Les indices de pente	07
c.1. L'indice de pente de Roche.....	07
c.2. L'indice de pente global.....	08
d. Densité de drainage	08
e. Le temps de concentration	09
I.3. Présentation du Barrage Hammam Debagh.....	09
I.3.1. Situation géographique	09
I.3.2. Topographie	10
I.4. Les caractéristiques techniques du barrage.....	11
I.4.1. Historique.....	11
I.4.1.1. Les études.....	11
I.4.1.2. Les travaux de génie civil	12
I.4.1.3. L'équipement hydro – mécanique et électrique.....	12
I.4.2. L'aménagement.....	13
I.5. La digue	13
I.6. Conclusion	15
CHAPITRE II : COLLECTE DES DONNEES NECESSAIRES POUR L'ELABORATION DE LA PRESENTE ETUDE	16
II.1. Introduction	16

II.2. Les sources des données concernant essentiellement la pluie, l'évapotranspiration et le débit (apport liquide).....	16
II.2.1. Disposition des diverses stations de mesure des pluies et des débits dans la zone d'étude.....	16
II.2.2. Données concernant la pluviométrie	17
II.2.2.1. Période commune (1974/75-1980/81)	18
II.2.2.2. Période commune (1990/91-1998/99)	18
II.2.2.3. Période commune (1990/91-2010/11)	19
II.3. Données concernant l'hydrométrie.....	19
II.4. Variabilité des apports liquides aux différents pas de temps au sein du Barrage Hammam Debagh	21
II.4.1. Variabilité des apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	22
II.4.2. Variabilité des apports liquides décennaires au sein du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	22
II.4.3. Variabilité des apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	23
II.5. Données concernant l'évapotranspiration.....	24
II.5.1. Evaluation de l'Evapotranspiration potentielle par la formule de Penman-Monteith (FAO56) : (ETP_PM56).....	24
II.5.2. Evaluation de l'Evapotranspiration potentielle par la formule de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ETP_ANRH).....	25
II.6. Conclusion	28
CHAPITRE III : NOTIONS LIEES A LA MODELISATION BASEE SUR LES MODELES CONCEPTUELS ET LES ANALYSES DES SERIES TEMPORELLES ET APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE.....	29
III.1. Introduction	29
III.2. Notions liées à la modélisation basée sur les modèles conceptuels et les analyses des séries temporelles	29
III.2.1. Notions liées à la modélisation basée sur les modèles conceptuels	29
III.2.1.1. Définition d'un modèle conceptuel	29
III.2.1.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	30
III.2.1.3. Applications du modèle GR2M.....	33
III.2.2. Notions liées à la modélisation basée sur les analyses des séries temporelles.....	34

III.2.2.1. Modèle ARIMA	34
III.2.2.2. Notion de normalisation	35
III.2.2.3. Notion de transformation	35
III.2.2.4. Notion de stationnarité	35
III.2.2.5. Tests de stationnarité	35
III.2.2.6. Notion de différenciation	36
III.2.2.7. Notion d'auto-régression	36
III.2.2.8. Notion de moyenne mobile	36
III.2.2.9. Fonction auto-corrélation et auto-corrélations partielles (ACF et PACF)	37
III.2.2.10. Périodogramme	38
III.2.2.11. Périodogramme cumulé.....	39
III.2.2.12. Critère de choix des modèles de prévision type ARIMA.....	39
III.3. Aperçu bibliographique	40
III.3.1. Modèles conceptuels	40
III.3.2. Modèles ARIMA.....	40
III.4. Conclusion.....	41
CHAPITRE IV : ADAPTATION D'UN MODELE CONCEPTUEL AU MINIMUM DE PARAMETRES PAR SON APPLICABILITE AU BASSIN VERSANT OUED BOUHAMDANE	42
IV.1. Introduction	42
IV.2. Procédure de modélisation conceptuelle retenue	42
IV.3. Quelques critères de performances pour juger la conceptualisation.....	43
IV.3.1. Les critères graphiques.....	43
IV.3.2. Les critères numériques.....	43
IV.3.2.1. Critère de Nash (NS).....	44
IV.3.2.2. Le coefficient de détermination (R ²)	44
IV.3.2.3. Le coefficient de corrélation (R)	44
IV.3.2.4. La racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)	44
IV.3.2.5. La moyenne biaisée (B)	45
IV.3.2.6. Le rapport des coefficients de variation (I)	45
IV.4. Modèle conceptuel pour la période (1974/75-1980/81) appliqué à la station Medjez Amar II (Superficie contrôlée de 1105 km ²)	45
IV.5. Modèle conceptuel pour la période (1990/91-1998/99) appliqué au sein du barrage Hammam Debagh (Superficie contrôlée de 1070 km ²).....	52

IV.6. Modèle conceptuel pour la période (1990/91-2010/11) appliqué au sein du barrage Hammam Debagh (Superficie contrôlée de 1070 km ²).....	55
IV.7. Conclusion	61
CHAPITRE V : ELABORATION DES MODELES DE SERIES TEMPORELLES POUR LA PREVISION DES APPORTS LIQUIDES DU BARRAGE HAMMAM DEBAGH	64
V.1. Introduction	64
V.2. Aperçu descriptif de STATGRAPHICS® Centurion XVI	65
V.3. Analyses de séries temporelles et prévisions des débits à l'échelle mensuelle.....	65
V.3.1. Application aux débits mensuels observés pendant la période (1974/75-1980/81) à la station hydrométrique Medjez Amar II.....	65
a. Tests de stationnarité	66
b. Fonctions d'autocorrélation, d'autocorrélation partielles et périodogramme	66
V.3.2. Application aux apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	69
a. Tests de stationnarité	70
b. Fonctions d'autocorrélation, d'autocorrélation partielles et périodogramme	70
V.3.3. Application aux apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11) et mise en évidence de l'effet de la taille de la série.....	73
a. Tests de stationnarité	73
b. Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme	73
V.4. Analyses de séries temporelles des apports liquides à des échelles plus courtes au sein du barrage Hammam Debagh.....	77
V.4.1. Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	78
V.4.1.1 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux bruts	79
V.4.1.2 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux normalisés.....	80
V.4.1.3 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux différenciés	81
V.4.1.4 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux transformés	83
V.4.2. Analyses de séries temporelles des apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	87
V.4.2.1. Analyses de séries temporelles des apports liquides journaliers transformés	89
V.5. Conclusion.....	93

CHAPITRE VI : MISE EN EXPLOITATION DES MODELES ETABLIS POUR LA PREVISION DES APPORTS LIQUIDES DU BARRAGE HAMMAM DEBAGH ET RECOMMANDATIONS	94
VI.1. Introduction	94
VI.2. Rappels des résultats établis des différentes modélisations	94
VI.2.1. Résultats établis par le modèle conceptuel GR2M	94
VI.2.2. Résultats établis par les modèles de séries temporelles type ARIMA	94
a. A L'échelle mensuelle	94
b. A L'échelle décadaire	95
c. A L'échelle journalière.....	95
VI.3. Mise en exploitation des modèles choisis pour la prévision des débits	95
VI.3.1. Exploitation des modèles conceptuels (GR2M) pour la prévision des débits mensuels	95
VI.3.1.1. Exploitation pas à pas des modèles conceptuels (GR2M) pour la prévision des débits mensuels	95
VI.3.1.2. Génération synthétique des débits mensuels par les modèles conceptuels (GR2M)	95
VI.3.2. Exploitation des modèles type ARIMA pour la prévision des apports liquides	96
VI.3.2.1. Exploitation du modèle ARIMA(1,0,0) pour la prévision des apports liquides journaliers.....	96
VI.3.2.1.1. Exploitation pas à pas du modèle ARIMA(1,0,0) pour la prévision des apports liquides journaliers	96
VI.3.2.1.1. Génération synthétique des apports liquides journaliers par le modèle ARIMA(1,0,0).....	97
VI.4. Conclusions et recommandations.....	100
Conclusion générale	101
Annexes	104
Bibliographie	111

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Bassins hydrographiques Algériens selon l'ABH	03
Figure 1.2. Grands bassins versants de l'Algérie selon l'ANRH.....	04
Figure 1.3. Contribution de l'oued Bouhamdane à l'alimentation du Seybouse	05
Figure 1.4. L'oued Bouhamdane et ses affluents	05
Figure 1.5. Localisation géographique du bassin versant Oued Bouhamdane dans la Seybouse.....	06
Figure 1.6. Localisation du barrage Hammam Debagh.....	10
Figure 1.7. Relief du bassin versant de l'Oued Bouhamdane au site.....	11
Figure 1.8. Travaux génie civil du Barrage Hammam Debagh ; Source : ANB (1985)	12
Figure 1.9. Disposition générale des ouvrages.....	13
Figure 1.10. Coupe en travers du Barrage Hammam Debagh	14
Figure 2.1. Répartition des stations pluviométriques et hydrométriques dans la zone d'étude.....	17
Figure 2.2. Stations de mesures hydrométriques.....	20
Figure 2.3. Visualisation des apports liquides journaliers du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation	22
Figure 2.4. Visualisation des apports liquides décennaires du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	23
Figure 2.5. Visualisation des apports liquides mensuels du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	24
Figure 2.6. Evolution du coefficient correctif mensuel (Km).....	26
Figure 2.7. Comparaison l'évolution des ETP évaluées simultanément par les deux relations de ETP_PM56 et ETP_ANRH.....	28
Figure 3.1. Schéma de la structure du modèle GR2M selon	31
Figure 4.1. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	46
Figure 4.2. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	47

Figure 4.3. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	48
Figure 4.4. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	48
Figure 4.5. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	49
Figure 4.6. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	50
Figure 4.7. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	51
Figure 4.8. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II	51
Figure 4.9. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT	53
Figure 4.10. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT	53
Figure 4.11. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT	54
Figure 4.12. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91- 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT	55
Figure 4.13. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT	56

Figure 4.14. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT	56
Figure 4.15. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT	57
Figure 4.16. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91- 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT	58
Figure 4.17. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_PM56 et Débits selon ANBT	59
Figure 4.18. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_ANRH et Débits selon ANBT	59
Figure 4.19. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_PM56 et Débits selon ANBT	60
Figure 4.20. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91- 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_ANRH et Débits selon ANBT	61
Figure 5.1. Visualisation des débits mensuels à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81).....	65
Figure 5.2. Fonctions d'autocorrélation des logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)	66
Figure 5.3. Fonctions d'autocorrélation partielles des logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)	67
Figure 5.4. Périodogramme des logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81).....	67
Figure 5.5. Confrontation des débits observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (2,1) pour les débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81).....	68

Figure 5.6. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,1) pour les logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81).....	69
Figure 5.7. Visualisation des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	69
Figure 5.8. Fonctions d'autocorrélation des apports bruts mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	70
Figure 5.9. Fonction d'autocorrélation partielle des apports bruts mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	71
Figure 5.10. Périodogramme des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	71
Figure 5.11. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	72
Figure 5.12. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels observés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	72
Figure 5.13. Visualisation des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	73
Figure 5.14. Fonction d'autocorrélation des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	74
Figure 5.15. Fonction d'autocorrélation partielle des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	74
Figure 5.16. Périodogramme des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	75
Figure 5.17. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	76
Figure 5.18. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels observés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	76
Figure 5.19. Visualisation des apports décadaires au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	78

Figure 5.20. Fonction d'autocorrélation des apports liquides décadaires bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	79
Figure 5.21. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décadaires bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	80
Figure 5.22. Périodogramme des apports décadaires bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	80
Figure 5.23. Visualisation des apports décadaires normalisés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	81
Figure 5.24. Visualisation des apports décadaires différenciés une fois, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	81
Figure 5.25. Fonction d'autocorrélation des apports liquides décadaires différenciés une fois au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	82
Figure 5.26. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décadaires différenciés une fois au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	82
Figure 5.27. Périodogramme des apports décadaires différenciés une fois au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	83
Figure 5.28. Visualisation des apports décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	83
Figure 5.29. Fonction d'autocorrélation des apports liquides décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	84
Figure 5.30. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	84
Figure 5.31. Périodogramme des apports décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	85
Figure 5.32. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides décadaires au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	86
Figure 5.33. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides décadaires transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	86
Figure 5.34. Visualisation des apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)	87
Figure 5.35. Visualisation des apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/2010-2010/11)	88

Figure 5.36. Visualisation des apports journaliers transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11).....	89
Figure 5.37. Fonction d'autocorrélation des apports liquides journaliers transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11).....	90
Figure 5.38. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	90
Figure 5.39. Périodogramme des apports journaliers transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11).....	91
Figure 5.40. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11).....	92
Figure 5.41. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11) : Graphe zoomé limité à 1 mm.....	92
Figure 5.42. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,0) pour les apports liquides journaliers transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/101-2010/11).....	93
Figure 6.1. Apports liquides de 30 jours prévus par AR(1) selon l'EQ. 6.1 au sein du barrage Hammam Debagh.....	97
Figure 6.2. Evolution temporelle des résidus du modèle AR(1,0,0) en phase de calage.....	98
Figure 6.3. Evolution temporelle des résidus transformés selon Box-Cox du modèle AR(1,0,0) en phase de calage.....	98
Figure 6.4. Histogramme des résidus transformés par rapport à la fonction de densité de probabilité de la loi normale.....	99
Figure 6.5. Un exemple à titre indicatif de simulation des apports journaliers par le modèle AR(1,0,0) au sein du barrage Hammam Debagh.....	99
Figure 6.6. Un exemple à titre indicatif de simulation des apports journaliers par le modèle AR(1,0,0) au sein du barrage Hammam Debagh ; Graphe zoomé limité à 1 mm pour illustrer les apports faibles.....	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant Oued Bouhamdane.....	07
Tableau 1.2. Caractéristiques de pente du bassin versant Oued Bouhamdan	08
Tableau 1.3. Densité de drainage de l'Oued Bouhamdane et ses affluents.....	08
Tableau 1.4. Temps de concentration de l'Oued Bouhamdane et ses affluents.....	09
Tableau 1.5. L'équipe Technique réalisant les travaux du barrage.....	12
Tableau 1.6. Caractéristique technique du barrage Hammam Debagh et de la retenue.....	15
Tableau 2.1. Coordonnées en plan et statistiques de base des pluies mensuelles des stations retenues pour la période commune (1974/75-1980/81)	18
Tableau 2.2. Coordonnées en plan et statistiques de base des pluies mensuelles des stations retenues pour la période commune (1990/91-1998/99)	19
Tableau 2.3. Coordonnées en plan et statistiques de base des pluies mensuelles des stations retenues pour la période commune (1990/91-2010/11)	19
Tableau 2.4. Coordonnées en plan et statistiques de base des débits mensuels de la station hydrométrique Medjez Amar II et les apports mensuels du barrage Hammam Debagh pour les différentes périodes adoptées	21
Tableau 2.5. Variabilité des apports liquides journaliers du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	22
Tableau 2.6. Variabilité des apports liquides décadaires du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	23
Tableau 2.7. Variabilité des apports liquides mensuels du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)	23
Tableau 2.8. Evolution mensuelle interannuelle de l'ETP_PM56.....	25
Tableau 2.9. Coefficients correctifs régionaux (Kr)	27
Tableau 2.10. Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ETP_ANRH.....	27
Tableau 2.11. Evolution mensuelle interannuelle de l'ETP_ANRH	27
Tableau 4.1. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH Débits mesurés à la station Medjez Amar II	47
Tableau 4.2. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH Débits mesurés à la station Medjez Amar II	50

Tableau 4.3. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH et Débits selon ANBT	54
Tableau 4.4. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH et Débits selon ANBT	57
Tableau 4.5. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_PM56 et ETP_ANRH et Débits selon ANBT.....	60
Tableau 5.1. Résultats du modèle ARMA(2,1) pour les débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)	68
Tableau 5.2. Résultats du modèle ARMA(2,0) pour les apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99).....	71
Tableau 5.3. Résultats du modèle ARMA(2,0) pour les apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	75
Tableau 5.4. Résultats des tests ADF et KPSS pour les apports décennaux au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	79
Tableau 5.5. Résultats du modèle ARMA(1,1) pour les apports décennaux transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	85
Tableau 5.5. Valeurs de l'AIC pour d'autres modèles ARIMA compétitifs.....	86
Tableau 5.6. Résultats des tests ADF et KPSS pour les apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11).....	87
Tableau 5.7. Résultats des tests ADF et KPSS pour les apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11).....	89
Tableau 5.8. Résultats du modèle ARMA(1,0) pour les apports journaliers transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11).....	91
Tableau 5.9. Valeurs de l'AIC pour d'autres modèles ARIMA compétitifs.....	93

Introduction générale

La mobilisation des ressources en eau est un enjeu essentiel pour l'Algérie et la maîtrise des techniques de rationalisation du stockage des eaux de surface requiert des efforts intensifs des chercheurs pour développer des méthodes efficacement opérationnelles en vue de la conception, la régulation et la gestion.

Le fonctionnement hydrologique des bassins versants reste à nos jours un phénomène qui échappe à la maîtrise, malgré les études de terrain menées depuis des décennies et qui ont permis de présenter des éléments de réponses, malheureusement insuffisantes.

La modélisation est définie comme étant une représentation mathématique d'un phénomène physique simple ou complexe, qui permet en faisant appel à des entités ou à des processus élémentaires, de reconstituer et reproduire ce phénomène.

Les techniques de simulation des apports liquides permettent de répondre aux besoins des gestionnaires des ressources en eau. Le principe des modèles de simulation est d'utiliser des générateurs de variables aléatoires, tels que les apports liquides, qui respectent la structure statistique, historiquement observée, des processus à reproduire. Divers types de modèles ont été proposés pour la modélisation et la simulation des séries hydrométriques (débits ou apports). Le modèle autorégressif ainsi que les modèles autorégressifs et à moyenne mobile ARMA ont été parmi les premiers à être utilisés, cependant, et à notre connaissance, leur applicabilité est rarement explorée au travers les tests moyennant les données hydrologiques des bassins en Algérie.

Nous allons procéder dans le présent mémoire à la collecte des données relatives aux apports liquides du bassin versant Oued Bouhamdane, évalués au niveau du Barrage Hammam Debagh, dans le but d'élaborer des modèles de simulation des scénarios avenir desdits apports, et ce, en appliquant plusieurs modèles de séries temporelles type ARMA à échelles convenables à déterminer. Des modèles conceptuels seront à l'occasion testés en vue d'une comparaison jugée utile.

La présente recherche s'articulera autour de deux parties constituées chacune de trois chapitres. La première partie englobe, en premier chapitre, la présentation de la zone d'étude (bassin versant de l'oued Bouhamdane) entre autre la description du barrage Hammam Debagh. La collecte des données pluviométriques et hydrométriques nécessaire à l'élaboration du travail en question, sera élaborée au deuxième chapitre. Le troisième chapitre sera consacré à la synthèse bibliographique qui concernera les modèles conceptuels en général et spécialement le modèle GR2M. La technique des séries temporelles appliquées aux données

hydrométriques sera nécessairement met en évidence, et ce, après des aperçus globaux sur l'évolution de ce type de modélisation.

La deuxième partie, quant à elle, donnera au quatrième chapitre, le fruit d'une adaptation conceptuelle à travers l'application, aux données hydrométriques du bassin d'Oued Bouhamdane, du modèle conceptuel à l'échelle mensuelle de CEMAGREF dénommé GR2M (Génie Rural à deux paramètres à l'échelle mensuelle). L'application du modèle GR2M concernera les données des apports liquides au sein de la station hydrométrique Medjez Ammar II et au niveau du Barrage Hammam Debagh. Le cinquième chapitre sera consacré à l'application des modèles des séries temporelles type ARIMA (Auro-régressif à Moyenne mobiles Intégrée). Cette phase de modélisation doit être assurée de même aux données des apports liquides au sein de la station hydrométrique Medjez Ammar II et au niveau du Barrage Hammam Debagh, pour une éventuelle comparaison des résultats qui va être évoqué dans le sixième et dernier chapitre.

Une conclusion finale et des conclusions partielles doivent couronnées la présente contribution en essayant au fur et à mesure de se prononcer sur l'efficacité des modèles appliquées et les anomalies à éviter dans des travaux en perspective.

PREMIERE PARTIE

Présentation de la zone d'étude, collecte de la base de données et synthèse bibliographique

CHAPITRE 1 : Présentation de la zone d'étude (Bassin versant Oued Bouhamdane) et du Barrage Hammam Debagh

I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, l'étude est consacrée à la présentation de la zone d'étude qui concerne le bassin versant Oued Bouhamdane qui est un sous bassin du grand Seybouse. L'ouvrage hydrotechnique dénommé Barrage Hammam Debagh sera décrit également. La situation géographique, les caractéristiques géomorphologiques dudit bassin sont à détailler dans cette section ainsi que les caractéristiques techniques du barrage et l'historique de sa réalisation, de sa mise en eau et de son exploitation, seront tout de même abondamment données.

I.2. Le bassin versant Oued Bouhamdane dans le contexte général du territoire national

Selon l'Agence des Bassins Hydrographiques (ABH)⁽¹⁾, le territoire Algérien est subdivisé en cinq (05) grands bassins hydrographiques (figure 1.1), regroupant dix-sept (17) bassins versants (figure 1.2), selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)⁽²⁾.

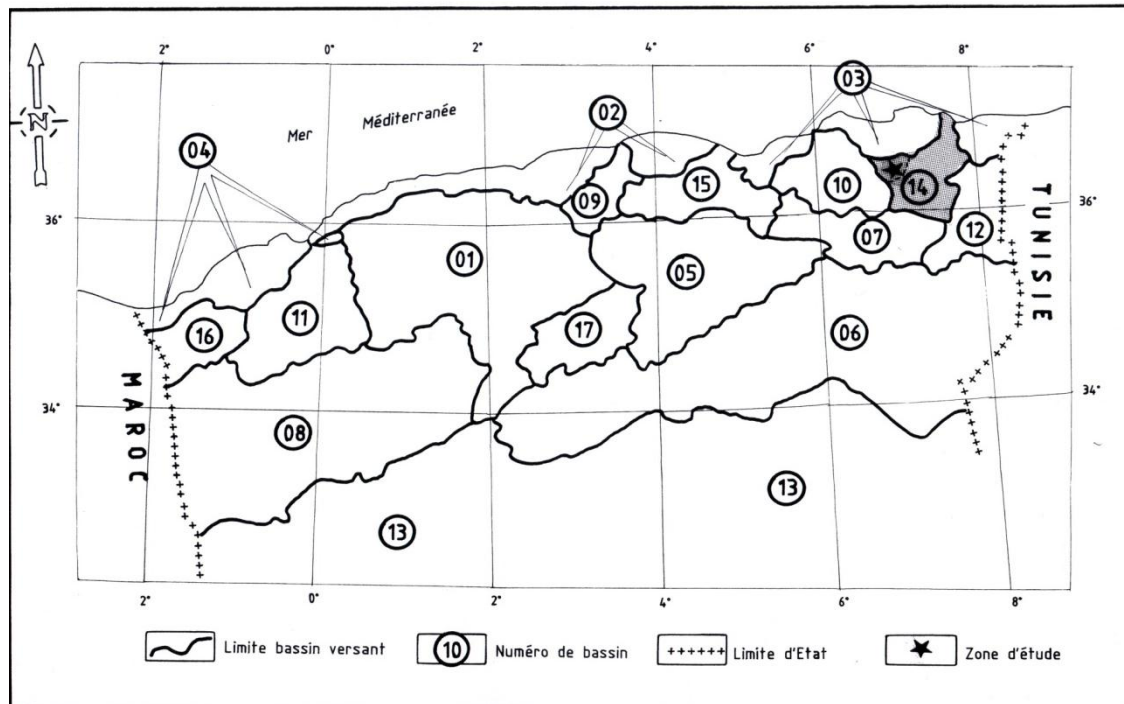


Figure 1.1. Bassins hydrographiques Algériens selon l'ABH

L'oued Bouhamdane est l'affluent le plus important après le Cheref dans la Seybouse, né dans les hautes plaines semi-arides, sur le revers méridional de l'Atlas Tellien, sa naissance dans un milieu semi-aride, atlasique d'influences montagnarde (Benchaïba, 2006).

⁽¹⁾ (ABH) : Conformément à la loi N°83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux, le territoire national a été découpé en unités hydrographiques naturelles dénommées "Bassins Hydrographiques".

⁽²⁾ (ANRH) : Un établissement public à caractère administratif et à vocation scientifique et technique. Créée par le décret n° 81-167 du 25 Juillet 1981.



BV 01 : Cheliff	BV 05 : Chott Hodna	BV 09 : Isser	BV 13 : Sahara
BV 02 : Côtier algérois	BV 06 : Chott Melrhir	BV 10 : Kebir Rhumel	BV 14 : Seybouse
BV 03 : Côtier constantinois	BV 07 : Hauts Plateaux constantinois	BV 11 : Macta	BV 15 : Soummam
BV 04 : Côtier oranais	BV 08 : Hauts Plateaux oranais	BV 12 : Médjerda	BV 16 : Tafna
			BV 17 : Zahrez

Figure 1.2. Grands bassins versants de l'Algérie selon l'ANRH

Le bassin la Seybouse (6450 km²) s'étend sur 160 km, suivant une disposition sensiblement Sud-Ouest–Nord-Est, des confins des Gara et El Tarf et Guelif au Sud, jusqu'à la mer au Nord. L'oued Cherf prend naissance dans les Hautes Plaines (Berriche et Ain Babouche) et rencontre à l'Ouest de Guelma, l'oued Bouhamdane qui coule Sud-Ouest - Nord-Est, le long du versant Sud-tellien, (Mebarki, 2005).

Ces deux cours d'eau donnent lieu à l'oued Seybouse qui s'écoule d'Ouest en Est jusqu'à sa confluence avec l'oued Mellah, affluent issu du versant septentrional bien arrosé des Monts de Medjerda (cf. profil en long, figure 1.3). Depuis, la Seybouse change de direction pour rejoindre, plus au Nord, la mer Méditerranée, après avoir traversé la plaine côtière, comprise entre Dréan et Annaba, (Ghachi, 1986). Le réseau hydrographique principal est constitué par les oueds Zenati, Sabath et Bouhamdane proprement dit. Les altitudes sont comprises entre 270 m, à la station de Medjez Ammar II au niveau de la vallée et 1281 m au sommet du djebel Djebel Mzarat Sidi Chagref (cf. profil en long, figure 1.4), (Louamri, 2013).

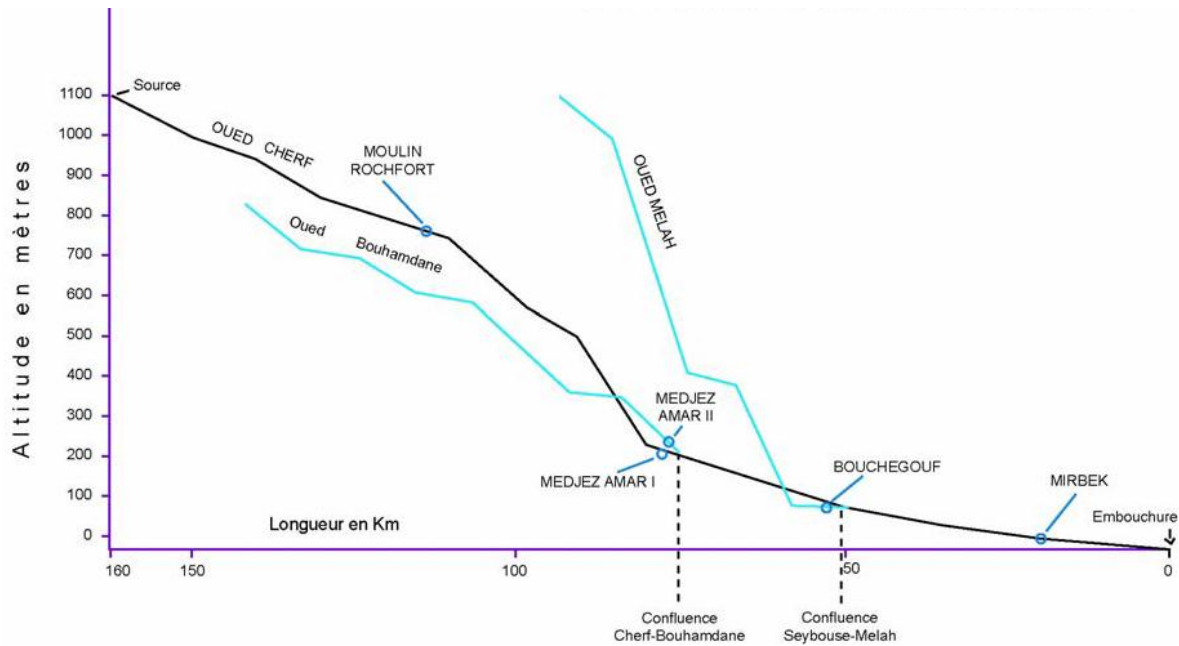


Figure 1.3. Contribution de l'oued Bouhamdane à l'alimentation du Seybouse (D'après Ghachi A., 1986)

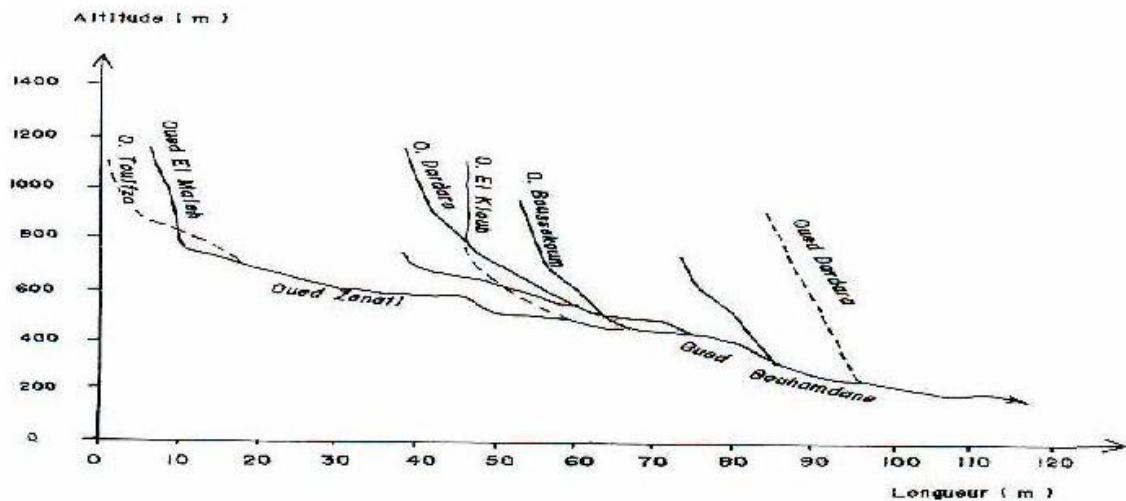


Figure 1.4. L'oued Bouhamdane et ses affluents (D'après Louamri, 2013)

I.2.1. Présentation géographique du bassin versant et délimitation

Le bassin de l'oued Bouhamdane (N°03) est un sous bassin versant de la Seybouse (N° 14). Il se caractérise par une superficie de 1105 km², (figure 1.5). La description de bouhamdane est bien détaillée ci-après selon (Benchaïba, 2006).

Dans sa partie orientale, et du Nord vers le Sud, la limite du bassin versant suit la ligne de partage des eaux séparant les chaâbets Sehouek et Louba et se poursuit en joignant les sommets de Koudiat Bourhoussine. Aux alentours de la localité de Ras El Akba, elle passe par les sommets de djebel Essaâda (1108 m) et djebel Ancel (1124 m) djebel M'dereg Narou au Sud-Ouest d'Ain Trab. Cette limite se poursuit en reliant les sommets d'une série de

CH1 : Présentation de la zone d'étude (Bassin Versant Oued Bouhamdane) et du Barrage Hammam Debagh

monticules culminant à des altitudes moyennes d'ordre (950 m), avant d'atteindre à l'extrême sud-est les sommets 1065 m. Au Sud, le bassin versant est délimité par Koudiat Dib (1124 m). Dans sa partie Ouest, la limite est constituée par la ligne de partage des eaux qui passe par les sommets de djebel El Guettar (1246 m), djebel Oum Settas (1324 m) et Kef si Salah près d'El Aria. Au Sud de ce village, la limite passe par les sommets où les altitudes sont de l'ordre (900 m). La limite remonte vers le Nord, pour relier les sommets de djebel Lobba à M'zaret Sidi Chagref (1289 m) et Koudiat N'Zel El Kraznadja à l'extrême Nord-Ouest.

Dans la partie septentrionale, la limite du bassin versant et de l'Ouest vers l'Est passe à travers la forêt de chêne-liège de Soudrata et suit la ligne de crête séparant la vallée de l'oued Bouhamdane de celle de Zerdazas, et se continue vers l'Est en reliant les sommets des djebels Taya et Mermera et enfin, celles du djebel Arara à Medjez Amar.



Figure 1.5. Localisation géographique du bassin versant Oued Bouhamdane dans la Seybouse (Un extrait de la carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité des eaux du nord de l'Algérie (ANRH, 2005))

I.2.2. Les caractéristiques de la disposition dans les plans du bassin Oued Bouhamdane

a. Le Périmètre et la Surface

On distingue dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane trois sous bassins contrôlés par des stations hydrométriques. Une telle subdivision permet de contrôler les différents débits sortant des sous-bassins. Les sous bassins de l'oued Zenati et l'oued Sabath présentent à leur station (Bordj Sabath) des superficies de 592,15 km² et 296,09 km², respectivement ; alors que le sous bassin de l'oued Bouhamdane élémentaire est réduit avec 216,76 km². D'où une superficie totale de 1105 km² contrôlée à la station hydrométrique dite Medjez Amar II. Le périmètre de l'ensemble du Bassin versant de l'oued Bouhamdane est de 140 km. Une longueur du thalweg principal de 90 km environ caractérise oued Bouhamdane.

b. La forme

La forme d'un bassin versant influe sur l'écoulement et sur l'allure de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant. Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser la forme, et aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius K_G , défini comme le rapport du périmètre de bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, il est très connu en hydrologie de surface. Une autre notion de forme, c'est la notion du rectangle équivalent (longueur L^* largeur l) qui permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leur caractéristique sur l'écoulement.

Les caractéristiques morphométriques du bassin en question sont données par le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Caractéristiques morphométriques du bassin versant Oued Bouhamdane

Bassin	Surface km²	Périmètre km	K_G	L km	l km
Oued Zenati	592,15	110,5	1,27	40,56	2,72
Oued Sabath	296,09	82,85	1,35	32,32	2,56
Oued Bouhamdane élémentaire	216,76	68,55	1,30	25,8	2,65
L'ensemble de Bouhamdane	1105	140	1,18	75	14,7

c. Les indices de pente

Le but essentiel de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant ; d'établir une classification entre les différents reliefs et de comparer les bassins entre eux.

c.1. L'indice de pente de Roche

C'est un indice qui rend bien compte de l'aptitude des différents terrains au ruissellement, il est désigné par I_p . En outre il sert à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant. C'est un indice qui a été introduit afin de tenir compte

de la répartition altitudinale de la pente (courbe hypsométrique), ce que les autres indices ne le considèrent pas.

c.2. L'indice de pente global

Cet indice, désigné par I_g , sert à classer le relief d'un bassin ; présente l'avantage d'être facile à calculer ; son évaluation est rapide, il se définit comme étant le rapport de la dénivelée utile à la longueur du rectangle équivalent. Il est évalué à partir de la courbe hypsométrique.

Toutes ces caractéristiques de pente sont regroupées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2. Caractéristiques de pente du bassin versant Oued Bouhamdane

Bassin	I_p (-)	I_g (m/km)
Oued Zenati	0,18	27,13
Oued Sabath	0,12	9,62
Oued Bouhamdane élémentaire	0,14	14,39
L'ensemble de Bouhamdane	0,13	11,27

d. Densité de drainage

Elle se définit comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant. Elle est aussi la somme des densités de drainage temporaire et permanente, elle est désignée par D_d et donnée en km/km^2 . (cf. Tableau 1.3).

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et dans certaine mesure des conditions climatologiques. En pratique les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour les régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement limité. Le bassin est dit bien drainé si la D_d dépasse 3 km/km^2 . Sinon il est dit mal drainé.

Tableau 1.3. Densité de drainage de l'Oued Bouhamdane et ses affluents

Bassin	D_d (Km/Km^2)	Observation
Oued Zenati	2.16	Mal drainé
Oued Sabath	2.37	Mal drainé
Oued Bouhamdane élémentaire	3.31	Légèrement bien drainé
Ensemble de Bouhamdane	2.45	Mal drainé

La densité de drainage est de l'ordre de 2.45 km/km^2 pour l'ensemble du bassin de l'oued Bouhamdane, ce qui n'est pas en contradiction avec la caractéristique des régions semi-aride (Benchaïba, 2006).

e. Le temps de concentration

Le temps de concentration T_c (en heure), des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique le plus long du bassin à l'exutoire de ce dernier. Le temps de concentration intervienne pour l'étude des crues et sert aussi à la comparaison des bassins entre eux. Pour évaluer ce paramètre, nous avons adopté la fameuse formule de Giordotti. Les résultats numériques sont consignés dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4. Temps de concentration de l'Oued Bouhamdane et ses affluents

Bassin	Tc (heure)
Oued Zenati	12.5
Oued Sabath	6
Oued Bouhamdane élémentaire	8
Ensemble de Bouhamdane	15

I.3. Présentation du Barrage Hammam Debagh

I.3.1. Situation géographique

Le barrage de Hammam Debagh sur l'oued Bouhamdane est situé dans la wilaya de Guelma, à 20 kilomètres à l'ouest de la ville de Guelma, dans l'Est Algérien. Il est implanté à 3 km à l'amont de la localité de Hammam Debagh (ex-Hammam Meskoutine).

Le but de l'aménagement est essentiellement la régularisation des apports en vue de satisfaire les besoins pour l'irrigation du périmètre de Guelma-Boucheougouf, dont la superficie est de 13000 hectares. Un objectif secondaire est, à plus long terme, le renforcement de l'alimentation en eau de la ville de Guelma.

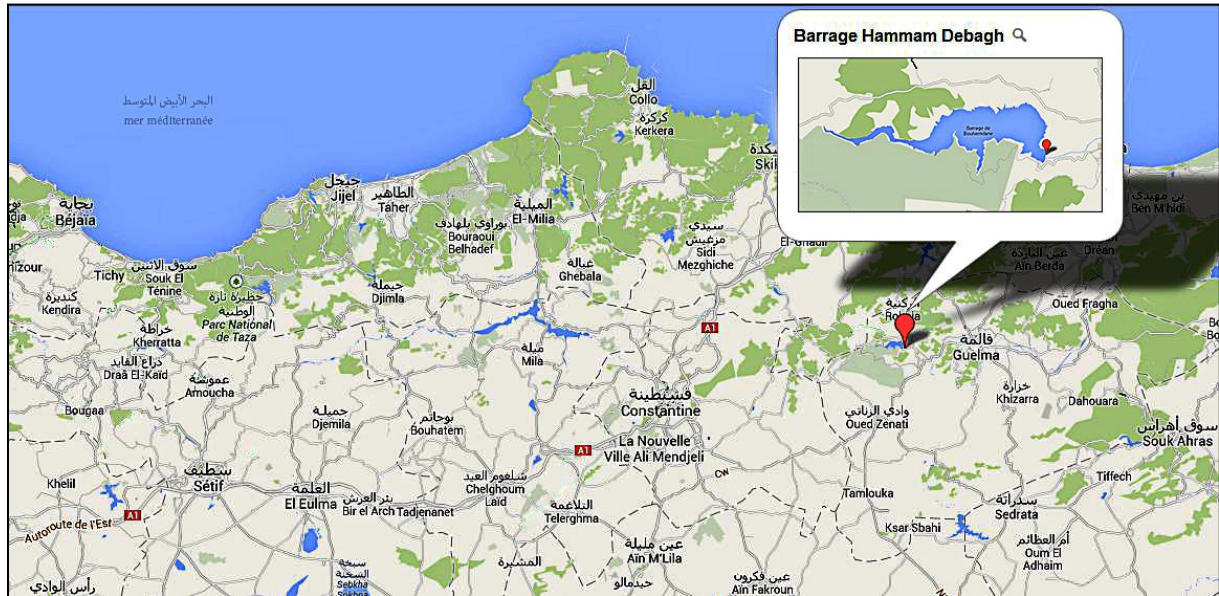


Figure 1.6. Localisation du barrage Hammam Debagh
Source: Google Maps - ©2013 Google

I.3.2. Topographie

La structure des formations qui bordent la retenue, est en terrain assez uniforme, des collines basses, elle est en général favorable à la stabilité, sauf en une localisation de la rive droite, comme les reliefs sont peu élevés, il n'y a pas lieu de craindre de glissements brutaux de masses de sol qui pourraient compromettre la sécurité du barrage.

L'étanchéité de la cuvette est garantie par la nature du substratum marneux. La hauteur et la faible pente des massifs qui l'entourent imposent des gradients hydrauliques faibles partout.

La structure régionale a une direction est-ouest, et présente des fractures aussi bien parallèles à l'allure générale que perpendiculaires à celle-ci. Plusieurs de ces fractures sont le siège d'une circulation géothermale.

Les circulations les plus importantes affleurent à Hammam Debagh, elles semblent en relation avec les circulations d'eau profonde suivant des failles localement minéralisées. Il s'agit d'eaux sulfatées calciques et chlorées sodiques, vraisemblablement sans relation directe avec les eaux de surface.

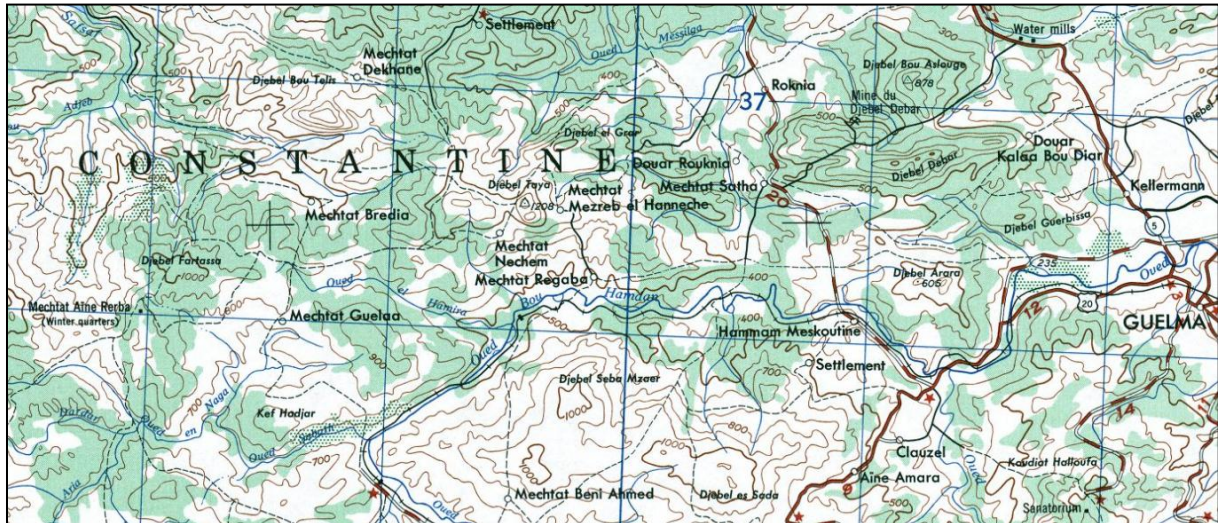


Figure 1.7. Relief du bassin versant de l'Oued Bouhamdane au site de Hammam Debagh.

I.4. Les caractéristiques techniques du barrage

I.4.1. Historique

I.4.1.1. Les études

Le site de Hammam Debagh (ou Hammam Meskoutine) été l'objet de l'intérêt des services hydrauliques depuis longtemps, et son étude a commencé dès avant le début des années soixante-dix. L'opération a véritablement commencé lorsque l'administration Algérienne confia les études d'avant-projet de cet ouvrage au bureau d'études (Belge) Traction – Electricité assisté de Stuky (Suisse) et Acres (Canada).

A la suite d'un appel d'offres restreint, un contrat pour les études d'exécution et pour une mission d'assistance technique pendant les travaux fut signée en 1980 avec Coyne & Bellier (France), qui en réalité intervint dès 1978.

De 1978 à 1980, l'exécution de travaux de reconnaissance en début de chantier, et aussi le séisme d'El Asnam qui survint le 10 octobre 1980, conduisent à reconsidérer profondément certaines dispositions du projet, tout en conservant les partis principaux bien adaptés aux conditions locales. En 1987, le barrage de Hammam Debagh est achevé sur l'oued Bouhamdane, destiné principalement à l'irrigation (périmètre de Guelma-Boucheougouf : 13 000 ha) et à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de Guelma. Mais, paradoxalement, en raison des retards pris dans l'opération d'équipement du périmètre situé à l'aval, l'eau accumulée dans la retenue (capacité : 220 hm³) n'a pas trouvé d'utilisateur plusieurs années successives (Mebarki, 2009). La mise en eau de l'aménagement a été commencée fin décembre 1988, mais la faiblesse des apports pendant toute l'année suivante a

entraîné une montée extrêmement lente du plan d'eau ; fin 1988, le niveau était aux environs de la cote 311 (environ 10 millions de mètres cubes en brut), (Zekkour et Touati, 2013).

I.4.1.2. Les travaux de génie civil

A l'issue de l'appel d'offres, un marché de travaux fut signé, début 1980, avec le consortium Italien ITALSTRADE – COGEFAR – RECCHI.



Figure 1.8. Travaux génie civil du Barrage Hammam Debagh ; Source : ANB (1985)

I.4.1.3. L'équipement hydro – mécanique et électrique

Les études relatives au matériel hydromécanique et électrique aboutissaient à la production, dès mars 1982, d'un dossier d'appel d'offres pour les études, la fabrication et le montage de ce matériel. Le marché fut attribué en 1985 à la société commerciale Yougoslave INGRA.

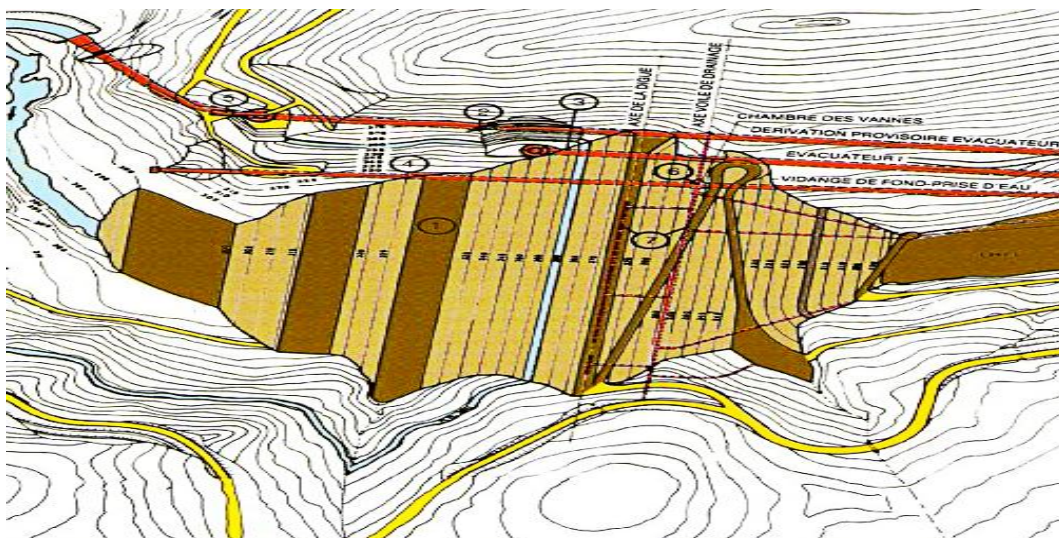
Tableau 1.5. L'équipe Technique réalisant les travaux du barrage

Maître d'œuvre	Agence Nationale des Barrages
Bureau d'ingénieur conseil	Coyne et Bellier (France)
Entrepreneur de génie civil	Groupement C.I.R S.p.A (Italie)
Constructeur de l'équipement Hydromécanique et électrique	Société INGRA (Yougoslavie)

I.4.2. L'aménagement

L'aménagement comprend les ouvrages suivants :

- Une digue en terre de 93 m de hauteur.
- Deux évacuateurs de crue en puits de section circulaire.
- Une vidange de fond dans laquelle est incorporée la chambre des vannes en souterrain à 50 m à l'aval de l'axe de la digue.
- Une tour de prise verticale encastrée dans le rocher comportant 3 niveaux de prise et reliée à la chambre des vannes par la galerie de prise d'eau principale elle-même incorporée au niveau supérieur de la vidange de fond.
- Un réseau de galerie d'injection et de drainage de la fondation de la digue.



- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1 Corps de la digue | 5 Tour de prise |
| 2 Dérivation provisoire- Evacuateur II | 6 Chambre des vannes |
| 3 Evacuateur I | 7 Voile d'étanchéité et de drainage |
| 4 Vidange de fond | |

Figure 1.9. Disposition générale des ouvrages ; Source : ANB (1985)

I.5. La digue

La digue est du type en terre, composée d'un noyau argileux vertical, de recharge amont et aval en alluvions graveleuses, des filtres et drains produits à partir des alluvions de l'oued, du rip - rap amont et aval prélevé en carrière et dans l'oued.

La digue repose sur un substratum constitué d'une alternance de formations schisteuses et gréseuses. Des formations de surface d'origines variées recouvrent le substratum sur une épaisseur variable mais en moyenne relativement importante.

Les percolations y sont contrôlées par un drain vertical et son prolongement horizontal à la base de la digue.

Le noyau argileux est encadré par les filtres amont et aval.

La conception de la digue a fait objet d'un traitement antisismique qui consiste à un adoucissement des filtres aval et drain pour permettre un débit de fuite important en cas de fissuration du noyau. La construction s'est effectuée par étapes à la cadence moyenne de 150.000 m³/mois à l'abri d'un batardeau incorporé dans la recharge amont. Il a été enregistré une crue maximale de chantier de 1450 m³/s en décembre 1984.

Le barrage qui contrôle un bassin versant de 1070 km², a une hauteur totale de 93 m, et une longueur de 430 m.

Le dispositif de sécurité du barrage comporte deux évacuateurs de crue à seuil déversant circulaire en forme de tulipe d'un diamètre de 24 m.

Les caractéristiques techniques du barrage sont résumées dans le tableau 1.6.

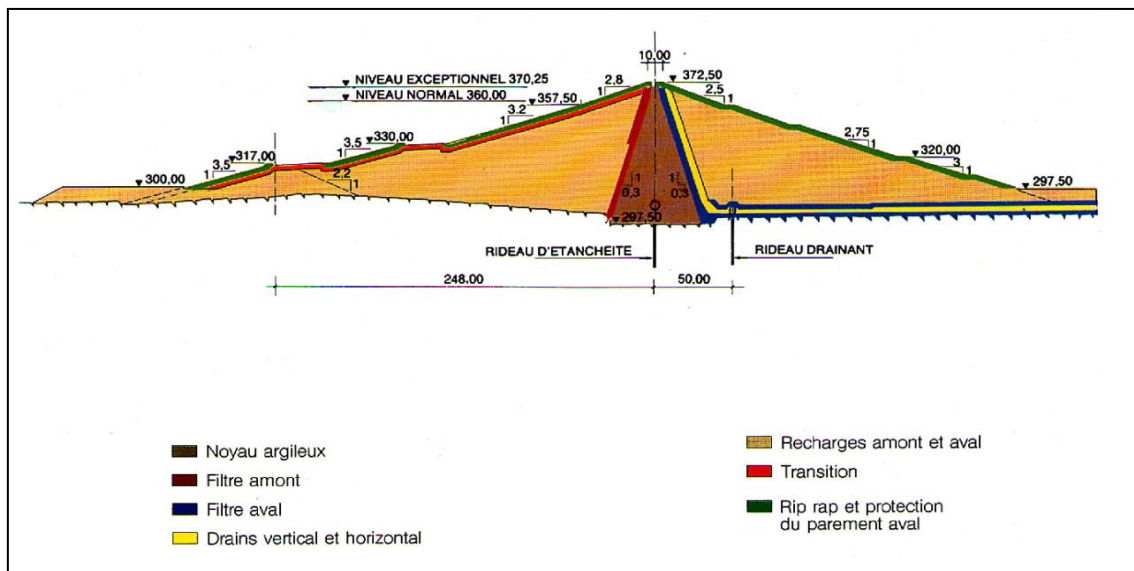


Figure 1.10. Coupe en travers du Barrage Hammam Debagh ; Source : ANB (1985)

Tableau 1.6. Caractéristique technique du barrage Hammam Debagh et de la retenue ;
Source : ANB (1985)

Digue	
Type : Remblai en terre avec un noyau central en argile	
Hauteur maximum au-dessus de la fondation	93 m
Longueur en crête	430 m
Largeur en crête	9 m
Largeur maximale au niveau e terrain naturel	594 m
Altitude de la crête du barrage	372,5 m
Altitude de la crête des déversoirs	360 m et 365 m
Retenue	
Côte de la retenue normale (N.N.R)	360 m
Côte des plus hautes eaux (P.H.E)	370.24 m
Aire de la retenue au niveau normal	665 hectares
Volume total de la retenue au niveau normal	200 hm ³

I.6. Conclusion

Le présent chapitre a été en premier lieu une description sommaire du sous bassin d'Oued Bouhamdane qui est un affluent important de la Seybouse. Le sous bassin est caractérisé essentiellement par une superficie drainée de 1105 km². Toutes les autres caractéristiques sont données et résumées sous forme de tableaux et figures (cartes et photos). En deuxième lieu le Barrage Hammam Debagh a été décrit historiquement et techniquement. Grosso modo le barrage est en terre et emmagasine plus de 200 millions de m³ d'eau. Il est muni de deux évacuateurs fonctionnant en charge type tulipe. La retenue reçoit les eaux de l'oued Bouhamdane pour une superficie de 1070 km².

CHAPITRE 2 : Collecte des données nécessaires pour l'élaboration de la présente étude

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on procède à la collecte des données de base nécessaires à la réalisation des études ultérieures dans les chapitres qui suivent. Cette section d'étude est subdivisée essentiellement en deux volets. Un volet est consacré à la collecte des données concernant le bassin versant Oued Bouhamdane et un deuxième volet est réservé aux données issues du barrage Hammam Debagh. A propos du bassin versant d'Oued Bouhamdane, les données des pluies au niveau de plusieurs stations pluviométriques seront homogénéisées et présentées pour être en mesure de la contribution d'une étude plus au moins fiable. Les données des débits sont dans ce cas issues d'une seule station hydrométrique qui contrôle la totalité de la superficie du bassin. Pour les données du barrage Hammam Debagh, sont soit issues des stations pluviométrique et hydrométrique implantées au niveau de l'ouvrage, soit sont extraites et déduites des travaux de suivi et d'exploitation du barrage lui même selon l'équation du bilan hydrologique adoptée par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts. Toutes les données à collecter seront exploitées dans l'élaboration du modèle conceptuel en chapitre quatre et des modèles de séries temporelles au cinquième chapitre.

II.2. Les sources des données concernant essentiellement la pluie, l'évapotranspiration et le débit (apport liquide)

II.2.1. Disposition des diverses stations de mesure des pluies et des débits dans la zone d'étude

La figure 2.1 présente d'une manière synoptique la disposition géographique des stations pluviométriques et hydrométriques au sein du bassin versant Oued Bouhamdane et la situation géographique du barrage Hammam Debagh. Cette illustration est extraite de la carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité des eaux du nord de l'Algérie dressée par l'ANRH en 2005. Il est à rappeler que l'Oued Bouhamdane représente une partie du bassin de la Seybouse, l'une des grandes artères hydrographiques de l'Algérie orientale tributaires de la mer Méditerranée. Il draine une surface de 1105 km² à la station hydrométrique de Medjez Ammar II et de 1070 km² au droit du barrage Hammam Debagh. Le bassin est doté de plusieurs stations qui mesurent les précipitations.

qui suivent donnent les caractéristiques statistiques de base pour chaque station de mesure retenue pour la période voulue.

NB : On définit le pourcentage des lacunes tout simplement comme étant le rapport des lacunes sur le nombre total des mois considérés.

II.2.2.1. Période commune (1974/75-1980/81)

Les valeurs des pluies mensuelles considérées, de septembre 1974 à août 1981, soient 84 mois, sont issues des sept stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Ras el Akba, Ain Makhlouf, Guelma Lycée, Ain el Kelb, Bousnib et Ouled Nacer.

Tableau 2.1. Coordonnées en plan et statistiques de base des pluies mensuelles des stations retenues pour la période commune (1974/75-1980/81)

Station	Code	X (km)	Y (km)	Lacunes (%)	Pluie moyenne mensuelle interannuelle (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)	MAX	MIN
Bordj Sabath	140302	888,74	355,02	4.8	38,98	37,02	0,95	171,1	0,0
Ras el Akba	140309	905,70	305,90	0	42,62	36,70	0,86	181,2	0,0
Ain	140205	888,15	363,40	1.2	41,31	39,00	0,94	182,5	0,0
Guelma	140412	923,82	361,25	11.9	39,87	35,27	0,88	160,0	0,0
Ain el kelb	030904	888,15	363,40	5.95	59,03	55,05	0,93	286,7	0,0
Bousnib	030905	882,10	362,95	0	58,24	48,06	0,83	194,6	0,0
Ouled Nacer	100527	876,80	320,70	0	23,87	23,91	1,00	121,6	0,0

II.2.2.2. Période commune (1990/91-1998/99)

Les valeurs des pluies mensuelles considérées, de septembre 1990 à août 1999, soient 108 mois, sont issues des sept stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Ras el Akba, Medjez Amar, Ain Makhlouf, Guelma Lycée, Bousnib et la station du barrage Hammam Debagh.

Tableau 2.2.Coordonnées en plan et statistiques de base des pluies mensuelles des stations retenues pour la période commune (1990/91-1998/99)

Station	Code	X (km)	Y (km)	Lacunes (%)	Pluie moyenne mensuelle interannuelle (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)	MAX	MIN
Bordj Sabath	140302	888,74	355,02	2.8	44,34	48,20	1,09	231,5	0,0
Ras el Akba	140309	905,70	305,90	0	48,71	44,05	0,90	238,6	0,0
Medjez Amar	140313	913,815	359,067	1.9	47,93	48,86	1,02	233,3	0,0
Ain Makhlouf	140205	888,15	363,40	0	38,61	54,14	1,40	339,8	0,0
Guelma Lycée	140412	923,82	361,25	0	42,93	43,13	1,00	190,5	0,0
Bousnib	030905	882,10	362,95	15.7	56,03	55,04	0,98	234,6	0,0
Barrage Hammam Debagh	-	906,54	360,51	0	50,88	49,69	0,98	233,3	0,0

II.2.2.3. Période commune (1990/91-2010/11)

Les valeurs des pluies mensuelles considérées, de septembre 1990 à août 2011, soient 252 mois, sont issues des quatre stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Medjez Amar, Bousnib et la station du barrage Hammam Debagh.

Tableau 2.3.Coordonnées en plan et statistiques de base des pluies mensuelles des stations retenues pour la période commune (1990/91-2010/11)

Station	Code	X (km)	Y (km)	Lacunes (%)	Pluie moyenne mensuelle interannuelle (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)	MAX	MIN
Bordj Sabath	140302	888,74	355,02	3.6	48,33	52,45	1,09	296,8	0,0
Medjez Amar	140313	913,815	359,067	2.4	51,23	50,27	0,98	255,6	0,0
Bousnib	030905	882,10	362,95	10.7	62,28	61,22	0,98	302,6	0,0
Barrage Hammam Debagh	-	906,54	360,51	0	50,57	51,04	1,01	278,6	0,0

II.3. Données concernant l'hydrométrie

Comme déjà mentionné dans la section I.2.2, on distingue dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane deux stations hydrométriques :

1. Bordj Sabath qui contrôle les débits de deux affluents qui sont oued Zenati et oued Sabath. Il est à signaler que cette station hydrométrique présente trop de lacunes et ne peut être prise en compte dans la suite des analyses (figure 2.2).
2. Medjez Amar II qui contrôle les débits de la totalité du bassin versant oued Bouhamdane pour une superficie de 1105 km². Cette station est à retenir pour la suite des modèles de prévision à élaborer. Les débits de l'oued Bouhamdane sont en outre contrôlés au niveau du barrage Hammam Debagh sous forme d'apports liquides déduits de l'équation du bilan hydrologique lors de l'exploitation historique du barrage. Ces apports sont dus au drainage d'une superficie de 1070 km²(figure 2.2), (ABH, 1999).

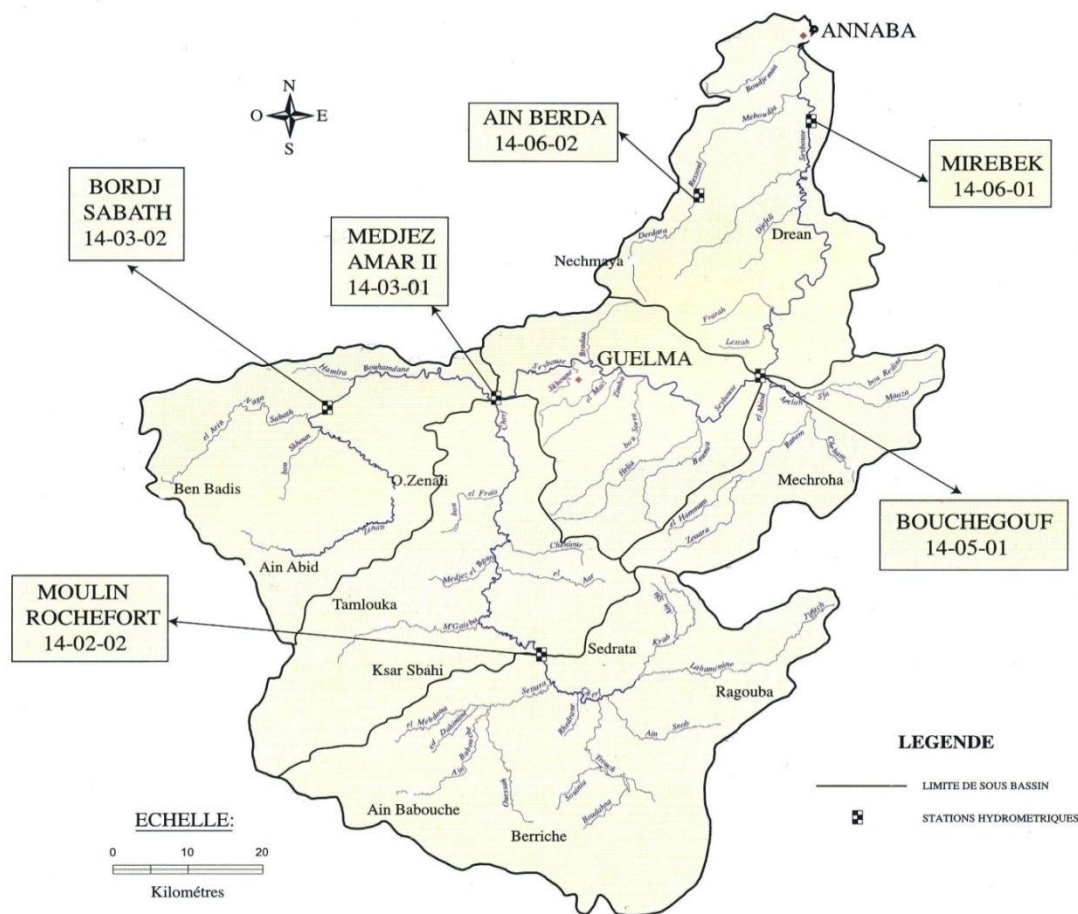


Figure 2.2. Stations de mesures hydrométriques (Source : Les cahiers de l'Agence de Bassin Hydrographique : Constantinois-Seybousse-Mellegues, N°01. (Juin 1999))

L'apport liquide (A_L) au barrage (ou "affluent" (A_{ff}) selon l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) ⁽¹⁾ se calcule comme suit : capacité finale (CF) - capacité initiale (CI) + défluent (Def). (Le défluent est la somme des toutes les sorties : pertes (évaporation et infiltration), besoins (alimentation en eau potable, irrigation et eau industrielle) et lâchers (déversement et vidange). En équation, on écrit :

$$A_L = A_{ff} = CF - CI + Def \quad (2.1)$$

Le tableau 2.4 donne les coordonnées en plan et les statistiques de base des débits mensuels de station hydrométrique Medjez Amar II et les apports mensuels au barrage Hammam Debagh pour les périodes communes retenues.

Tableau 2.4. Coordonnées en plan et statistiques de base des débits mensuels de la station hydrométrique Medjez Amar II et les apports mensuels du barrage Hammam Debagh pour les différentes périodes adoptées

Station	Code	X (km)	Y (km)	Débit moyen mensuel interannuel (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)	MAX	MIN
Medjez Amar II (1974/75-1980/81)	140301	912,30	358,75	3,45	7,78	2,26	47,6	0,1
Barrage Hammam Debagh (1990/91-1998/99)	-	906,54	360,51	5,87	12,57	2,14	83,77	0,0
Barrage Hammam Debagh (1990/91-2010/11)	-	906,54	360,51	7,45	18,36	2,47	121,8	0,0

II.4. Variabilité des apports liquides aux différents pas de temps au sein du Barrage Hammam Debagh

En se servant de la relation de continuité (2.1) pour présenter les apports liquides (débits) aux différents pas de temps. Ces débits feront l'objet d'une procédure de modélisation dans les chapitres qui suivront la présente section d'étude.

⁽¹⁾(ANBT) :Décret n° 85-163 du 11 juin 1985 portant création de l'Agence Nationale des Barrages.
Décret exécutif n° 05-101 du 12 Safar 1426 correspondant au 23 mars 2005 portant réaménagements du statut de l'Agence Nationale des Barrages.
Le statut de l'agence nationale des barrages par abréviation "ANB", établissement public à caractère administratif, créé par le décret n° 85-163 du 11 juin 1985, susvisé, est réaménagé dans sa nature juridique en établissement public à caractère industriel et commercial dénommé "agence nationale des barrages et transferts" par abréviation "ANBT", désigné ci-après "l'établissement".

II.4.1. Variabilité des apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

Cette variabilité est illustrée par le tableau 2.5 et la figure 2.3.

Tableau 2.5. Variabilité des apports liquides journaliers du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

Station	Code	X (km)	Y (km)	Apport liquide moyen journalier interannuel (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)
Barrage Hammam Debagh (1990/91-2010/11)	-	906,54	360,51	0,26	1,45	5,55

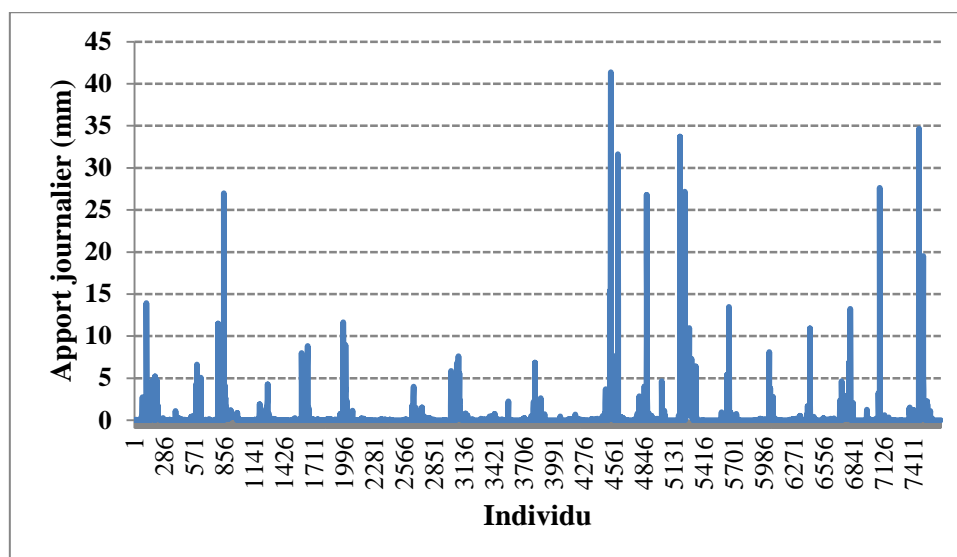


Figure2.3. Visualisation des apports liquides journaliers du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

II.4.2. Variabilité des apports liquides décennaires au sein du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

Les 10 premiers jours du mois sont regroupés comme première décennie, les deuxièmes 10 jours se comptent comme deuxième décennie et les derniers jours (8-11 selon le mois et l'année) sont la 3^{ème} décennie du mois (Moeletsi et al, 2013). Cette variabilité est illustrée par le tableau 2.6 et la figure 2.4.

Tableau 2.6. Variabilité des apports liquides décennaux du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

Station	Code	X (km)	Y (km)	Apport liquide moyen décennal interannuel (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)
Barrage Hammam Debagh (1990/91-2010/11)	-	906,54	360,51	2,66	8,86	3,33

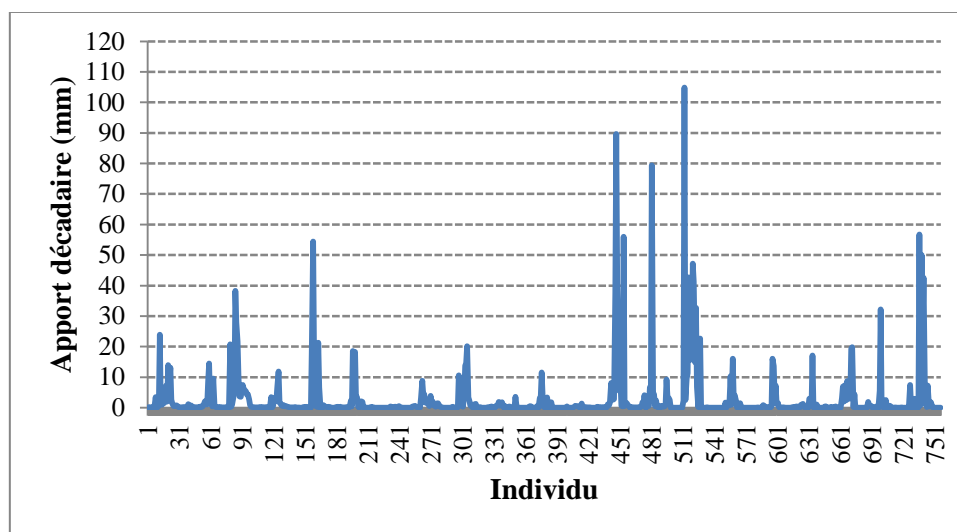


Figure2.4. Visualisation des apports liquides décennaux du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

II.4.3.Variabilité des apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

Cette variabilité est illustrée par le tableau 2.7 et la figure 2.5.

Tableau 2.7. Variabilité des apports liquides mensuels du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

Station	Code	X (km)	Y (km)	Apport liquide moyen mensuel interannuel (mm)	Ecart type (mm)	Coef. de variation (-)
Barrage Hammam Debagh (1990/91-2010/11)	-	906,54	360,51	7,97	19,65	2,46

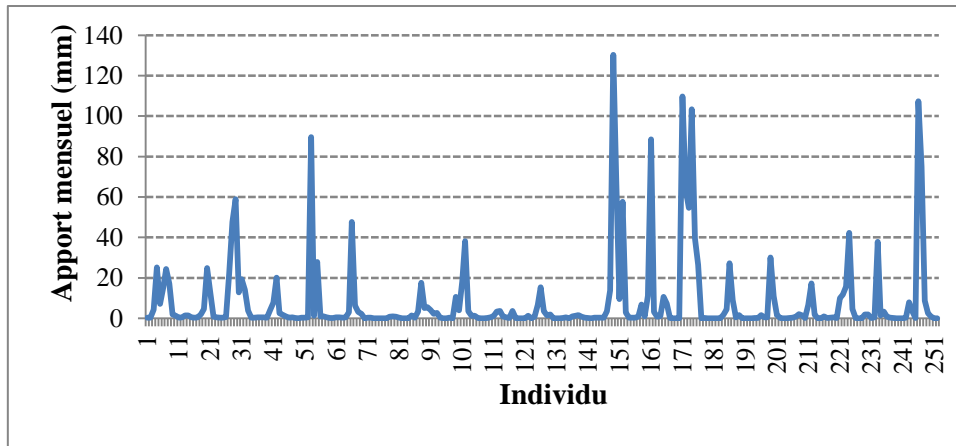


Figure 2.5. Visualisation des apports liquides mensuels du barrage Hammam Debagh pour la période d'exploitation (1990/91-2010/11)

NB : La prévision des débits aux pas de temps décennaires et mensuels est considérée à moyen terme, la prévision des débits aux pas de temps journalier est considérée à court terme (Fortin et al., 1997).

II.5. Données concernant l'évapotranspiration

Dans cette étude on utilisera deux relations pour l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle ; il s'agit de la relation universelle de Penman-Monteith (FAO56) désignée par ETP_PM56 et la relation dite de l'ANRH, désignée par ETP_ANRH.

II.5.1. Evaluation de l'Évapotranspiration potentielle par la formule de Penman-Monteith (FAO56) : (ETP_PM56)

La formule de Penman-Monteith est la formule de base proposée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour l'estimation des besoins en eau des plantes sur des aménagements hydro-agricoles (Jabloun et Sahli, 2008).

La méthode PM56 a été considérée comme offrant les meilleurs résultats avec le minimum d'erreur possible par rapport à une culture de référence. De plus amples informations sur la méthode se trouvent dans (Allen et al., 1998). La relation s'écrit :

$$ETP_{PM56} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(t + 273))U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2.2)$$

Avec :

ETP_{PM56} Évapotranspiration potentielle (mmj^{-1}) ;

Δ : pente de la courbe de la pression de vapeur ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) ;

R_n : Radiation nette ($\text{MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$) ;

G : Flux de chaleur du sol ($\text{MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$) ;

γ : Constante psychométrique ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) ;

t : Température moyenne journalière ($^\circ\text{C}$) ;

U_2 : Vitesse moyenne de 24h du vent à 2m du sol (ms^{-1})

e_a : Pression saturante de vapeur d'eau (kPa) ;

e_d : Pression actuelle de vapeur d'eau (kPa).

NB : Toutes les données nécessaires à l'application de l'ETP_PM56 sont recueillies de la station météorologique de Belkhir à 10 km de Guelma chef-lieu ayant les coordonnées géographiques suivantes : (Latitude : $36^\circ 28'$ Nord ; Longitude : $07^\circ 28'$ Est).

La station de Belkhir est gérée par l'Office National de la Météorologie (ONM)⁽¹⁾.

En appliquant la relation (2.2) de l'ETP_PM56, ces valeurs numériques mensuelles interannuelles sont consignées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8. Evolution mensuelle interannuelle de l'ETP_PM56

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août
ETP_PM56 (mm)	115,9	74,3	46,3	33,1	33,0	43,2	67,4	91,4	125,4	158,7	181,6	165,7

II.5.2. Evaluation de l'Evapotranspiration potentielle par la formule de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ETP_ANRH)

C'est une formule calée sur le modèle de Penman et écrite sous forme simplifiée pour l'adapter à la formule de Blaney et Criddle, elle est développée sous la direction du Professeur J.P. Laborde, (ANRH-GTZ, 2003) et elle permet d'évaluer l'évapotranspiration selon la référence Penman à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante, L'équation générale s'écrit sous la forme suivante:

.....
⁽¹⁾(ONM) :Crée par ordonnance N° 75 – 25 du 29 avril 1975, l'Office National de la Météorologie(ONM), sous la tutelle du ministère des transports et son siège est situé à Alger, est devenu Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC) à vocation scientifique et technique par décret n° 98-258 du 25 Août 1998.

$$ETP_ANRH = KrKm(H - 187)(0.032t + 0.077) \quad (2.3)$$

Avec :

ETP_ANRH : Evapotranspiration potentielle (mm/mois) ;

Kr : Coefficient régional qu'on peut lire sur le tableau 2.9 ;

Km : Coefficient mensuel, ses valeurs sont données à la figure 2.6 ;

H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée (Y) de Lambert selon la formule suivante :

$$H_i = a_i Y + b_i \quad (2.4)$$

Avec:

Y: l'ordonnée de Lambert de la station considérée (km) ;

a_i, b_i : des coefficients lus dans le tableau 2.5. L'indice « i » indique le numéro du mois dans l'année (i varie de 1 à 12) ;

t: température moyenne mensuelle pour le mois considéré (°C) ;

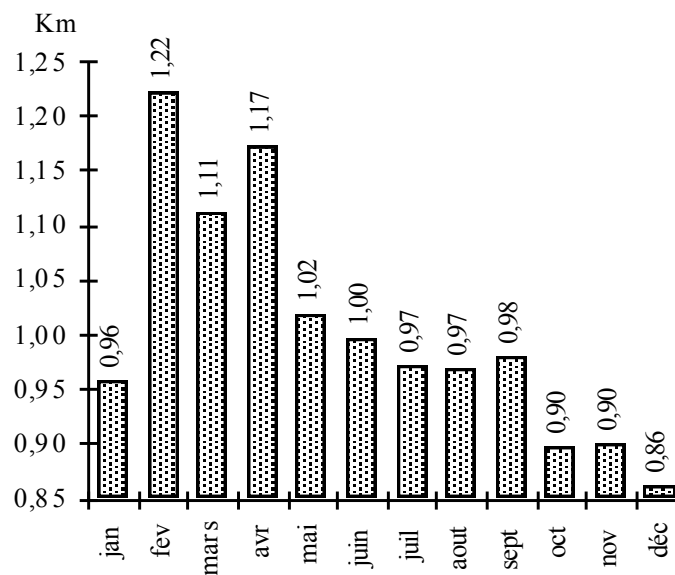


Figure 2.6. Evolution du coefficient correctif mensuel (Km)

Tableau 2.9. Coefficients correctifs régionaux (Kr)

STATION	Kr	STATION	Kr	STATION	Kr
Ain Sefra	1.21	DellysAfir	0.87	Mostaganem	0.87
Annaba	0.91	Djelfa	1.10	Msila	1.12
Arzew	0.97	El Kheiter	1.15	Naâma	1.11
Barika	1.24	El-Bayad	1.23	Oran	0.99
Batna	1.12	El Milia	0.79	Oum El Bouaghi	0.92
B.B.Arreridj	1.07	Ghazaouet	0.81	Saida	1.01
Béchar	1.32	Guelma	0.83	Sétif	1.04
Bejaia	0.92	Jijel Aer	0.79	Sidi Bel Abbes	0.94
BeniSaf	0.88	Jijel port	0.79	Skikda	0.86
Biskra	1.26	Ksar Chellala	1.09	Souk Ahras	0.99
Bou Saada	1.10	Maghnia	0.93	Tebassa	1.00
Bouira	1.04	Mascara	0.95	Tenes	0.95
Chlef	0.93	Mecheria	1.14	Tiaret	1.08
Constantine	0.91	Medea	1.05	TiziOuzou	0.83
DarElbeida	0.89	Miliana	0.97	Tlemcen Zen	0.93

Tableau 2.10. Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule del'ETP_ANRH

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ai	-0.022	-0.01	-0.001	0.01	0.02	0.025	0.02	0.014	0.003	-0.008	-0.019	-0.025
bi	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308

En appliquant la relation (2.3) de l'ETP_ANRH, ces valeurs numériques mensuelles interannuelles sont consignées dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11. Evolution mensuelle interannuelle de l'ETP_ANRH

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août
ETP_ANRH (mm)	137,5	81,4	43,1	29,7	32,5	42,9	79,0	124,8	166,1	197,4	221,9	199,4

La figure 2.7 montre en comparaison l'évolution des ETP évaluées simultanément par les deux relations (2.2) et (2.3).

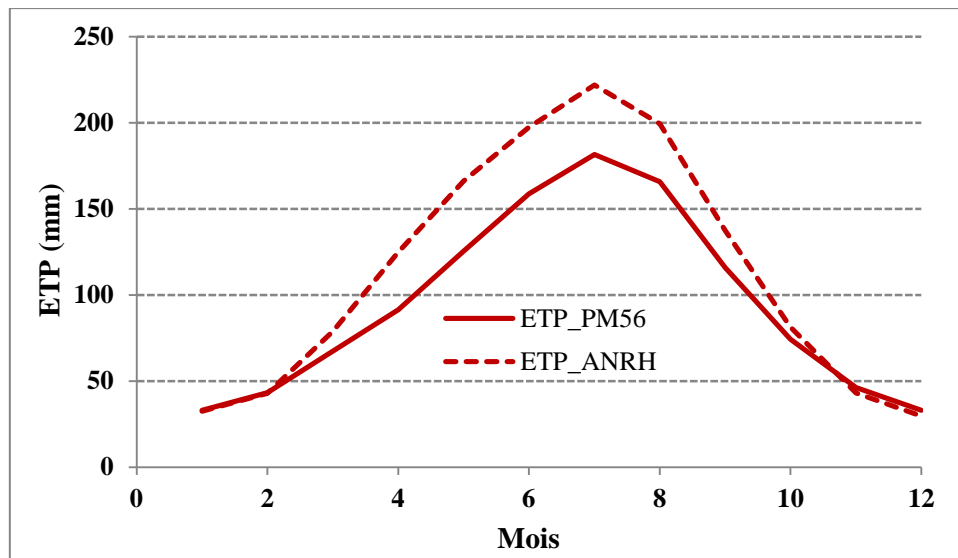


Fig. 2.7. Comparaison de l'évolution des ETP évaluées simultanément par les deux relations d'ETP_PM56 et ETP_ANRH

Les tableaux 2.10 et 2.11 ainsi que la figure 2.7 indiquent clairement que la relation l'ETP_ANRH surestime les valeurs de l'évapotranspiration.

NB : Les modèles conceptuels type GR n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle, cette dernière pouvant être une courbe moyenne interannuelle (Oudin, 2004).

II.6. Conclusion

La collecte des données, pluviométriques et hydrométriques ainsi que leurs présentations sous forme de tableaux de valeurs numériques et sous forme de graphiques illustratifs, qui va servir de déceler la nature de ces données et leur aptitude à se prêter à des procédures de modélisations à entamer dans la deuxième partie de ce mémoire.

CHAPITRE 3 : Notions liées à la modélisation basée sur les modèles conceptuels et les analyses des séries temporelles et aperçu bibliographique

III.1. Introduction

Le présent chapitre ne se propose plus tant qu'état de l'art ou du moins un état des connaissances à propos de tout ce qui est modèle conceptuel ou modèle de séries temporelles. Cependant cette section d'étude se limitera délibérément aux définitions des notions de base liées à ces types de modèles. Outre ces limitations, la bibliographie s'exposera comme des aperçus non exhaustifs et juste une évocation et à titre d'exemples indicatifs sous forme de thèses et publications récentes.

III.2. Notions liées à la modélisation basée sur les modèles conceptuels et les analyses des séries temporelles

III.2.1. Notions liées à la modélisation basée sur les modèles conceptuels

III.2.1.1. Définition d'un modèle conceptuel

Le terme "modèle" désigne un ensemble de relations mathématiques destiné à trouver une représentation simplifiée d'un phénomène naturel complexe. En hydrologie, un modèle de simulation des débits traduit par des expressions mathématiques des relations qui existent entre les différents processus physiques qui forment le cycle terrestre de l'eau. Une théorie exhaustive et déterministe de tous ces phénomènes est très complexe à mettre sur pied et l'on s'efforce de trouver des simplifications qui permettent de faciliter cette tâche tout en restant le plus proche de la réalité, (Chkir, 1994).

La "conception" veut dire formation d'un concept dans l'esprit. C'est la définition d'un produit par rapport à sa cible. On peut dire aussi que c'est la représentation mentale générale et abstraite d'un produit (Petit Robert, 2009).

Un modèle doit répondre à deux critères bien souvent antagonistes : il doit être suffisamment simple pour que sa formulation soit possible et que son exploitation soit aisée et le plus complet possible pour décrire plus fidèlement le système étudié.

Les modèles conceptuels en hydrologie permettent de simuler le comportement du bassin versant à travers des réservoirs censés reproduire le cycle hydrologique.

La modélisation hydrologique est une activité très répandue parmi les hydrologues. Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. Grâce aux progrès importants réalisés

dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques les modèles hydrologiques utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique. Cependant, du fait du grand nombre de paramètres qui interviennent dans les processus hydrologiques et la complexité de ces bassins, cette approche pointue n'apporte pas forcément des résultats meilleurs.

III.2.1.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

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

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

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

Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure 3.1. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

- **Production**

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

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right) \right) \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)} \quad (3.1)$$

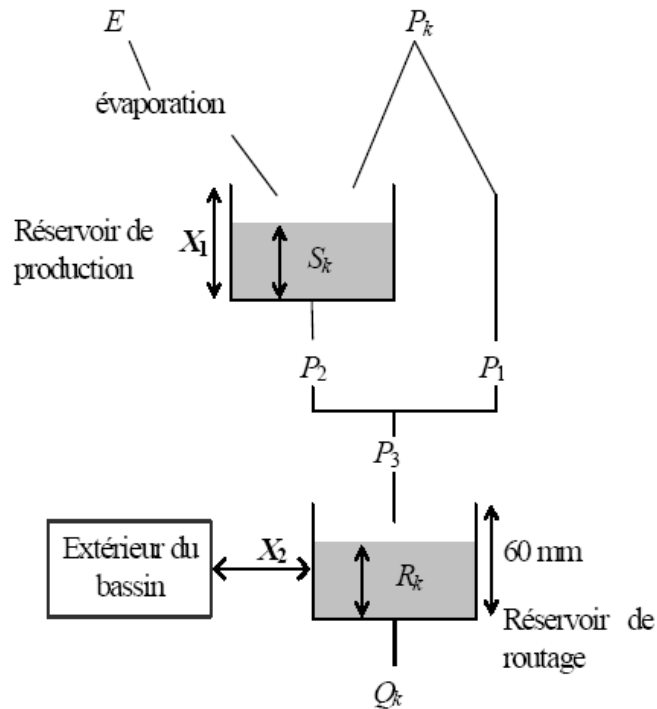


Figure 3.1. Schéma de la structure du modèle GR2M selon (Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006b))

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

$$P_1 = P - P_s' \quad (3.2)$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad (3.3)$$

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

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \left(\frac{S'}{X_1} \right) \right) \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)} \quad (3.4)$$

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

$$S'' = S' - E_s \quad (3.5)$$

- **Percolation**

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

$$P_2 = S'' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{1/3} \right\} \quad (3.6)$$

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

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad (3.7)$$

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

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

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (3.8)$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad (3.9)$$

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

$$F = (X_2 - 1)R' \quad (3.10)$$

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

$$R'' = X_2 R' \quad (3.11)$$

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad (3.12)$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' + Q_k \quad (3.13)$$

Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

III.2.1.3. Applications du modèle GR2M

Le modèle GR2M ainsi présenté peut être utilisé pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer :

- La reconstitution ou l'extension de séries de débit : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;
- La prédétermination : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;

- La prévision à moyen (de quelques mois) : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;
- La gestion ou le dimensionnement d'ouvrages : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage.

III.2.2. Notions liées à la modélisation basée sur les analyses des séries temporelles

Une série temporelle, ou série chronologique, de taille N est un ensemble d'observations qui se distinguent par le rôle important que joue l'ordre dans lequel elles ont été recueillies.

III.2.2.1. Modèle ARIMA

Le type de modèles à adopter par la présente étude consiste en une catégorie des modèles qui cherche à déterminer chaque valeur de la série temporelle à l'échelle considérée en fonction des valeurs qui la précèdent ($X_t = f(X_{(t-1)}, X_{(t-2)}, \dots)$). C'est le cas des modèles ARIMA ("AutoRegressive – Integrated – MovingAverage"). Cette catégorie de modèles a été popularisée et formalisée par [Box et Jenkins \(1976\)](#).

Les processus autorégressifs supposent que chaque valeur de la série temporelle peut être prédite par la somme pondérée d'un ensemble de valeurs précédentes ajoutées d'un terme aléatoire d'erreur. Le processus d'intégration suppose que chacune de ces valeurs présente une différence constante avec celle qui la précède. Les processus de moyenne mobile supposent de même que chacune de ces valeurs est fonction des erreurs entachant les valeurs précédentes, augmentée de sa propre erreur. Un modèle ARIMA non saisonnier est ordonné comme modèle ARIMA (p,d,q), dans lequel: p est le nombre de termes auto-régressifs, d est le nombre non saisonnier de différenciation et q est le nombre de moyennes mobiles.

III.2.2.2. Notion de normalisation

La normalisation standard s'effectue sur les valeurs de la variable brute X_{Br} . Toutes les valeurs brutes seront diminuées de la valeur moyenne \bar{X} et divisées ensuite par l'écart type σ_X . La nouvelle variable X_{Nor} se dit variable normalisée ou variable centrée réduite, calculée par la relation 3.14.

$$X_{Nor} = \frac{X_{Br} - \bar{X}}{\sigma_X} \quad (3.14)$$

III.2.2.3. Notion de transformation

L'application d'une transformation de type « Box-Cox » peut stabiliser la variance des données brutes X_{Br} et aboutit à des séries chronologiques moins asymétriques désignées par X_{Tr} . La présence des valeurs nulles dans la série originale nécessite un ajout d'une constante λ_2 . L'optimisation de l'exposant λ_1 assure alors l'opération de transformation bien connue sous le nom transformation Box-Cox (Box et Cox, 1964), donnée par la relation 3.15.

$$X_{Tr} = \frac{[(X_{Br} + \lambda_2)^{\lambda_1} - 1]}{\lambda_1} \quad (3.15)$$

III.2.2.4. Notion de stationnarité

Une série aléatoires X_t est stationnaire (au sens faible, ou stationnaire tout court), si toutes les variables aléatoires ont même espérance $E(X_t) = E(X_{t'}) = E(X)$, même variance $\sigma^2(X_t) = \sigma^2(X_{t'}) = \sigma^2(X)$, et si les autocorrélations ne dépendent pas du temps, mais simplement de l'écart k entre les périodes considérées : $\text{corr}(X_t, X_{(t+k)}) = \text{corr}(X_{t'}, X_{(t'+k)}) = r_k$. En un mot, cela signifie que les caractéristiques probabilistes sont stables et inchangées au cours du temps.

III.2.2.5. Tests de stationnarité

Le test de stationnarité est effectué dans ce qui suit par deux méthodes. Le premier concerne le test dit Dickey–Fuller (ADF) proposé par Dickey et Fuller (1979) et modifié par Said et Dickey (1984). Le second est dit KPSS test de Kwiatkowski et al., (1992). Pour plus amples informations et détails mathématiques le lecteur du présent mémoire peut consulter l'article de Pieter dans Pieter et al., (2008).

III.2.2.6. Notion de différenciation

L'estimation des modèles ARIMA suppose que l'on travaille sur une série stationnaire. Ceci signifie que la moyenne de la série est constante dans le temps, ainsi que la variance. La meilleure méthode pour éliminer toute tendance est de différencier, c'est-à-dire de remplacer la série originale par la série des différences adjacentes. Une série temporelle qui a besoin d'être différenciée pour atteindre la stationnarité est considérée comme une version intégrée d'une série stationnaire (d'où le terme Integrated).

Une différenciation d'ordre ($d = 1$ par exemple) suppose que la différence entre deux valeurs successives de la série temporelle X_t est constante, et ce, selon la relation de forme générale suivante:

$$X_t - X_{(t-1)} = \mu + \varepsilon_t \quad (3.16)$$

Chaque observation différenciée d'un pas par exemple ($d=1$), de la série temporelle est constituée d'une constante du modèle μ et d'une composante aléatoire ε_t .

III.2.2.7. Notion d'auto-régression

Les modèles auto-régressifs supposent que la série X_t est une fonction linéaire des valeurs précédentes.

$$X_t = \mu + \phi_1 X_{(t-1)} + \phi_2 X_{(t-2)} + \dots + \phi_p X_{(t-p)} + \varepsilon_t \quad (3.17)$$

Explicitement, chaque observation de la série temporelle est constituée d'une constante du modèle μ , d'une combinaison linéaire des observations précédentes dans le temps et d'une composante aléatoire ε_t . $\phi_1, \phi_2 \dots$ et ϕ_p sont les coefficients d'auto-régression. Il faut noter que la relation (3.17) porte soit sur les données brutes, soit sur les données différenciées.

III.2.2.8. Notion de moyenne mobile

Les modèles à moyenne mobile suggèrent que la série présente des fluctuations autour d'une valeur moyenne. On considère donc que la meilleure estimation est représentée par la moyenne pondérée d'un certain nombre de valeurs antérieures selon la relation (3.18) ajoutée d'une somme pondérée des erreurs ayant entaché les valeurs précédentes.

$$X_t = \mu + \theta_1 X_{(t-1)} + \theta_2 X_{(t-2)} + \dots + \theta_q X_{(t-q)} + \varepsilon_t \quad (3.18)$$

Explicitement, chaque observation de la série temporelle est constituée d'une constante du modèle μ , d'une combinaison linéaire des observations précédentes dans le temps et d'une composante aléatoire ε_t . $\theta_1, \theta_2 \dots$ et θ_q sont les coefficients de la moyenne mobile. De même, la relation (3.18) porte soit sur les données brutes, soit sur les données différenciées.

III.2.2.9. Fonction auto-corrélation et auto-corrélations partielles (ACF et PACF)

Un important outil pour la modélisation d'une série temporelle est la fonction d'autocorrélation. L'autocorrélation d'ordre k mesure la force de la corrélation entre les observations distantes de k périodes (décalage, retard ou lag). L'autocorrélation (r_k) d'ordre k pour la série considérée, de taille n et caractérisée par une moyenne \bar{X} , est calculée par :

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2} \quad (3.19)$$

La fonction d'autocorrélation affiche graphiquement les autocorrélations de l'échantillon et les limites des probabilités. Les barres qui s'étendent au-delà des limites supérieures ou inférieures (seuil ou bande de confiance, généralement 95%) correspondent à des autocorrélations statistiquement significatives. Ces limites sont données par la relation (3.20).

$$Se[r_k] = \sqrt{\frac{1}{N} \left[1 + 2 \sum_{t=1}^{N-k} r_k^2 \right]} \quad (3.20)$$

L'erreur-type est alors utilisée pour calculer les limites à $100(1-\alpha)\%$ autour de 0, en utilisant la valeur critique de la loi normale standardisée soit :

$$0 \pm Z_{\alpha/2} Se[r_k] \quad (3.21)$$

Un autre outil important pour la modélisation d'une série temporelle est la fonction d'autocorrélation partielle. Les autocorrélations partielles aident à identifier l'ordre adéquat d'autorégression du modèle (AR) qui doit être utilisé pour décrire la série temporelle observée.

Le décalage auquel l'autocorrélation partielle disparaît indique le nombre de termes autorégressifs à inclure.

La fonction d'autocorrélation joue pour les processus de moyenne mobile le même rôle que la fonction d'autocorrélation partielle pour les processus autorégressifs. Si l'autocorrélation est significative (inférieure au seuil donné par la relation (3.22)) au décalage k mais plus au décalage $k+1$, ceci indique que k termes de moyenne mobile (MA) doivent être ajoutés au modèle (AR).

$$Se[\hat{\phi}_{kk}] = \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (3.22)$$

Cette erreur-type est ensuite utilisée pour calculer les limites à $100(1-\alpha)\%$ autour de 0, en utilisant la valeur critique de la loi normale standardisée soit :

$$0 \pm Z_{\alpha/2} Se[\hat{\phi}_{kk}] \quad (3.23)$$

III.2.2.10. Périodogramme

Les autocorrélations et les autocorrélations partielles décrivent le comportement des données dans le *domaine temps*, c'est-à-dire en estimant des statistiques basées sur la quantité de temps séparant les observations. Il est également utile d'examiner les données dans le *domaine fréquences*, en étudiant la variabilité à différentes fréquences. Il a été montré que toute série temporelle discrète peut être représentée comme la somme d'un ensemble de fonctions sinusoïdales et cosinusoidales à des fréquences appelées fréquences de Fourier.

Une fonction type a la forme suivante :

$$a_i \cos(2\pi f_i t) + b_i \sin(2\pi f_i t) \quad (3.24)$$

Où f_i est la i ème fréquence de Fourier. La i ème fréquence de Fourier est :

$$f_i = \frac{i}{N} \quad (3.25)$$

Pour $i = 0, 1, \dots, N/2$ si N est pair et $i = 0, 1, \dots, (N-1)/2$ si N est impair.

Le périodogramme calcule les ordonnées pour chaque fréquence de Fourier par :

$$I(f_i) = \frac{N}{2} (a_i^2 + b_i^2) \quad (3.26)$$

et les met à une échelle telle que la somme des ordonnées du périodogramme pour toutes les fréquences de Fourier sauf pour $i = 0$ soit égale à la somme des carrés des écarts entre

les données de la série temporelle et sa moyenne, c'est-à-dire : $\sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2$.

En pratique, le périodogramme génère donc une analyse de la variance par fréquence.

III.2.2.11. Périodogramme cumulé

C'est la somme cumulée des ordonnées du périodogramme pour toutes les fréquences de Fourier jusqu'à la i ème comprise, divisée par la somme des ordonnées du périodogramme pour toutes les fréquences de Fourier.

Une ligne diagonale est ajoutée dans le graphique du périodogramme cumulé ainsi que des limites de Kolmogorov-Smirnov à 95% et 99%. Si la série temporelle est purement aléatoire, le périodogramme cumulé doit être entièrement dans les limites à 95% et 99%.

III.2.2.12. Critère de choix des modèles de prévision type ARIMA

Le meilleur modèle de prévision type ARMA est celui qui répond au critère de qualité le plus reconnu à savoir le critère d'information de Akaike (**AIC**), ([Akaike, 1974](#)). Ce dernier critère sélectionne le modèle qui a la plus petite erreur quadratique moyenne en lui appliquant une pénalité qui est fonction du nombre de paramètres inconnus qui doivent être estimés. Le critère d'information de Akaike (**AIC**) favorise donc les modèles parcimonieux et il est calculé par la relation suivante :

$$AIC = 2 \ln(RMSE) + \frac{2c}{N} \quad (3.27)$$

Où **RMSE** est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne durant la période d'estimation, **c** est le nombre de coefficients estimés dans le modèle ajusté et **N** est la taille de l'échantillon utilisé pour ajuster le modèle.

III.3. Aperçu bibliographique

III.3.1. Modèles conceptuels

En Algérie, la modélisation pluie-débit mensuelle a déjà fait l'objet d'études par le département d'hydrologie de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, par l'application du modèle SMAP (Saidi, 1990). Il s'agit d'un modèle à deux réservoirs et six paramètres, deux de ces paramètres à savoir le coefficient de récession de l'écoulement de base, et la capacité de saturation du réservoir sol doivent être estimés en fonction des caractéristiques hydrologiques du bassin étudié.

La modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale a été élaborée par (Kabouya, 1990).

Pour les besoins d'estimation des volumes régularisables des différents ouvrages hydrauliques en Algérie, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et en collaboration avec l'Union Européenne a mis en place une stratégie d'estimation des chroniques des apports mensuels sur toute la période d'étude (sur 516 mois allant de septembre 1965 à août 2008), Cette stratégie est menée sous le titre : « réalisation de l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau » (PNE, 2010).

Des contributions dans le même contexte ont été élaborées au fur et à mesure telles que : (Houichi, 2010) où les débits mensuels de l'Oued Reboâ dans les hauts plateaux Constantinois sont modélisés et simulés par le modèle GR2M. Dans (Houmoura, 2012), les débits mensuels historiques de l'Algérie et au cours de la période (1924 - 1946), sont simulés par le même modèle GR2M. Pour le bassin Oued Bouhamdane, des essais de modélisation et de simulation ont été effectués avec plusieurs succès dans : (Zekkour et Touati, 2013) et (Toulmit et T'kouti, 2013) où l'aspect de stabilité des paramètres du modèle GR2M a été introduit, testé et interprété.

III.3.2. Modèles ARIMA

Le modèle autorégressif ainsi que les modèles autorégressifs et à moyenne mobile ARMA ont été parmi les premiers à être utilisés, cependant, et à notre connaissance, leur applicabilité est rarement explorée au travers les tests moyennant les données hydrologiques des bassins en Algérie.

La modélisation des débits, par l'analyse des séries temporelles, aux différents pas de temps, a fait l'objet de plusieurs études et articles scientifiques et elle a été pour longtemps un domaine d'intérêt de plusieurs chercheurs dont on cite à titre indicatif et sous forme d'aperçu, les travaux suivants : En 1990, Mujumdar et Kumar (1990) ont proposés dix modèles

ARIMA à l'échelle mensuelle et décadaires pour les débits des rivières Indiens. En 1993, Kuo et Sun ont proposés un modèle basé sur la méthodologie de Box-Jenkins pour la prévision des débits décadaires de la rivière Tanshui en Taiwan (Kuo et Sun, 1993). Une thèse de doctorat a fait l'objet de l'application des techniques de séries temporelles aux écoulements des rivières (Tesfaye,2005). Pour la comparaison des modèles ARIMA et les modèles basés sur les neurones artificiels, on cite (Can et al., 2012) où les débits journaliers du bassin Çoruh (Turquie), ont été modélisés par les modèles ARMA et les neurones artificiels. Pour la comparaison des modèles ARIMA avec plusieurs modèles de prévision des débits, on cite l'article de (Ghanbarpour et al., 2012) qui traite la modélisation des écoulements dans le bassin versant Kasilian (Iran).

III .4. Conclusion

Dans le présent chapitre, plusieurs notions, définitions et formulations mathématiques, ont été énumérés, décrites et rappelées. Ces notions concernaient la modélisation basée sur les modèles conceptuels, particulièrement au pas de temps mensuel à savoir le modèle GR2M. Elles concernaient également la modélisation basée sur la méthodologie des analyses des séries temporelles type ARIMA. Deux aperçus distincts ont été donnés de la partie littérature à propos des modèles conceptuels et des modèles ARIMA.

DEUXIEME PARTIE

Adaptation conceptuelle, élaboration des
modèles de séries temporelles et analyse des
résultats

CHAPITRE 4 : Adaptation d'un modèle conceptuel au minimum de paramètres par son applicabilité au bassin versant Oued Bouhamdane

IV.1. Introduction

Pour les besoins d'estimation des volumes régularisables des différents ouvrages hydrauliques en Algérie, l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et en collaboration avec l'Union Européenne a mis en place une stratégie d'estimation des chroniques des apports mensuels sur toute la période d'étude (sur 516 mois allant de septembre 1965 à août 2008), Cette stratégie est menée sous le titre : « réalisation de l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau » (PNE,2010).

La méthodologie d'estimation des apports mensuels proposée est basée sur une modélisation pluie-débit en utilisant un modèle conceptuel global (modèle GR2M /LOIEAU).

Ce modèle conçu par le CEMAGREF nécessite de disposer de deux variables d'entrée :

- Les données de pluies mensuelles ;
- Les données d'ETP mensuelles.

Des contributions dans le même contexte ont été élaborées au fur et à mesure telles que : (Houichi, 2010) et (Houmoura, 2012). Pour le bassin Oued Bouhamdane, des essais de modélisation et de simulation ont été effectués avec plusieurs succès dans : (Zekkour et Touati, 2013) et (Toulmit et T'kouti, 2013).

Dans le présent chapitre, nous contenterons de réaliser un travail similaire qui traite et vérifie l'efficacité du modèle conceptuel GR2M pour la reproduction des débits (apports liquides) dans le bassin versant de l'Oued Bouhamdane tout en tenant compte de :

- L'application du modèle à la section de mesure qui est une station hydrométrique appelée : « Medjez Amar II » où une superficie de 1105km² est contrôlée.
- L'application du modèle à la section de mesure qui est le barrage lui-même « Barrage Hammam Debagh » où les débits (apports liquides) seront déduits de l'équation du bilan hydrologique, dite équation de continuité. La superficie de 1070 km²est, dans ce cas, contrôlée.
- Tester l'influence de la façon d'estimation de l'évapotranspiration sur la performance du modèle conceptuel.

IV.2. Procédure de modélisation conceptuelle retenue

Les performances d'un modèle hydrologique peuvent être appréciées selon plusieurs démarches. Dans le contexte de cette étude, nous appliquerons une démarche qui consiste à séparer la période de données disponibles en deux sous-périodes indépendantes. La première

période sert d'abord à caler le modèle et la seconde à le valider (Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau (PNE Algérie). Mission 2 – volet 1 – Tome 1. Mars 2010). Cette stratégie retenue permet à la présente contribution d'être dans le même contexte des travaux déjà réalisés par l'agence nationale des ressources hydrauliques et permettre des éventuelles comparaisons et remarques.

Nous allons procéder de la même manière comme dans le (PNE. 2010) à un découpage de chaque série de données (N mois d'observation des débits) en trois sous-périodes.

- la première « sous-période », est toujours d'une année et sert à l'initialisation de l'état des réservoirs ;
- la deuxième « sous-période », de taille variable $(N-12)/2$ servira au calage des paramètres du modèle ;
- la dernière « sous-période », le reste de l'échantillon permettra la validation du modèle.

IV.3. Quelques critères de performances pour juger la conceptualisation

Nous allons opter pour deux types de critères :

Les critères graphiques et les critères numériques.

IV.3.1. Les critères graphiques

Quel que soit le modèle, ou le pas de temps utilisé, l'analyse graphique est indispensable et primordiale, pour juger de la qualité du modèle, cela est obtenu en ajustant graphiquement les courbes des débits observés avec celles des débits calculés par le modèle.

IV.3.2. Les critères numériques

Ils donnent une information quantitative et indiquent des pertinences qualitatives sur les résultats de la modélisation, cela est réalisé par une estimation globale et numérique de l'écart entre les résultats calculés et les données observées sur la période de calage et de validation.

Dans la littérature et dans diverses disciplines, on constate que plusieurs indices et critères de performance ont été énumérés, testés et approuvés par des chercheurs spécialisés en modélisation. On se limitera dans cette contribution aux notions de : critère de Nash, coefficient de détermination (R^2), coefficient de corrélation, la racine de la moyenne des erreurs quadratiques notée **RMSE**, la moyenne biaisée et le rapport des coefficients de variation des périodes de calage et validation.

IV.3.2.1. Critère de Nash (NS)

Le critère de calage retenu ici pour l'optimisation des paramètres par la méthode pas-à-pas est le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970), calculé sur les débits par :

$$NS = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (4.1)$$

Où

O_i :valeurs observées,

P : valeurs calculées ou prévues par le modèle,

\bar{O} : est la moyenne des débits observés sur la période voulue.

IV.3.2.2. Le coefficient de détermination (R^2)

Il est donné par la relation (4.2) peut être interprété comme la proportion de la variance des valeurs P_i du modèle de moyenne \bar{P} imputable à la variance des valeurs O_i observées ayant une moyenne \bar{O} pour un échantillon de taille N .

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (4.2)$$

IV.3.2.3. Le coefficient de corrélation (R)

La racine du coefficient de détermination indique le coefficient de corrélation qui reflète le degré de liaison entre l'observé et le simulé.

IV.3.2.4. La racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)

Cette entité mathématique est donnée par la relation (4.3) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad (4.3)$$

IV.3.2.5. La moyenne biaisée (B)

Elle définit la déférence entre la moyenne des débits observés et calculés. Ce paramètre est défini par la relation suivante :

$$B = \bar{P} - \bar{O} \quad (4.4)$$

Avec:

\bar{P} : Moyenne des valeurs calculées ou prévues par le modèle,

\bar{O} : Moyenne des valeurs observées.

Lorsque B tend vers zéro l'optimisation du modèle est réalisée et le modèle est jugée acceptable.

IV.3.2.6. Le rapport des coefficients de variation (I)

L'optimisation des modèles peut être complétée en comparant les coefficients de variation des débits observés avec ceux calculés.

$$I = \frac{Cv_p}{Cv_o} \quad (4.5)$$

Avec:

Cv_p : Coefficient de variation des valeurs calculées ou prévues par le modèle,

Cv_o : Coefficient de variation des valeurs observées.

L'indice I, est optimisé si sa valeur est proche de l'unité, ainsi le modèle est jugée acceptable.

Un modèle est jugée meilleur (adéquat à adopter) s'il possède un Nash le plus fort possible (proche de 100%), un coefficient de détermination, un coefficient de corrélation et un rapport des coefficients de variation proches de l'unité. Comme il doit posséder une moyenne biaisée proche de zéro et une **RMSE** à forte possibilité la plus faible.

IV.4. Modèle conceptuel pour la période (1974/75-1980/81) appliqué à la station Medjez Amar II (Superficie contrôlée de 1105 km²)

Le modèle conceptuel GR2M est appliqué à quatre reprises selon deux principaux cas:

1. Considération de la moyenne empirique des pluies mensuelles enregistrées dans les stations pluviométriques pour la période commune (1974/75-1980/81) en tenant compte de l'évapotranspiration estimée par la relation de Penman Monteith (FAO56),

désignée par ETP_PM56 en premier lieu et estimée par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH en deuxième lieu.

Cette première configuration consiste en l'application du modèle conceptuel mensuel à deux paramètres dit GR2M ; les valeurs des pluies mensuelles considérées sont issues des sept stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Ras el Akba, Ain Makhoulf, Guelma Lycée, Ain el Kelb, Bousnib et Ouled Nacer. La pluie (en mm) faisant entrée principale au modèle conceptuel est la moyenne arithmétique des pluies des sept stations. L'entrée concernant l'évapotranspiration mensuelle (en mm) est estimée par la relation universelle de Peman Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 et estimée encore une fois par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH. Quant aux débits pris en mm aussi, sont issus de la station hydrométrique Medjez Amar II contrôlant la totalité du bassin versant d'Oued Bouhamdane pour une superficie de 1105 km².

Les évolutions graphiques de toutes ces données sont illustrées par les figures (4.1 et 4.2).

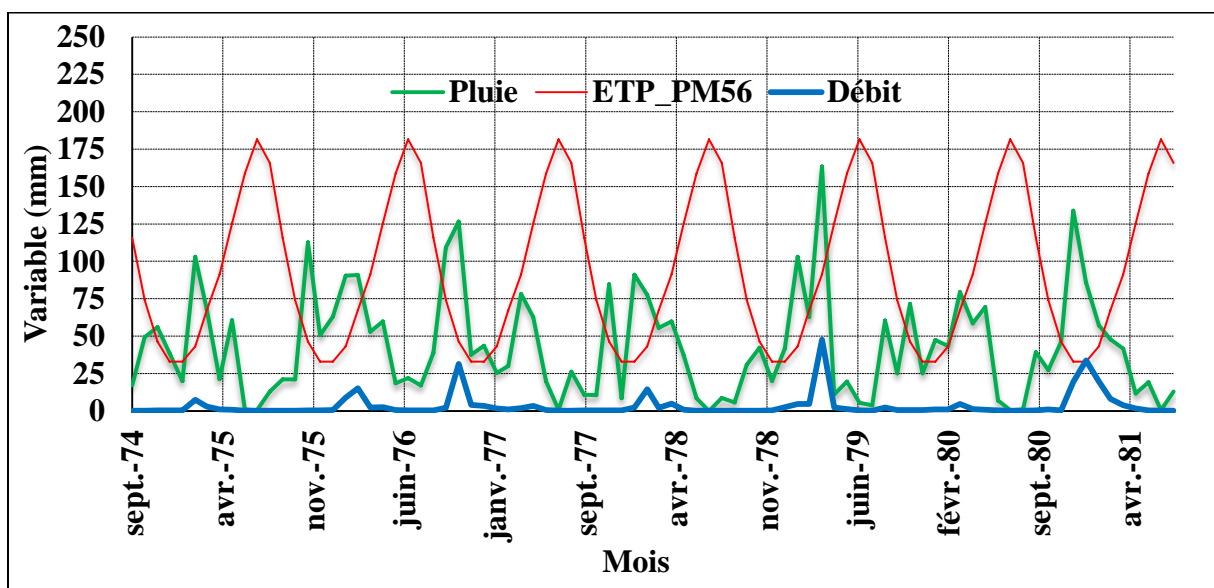


Figure 4.1. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

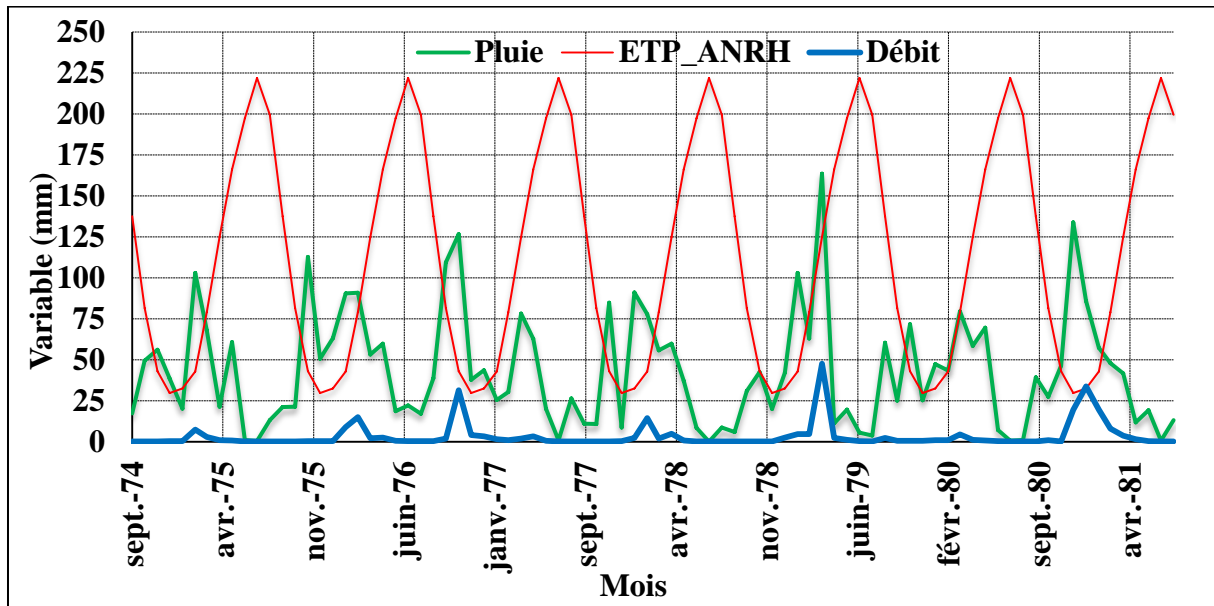


Figure 4.2. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

L'application du modèle conceptuel GR2M pour ce premier cas a aboutit aux résultats numériques consignées dans le tableau 4.1. Les visualisations graphiques sont données par les figures (4.3 et 4.4).

Tableau 4.1. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH Débits mesurés à la station Medjez Amar II

Critère	Calage		Validation	
	ETP_PM56	ETP_ANRH	ETP_PM56	ETP_ANRH
<i>Nash</i>	71.007	68.47	78.48	76.91
<i>R</i>	0.853	0.836	0.942	0.937
<i>RMSE</i>	3.210	3.348	4.627	4.788
<i>B</i>	0.503	0.450	-1.140	-1.198
<i>I</i>	0.86	0.87	1.33	1.35
<i>Paramètres du Modèle GR2M</i>	X1=4.39	X1=4.31		
	X2=0.51	X2=0.49		

Pour ce cas et tenant compte de la phase validation, il ressort des résultats du tableau 4.1 que la considération de l'ETP_PM56 améliore légèrement les performances du modèle GR2M. Bien que les valeurs différentes de l'unité de *I* (1.33 et 1.35) indiquent que le modèle ne reproduit pas bien les valeurs extrêmes fortes des débits (crues). On constate aussi que le

choix de la relation de l'ETP n'influe plus sur les valeurs des paramètres de calage (X1 et X2) du modèle conceptuel.

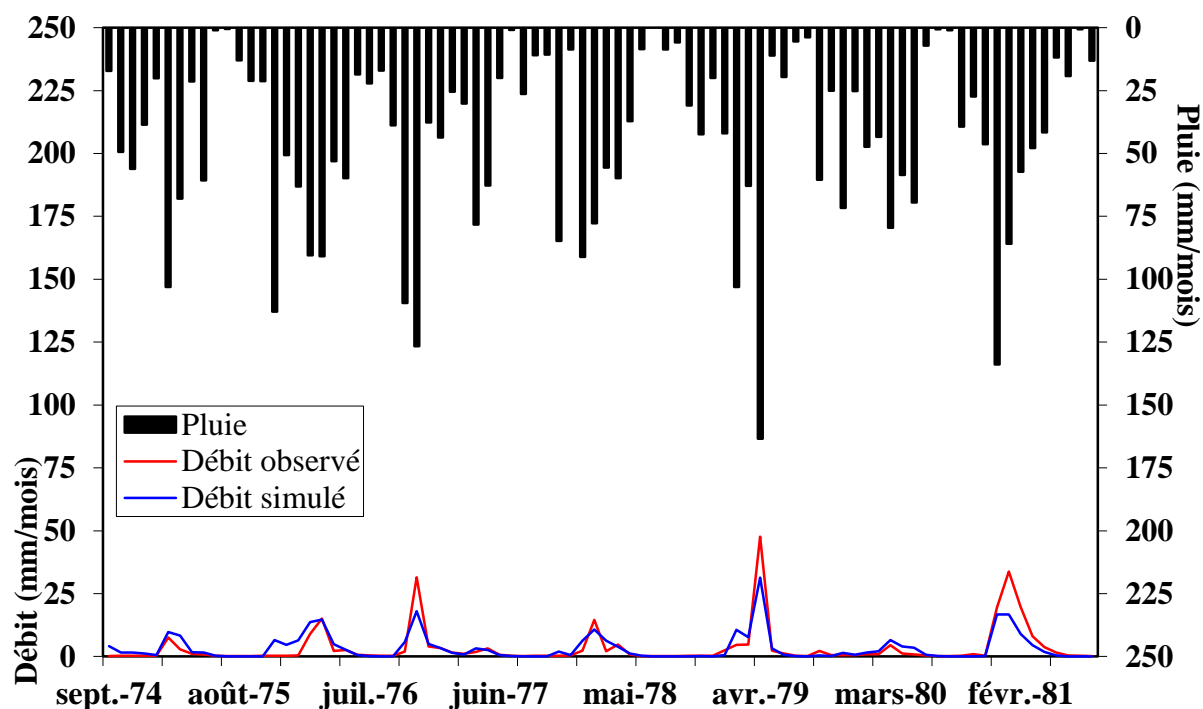


Figure 4.3. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

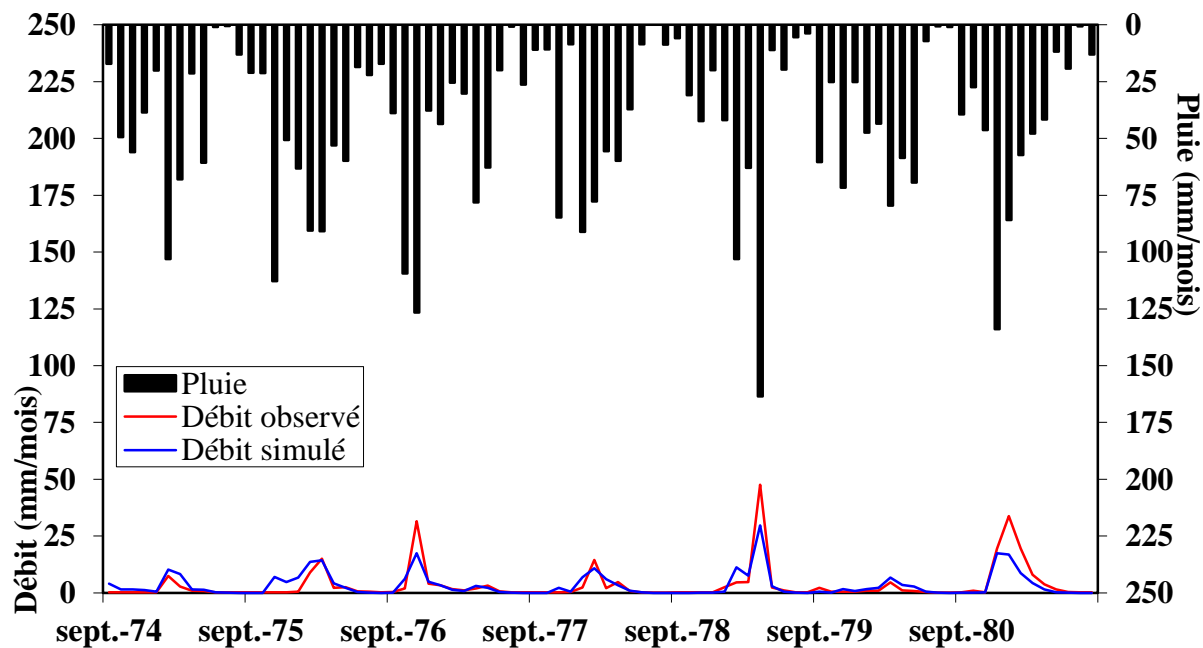


Figure 4.4. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

2. Considération de la moyenne pondérée des pluies mensuelles enregistrées dans les stations pluviométriques pour la période commune (1974/75-1980/81) en tenant compte de l'évapotranspiration estimée par la relation de Penman Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 en premier lieu et estimée par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH en deuxième lieu, de même comme pour le premier cas.

Cette deuxième configuration consiste en l'application du modèle conceptuel mensuel à deux paramètres dit GR2M ; les valeurs des pluies mensuelles considérées sont issues des sept stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Ras el Akba, Ain Makhoulf, Guelma Lycée, Ain el Kelb, Bousnib et Ouled Nacer. La pluie (en mm) faisant entrée principale au modèle conceptuel est la moyenne pondérée des pluies des sept stations, et ce, pour une meilleure optimisation et un ultime calage. L'entrée concernant l'évapotranspiration mensuelle (en mm) est estimée par la relation universelle de Peman-Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 et estimée aussi par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH. Quant aux débits pris en mm aussi, sont issus de la station hydrométrique Medjez Amar II contrôlant la totalité du bassin versant d'Oued Bouhamdane pour une superficie de 1105 km².

Les évolutions graphiques de toutes ces données sont illustrées par les figures (4.5 et 4.6)

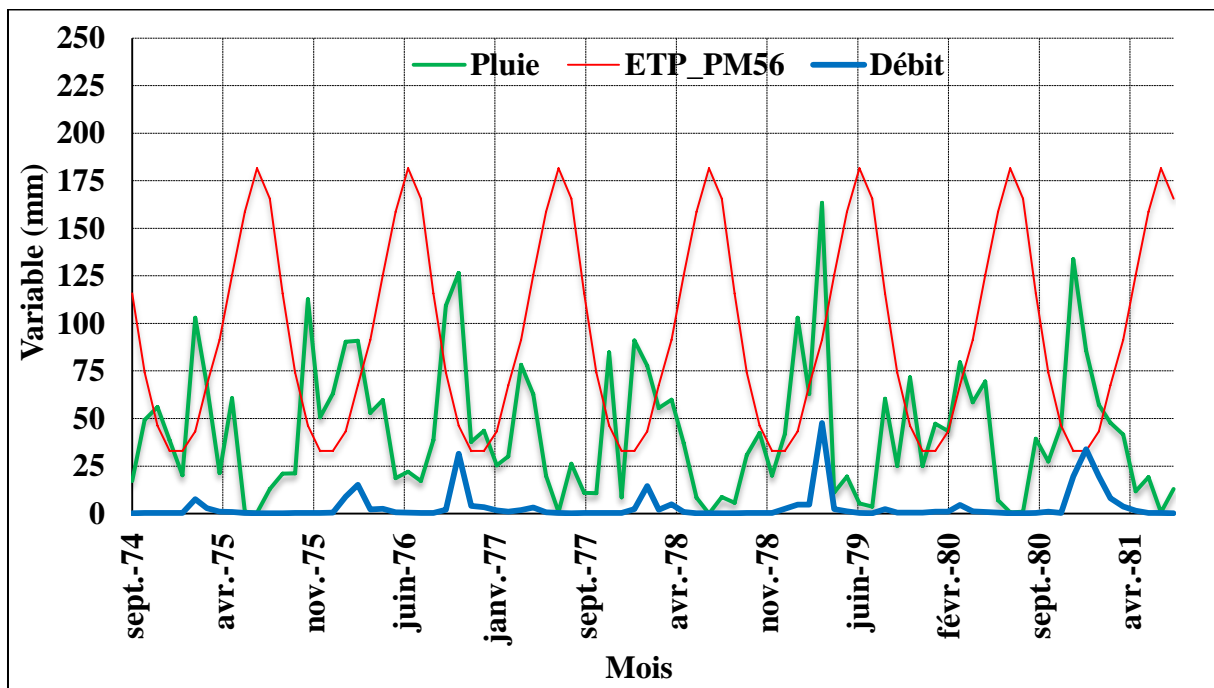


Figure 4.5. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

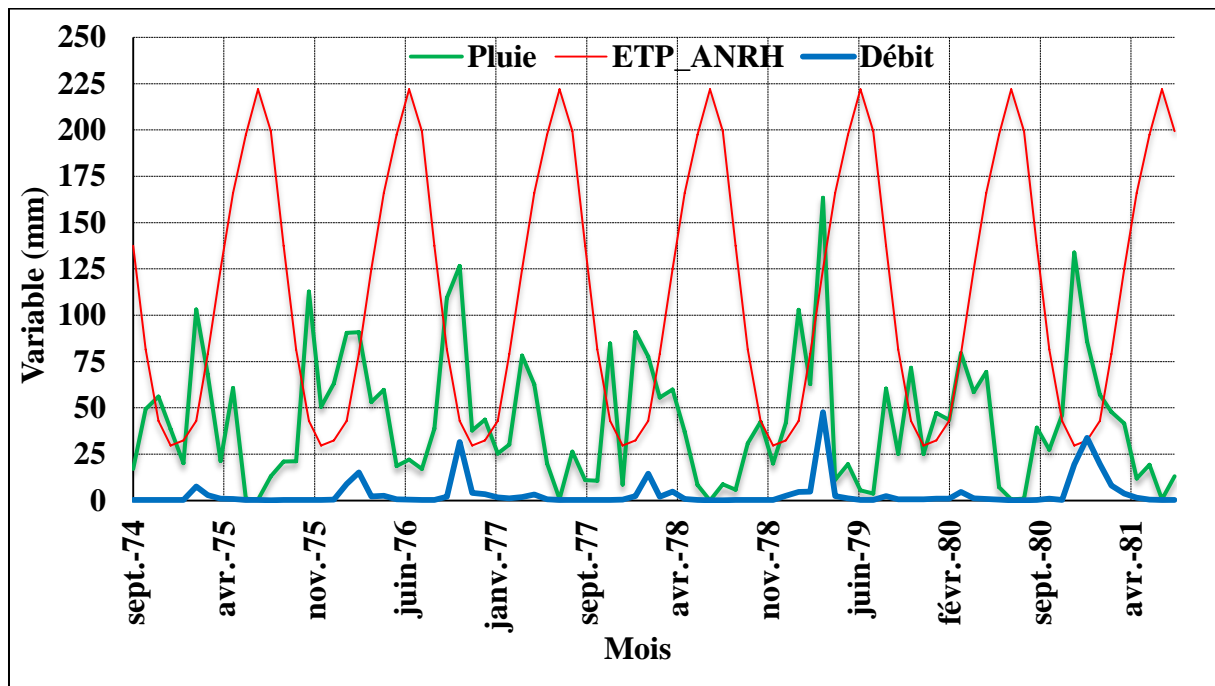


Figure 4.6. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

L'application du modèle conceptuel GR2M pour ce deuxième cas a aboutit aux résultats numériques consignées dans le tableau 4.2. Les visualisations graphiques sont données par les figures (4.7 et 4.8).

Tableau 4.2. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH Débits mesurés à la station Medjez Amar II

Critère	Calage		Validation	
	ETP_PM56	ETP_ANRH	ETP_PM56	ETP_ANRH
<i>Nash</i>	85.423	84.425	75.946	75.105
<i>R</i>	0.928	0.922	0.910	0.905
<i>RMSE</i>	2.276	2.353	4.887	4.972
<i>B</i>	0.329	0.307	-1.636	-1.638
<i>I</i>	0.9	0.91	1.55	1.55
<i>Paramètres du Modèle GR2M</i>	X1=4.37	X1=4.33		
	X2=0.51	X2=0.50		

Pour ce cas et tenant compte de la phase validation, il ressort des résultats du tableau 4.2 que la considération de l'ETP_PM56 améliore légèrement les performances du modèle GR2M. Bien que la valeur inchangée de *I* (1.55) indique aussi que le modèle ne reproduit pas

bien les valeurs extrêmes fortes des débits (crues). On constate aussi que le choix de la relation de l'ETP n'influe plus sur les valeurs des paramètres de calage (X1 et X2) du modèle conceptuel.

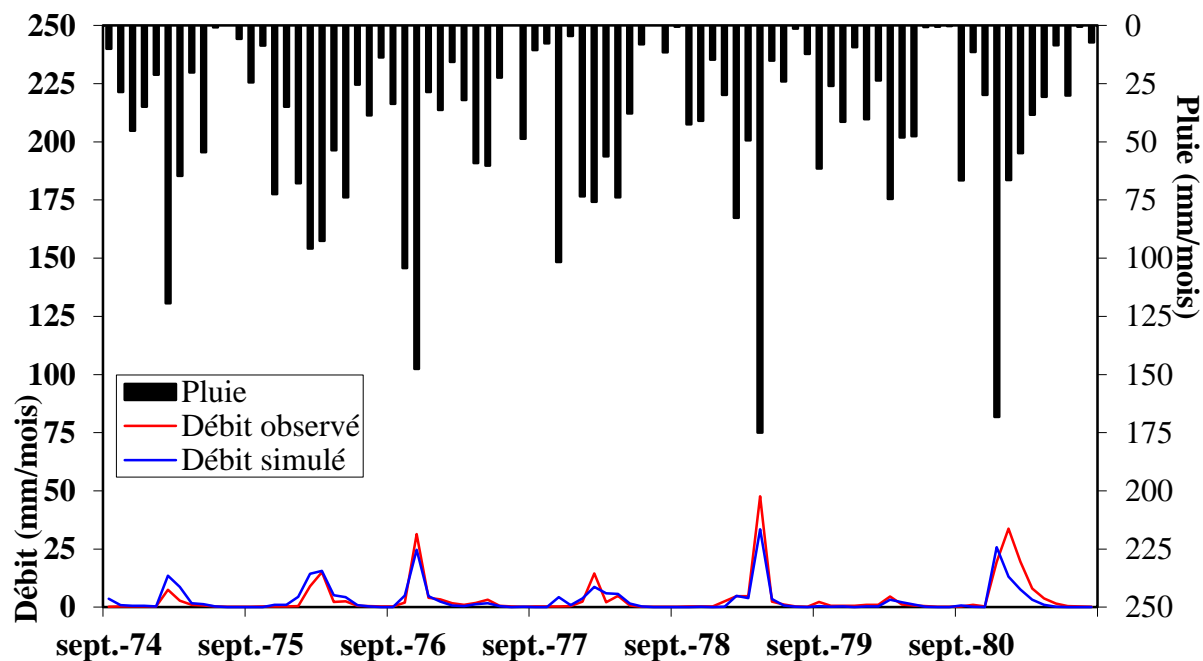


Figure 4.7. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_PM56 et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

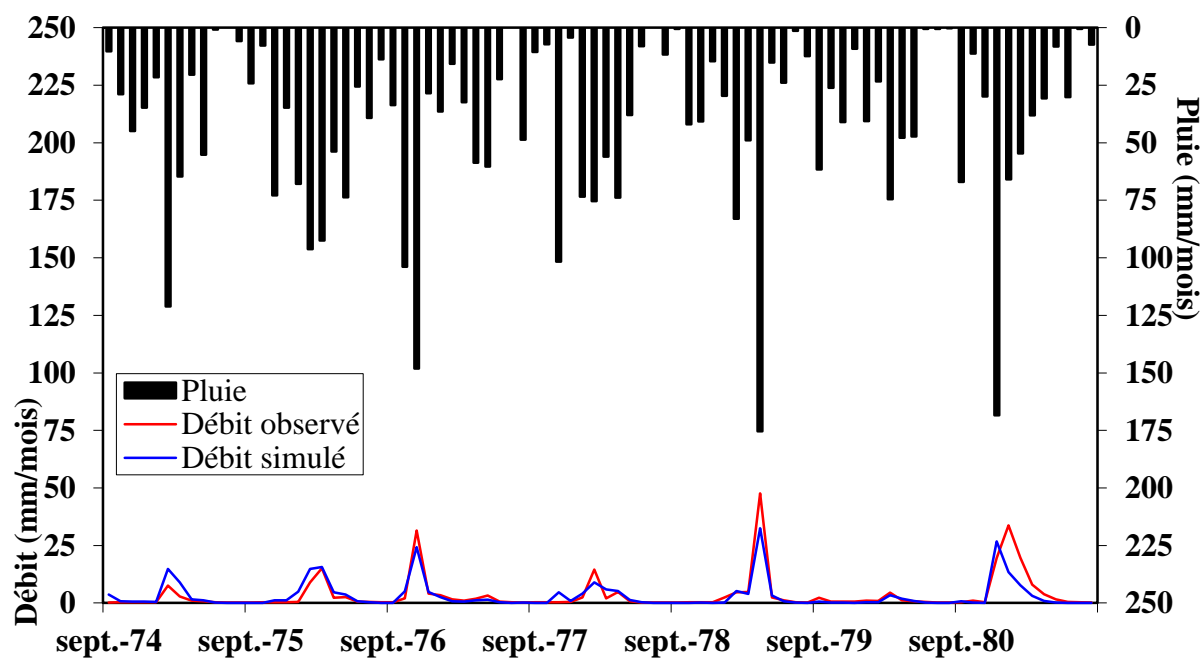


Figure 4.8. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1974/75 - 1980/81). Moyenne pondérée des pluies, ETP_ANRH et Débits mesurés à la station Medjez Amar II

Remarque : La meilleure optimisation et l'ultime calage est obtenu en faisant maximiser le critère de Nash pour des coefficients de pondération calculés par le Solveur Excel. Ces coefficients affectent les valeurs mensuelles des pluies mesurées dans les sept stations sus-indiquées. La procédure d'optimisation donne les coefficients de pondération suivants : (11 % pour Bordj Sabath, 73.5% pour Ain Makhoulf et 15.5% pour Guelma Lycée et 0% pour le reste des stations). Aucune justification physique semble évidente pour la prise en compte de ces trois stations, c'est juste le principe dit : « pour vu que ça marche » qui gère a priori ce genre d'optimisation.

En vertu des résultats mentionnés dans les tableaux 4.1 et 4.2, il ressort que la procédure de pondération est purement mathématique et elle ne fait qu'améliorer les performances en phase de calage du modèle GR2M, par contre en phase de validation la considération de la moyenne arithmétique des pluies mensuelles est la meilleure. Dans ce que suit la procédure de pondération sera tout de même écartée.

IV.5. Modèle conceptuel pour la période (1990/91-1998/99) appliqué au sein du barrage Hammam Debagh (Superficie contrôlée de 1070 km²)

Le modèle conceptuel GR2M est appliqué à deux reprises selon un seul cas qui est:

1. La considération de la moyenne empirique des pluies mensuelles enregistrées dans les stations pluviométriques pour la période commune (1990/91-1998/99) en tenant compte de l'évapotranspiration estimée par la relation de Penman Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 en premier lieu et estimée par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH en deuxième lieu.

Cette première configuration consiste en l'application du modèle conceptuel mensuel à deux paramètres dit GR2M ; les valeurs des pluies mensuelles considérées sont issues des sept stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Ras el Akba, Medjez Amar, Ain Makhoulf, Guelma Lycée, Bousnib et la station du barrage Hammam Debagh. La pluie (en mm) faisant entrée principale au modèle conceptuel est la moyenne arithmétique des pluies des sept stations. L'entrée concernant l'évapotranspiration mensuelle (en mm) est estimée par la relation universelle de Peman-Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 et estimée encore une fois par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH. Quant aux débits pris en mm aussi, sont issus de l'équation de continuité vérifiée au sein du barrage Hammam Debagh selon la relation déjà donnée dans le chapitre 2 de la première partie, et ce, selon l'ANBT.

Les évolutions graphiques de toutes ces données sont illustrées par les figures (4.9 et 4.10).

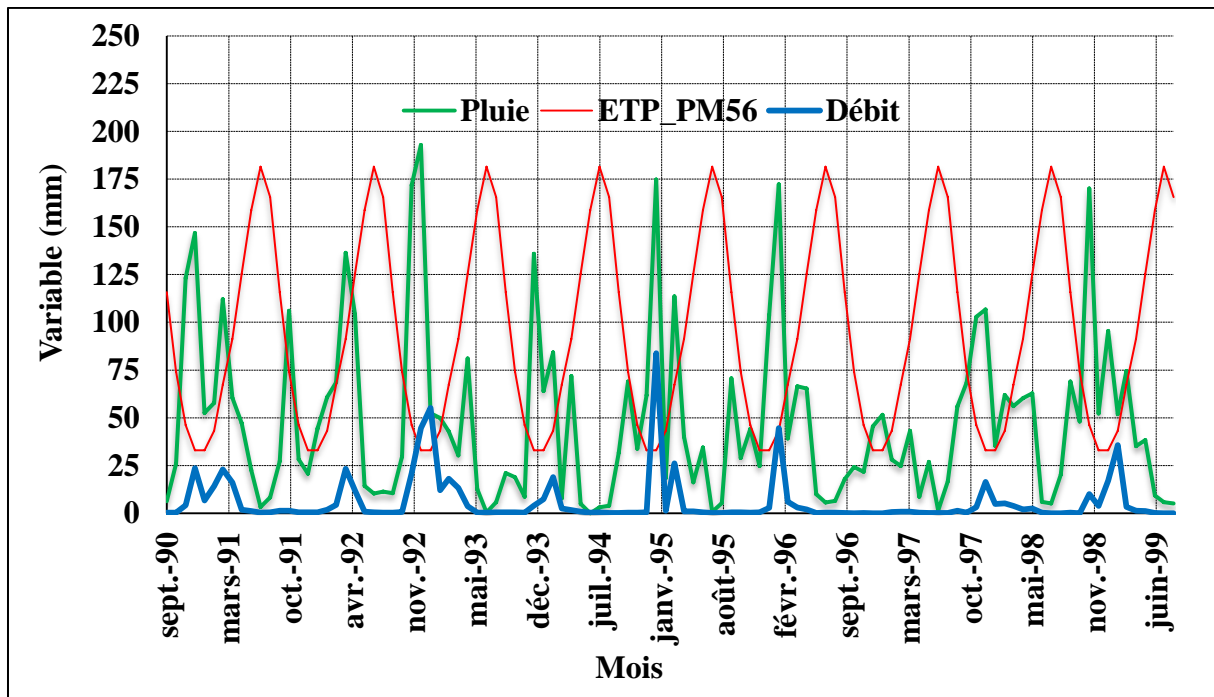


Figure 4.9. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT

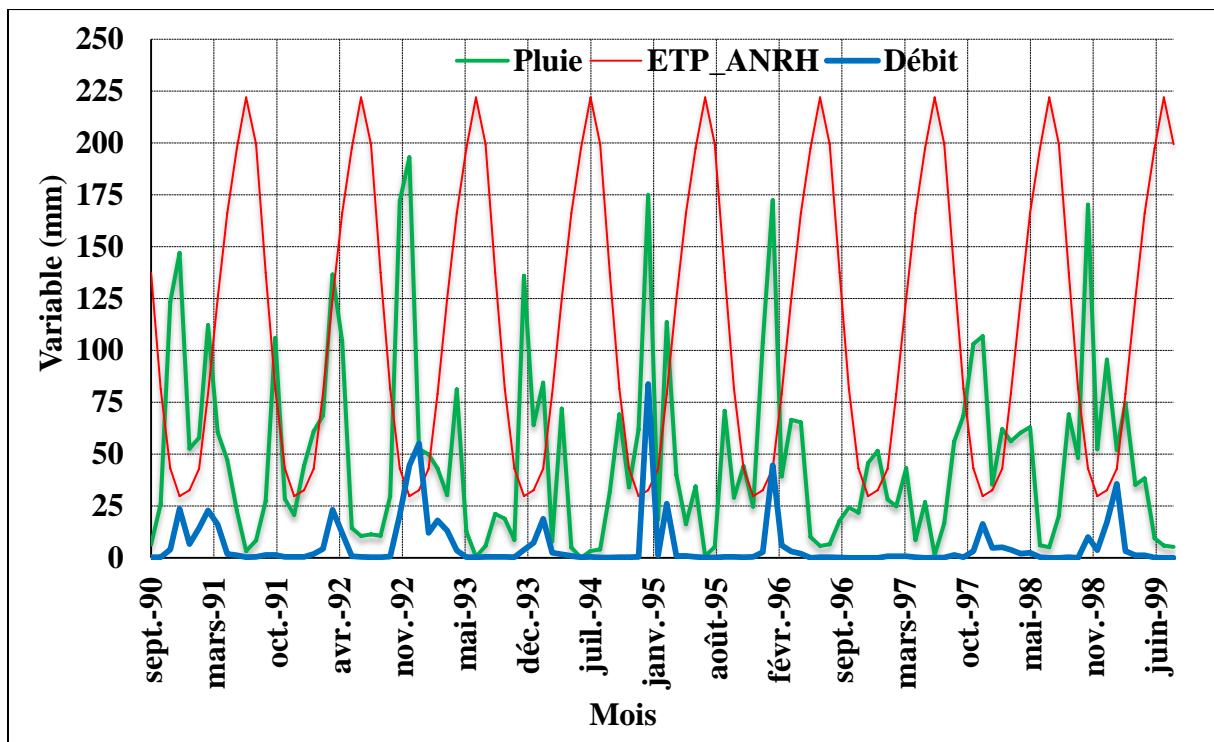


Figure 4.10. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT

L'application du modèle conceptuel GR2M pour ce cas a aboutit aux résultats numériques consignées dans le tableau 4.3. Les visualisations graphiques sont données par les figures (4.11 et 4.12).

Tableau 4.3. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH et Débits selon ANBT

Critère	Calage		Validation	
	ETP_PM56	ETP_ANRH	ETP_PM56	ETP_ANRH
<i>Nash</i>	67.941	68.614	56.29	57.148
<i>R</i>	0.805	0.829	0.9797	0.864
<i>RMSE</i>	10.398	8.910	6.465	5.543
<i>B</i>	-0.06	-0.173	2.239	2.168
<i>I</i>	1.01	1.02	0.62	0.63
<i>Paramètres du Modèle GR2M</i>	X1=4.92	X1=4.93		
	X2=0.66	X2=0.66		

Pour ce cas et tenant compte de la phase validation, il ressort des résultats du tableau 4.3 que la considération de l'ETP_ANRH améliore légèrement les performances du modèle GR2M. Bien que les valeurs faibles et inférieures à l'unité de *I* (0.62 et 0.63) indiquent que le modèle ne reproduit pas bien les valeurs extrêmes faibles des débits (étiages). On constate aussi que le choix de la relation de l'ETP n'influe plus sur les valeurs des paramètres de calage (X1 et X2) du modèle conceptuel.

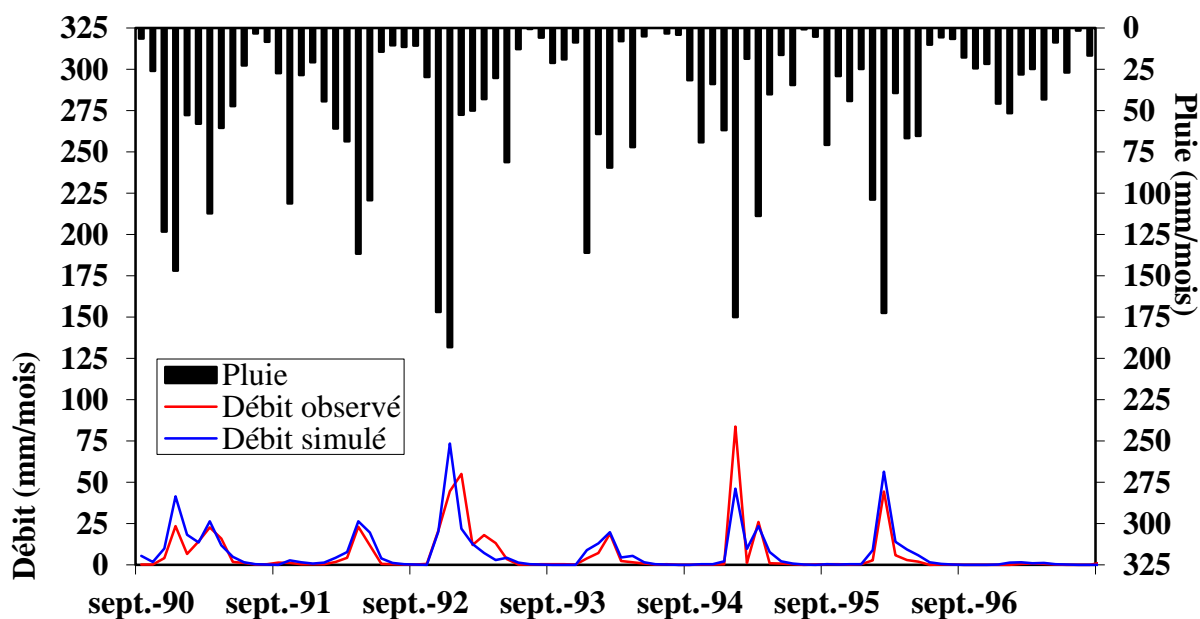


Figure 4.11. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91 - 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT

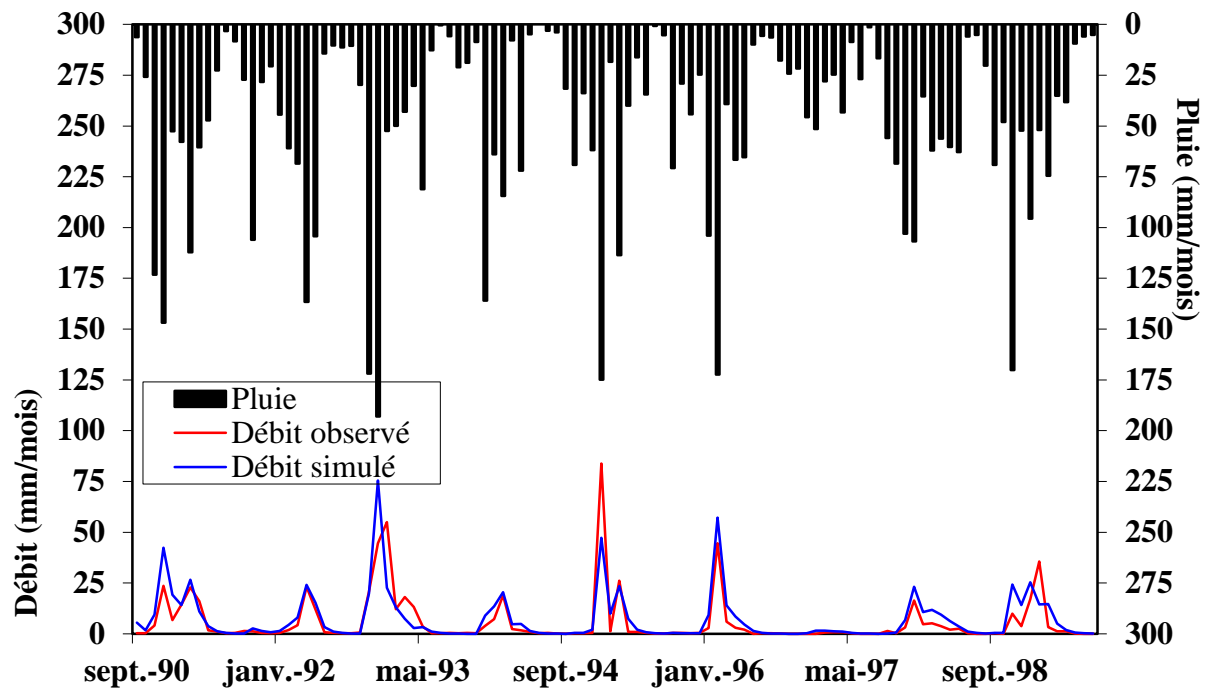


Figure 4.12. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91- 1998/99). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT

IV.6. Modèle conceptuel pour la période (1990/91-2010/11) appliqué au sein du barrage Hammam Debagh (Superficie contrôlée de 1070 km²)

Le modèle conceptuel GR2M est appliqué à deux reprises selon deux cas qui sont:

1. La considération de la moyenne empirique des pluies mensuelles enregistrées dans les stations pluviométriques pour la période commune (1990/91-2010/11) en tenant compte de l'évapotranspiration estimée par la relation de Penman Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 en premier lieu et estimée par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH en deuxième lieu.

Cette première configuration consiste en l'application du modèle conceptuel mensuel à deux paramètres dit GR2M ; les valeurs des pluies mensuelles considérées sont issues des quatre stations de mesures pluviométriques suivantes : Bordj Sabath, Medjez Amar, Bousnib et la station du barrage Hammam Debagh. La pluie (en mm) faisant entrée principale au modèle conceptuel est la moyenne arithmétique des pluies des quatre stations. L'entrée concernant l'évapotranspiration mensuelle (en mm) est estimée par la relation universelle de Peman-Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 et estimée encore une fois par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH. Quant aux débits pris en mm aussi, sont issus de l'équation de continuité vérifiée au sein du barrage Hammam Debagh selon la relation déjà donnée dans le chapitre 2 de la première partie.

Les évolutions graphiques de toutes ces données sont illustrées par les figures (13 et 14).

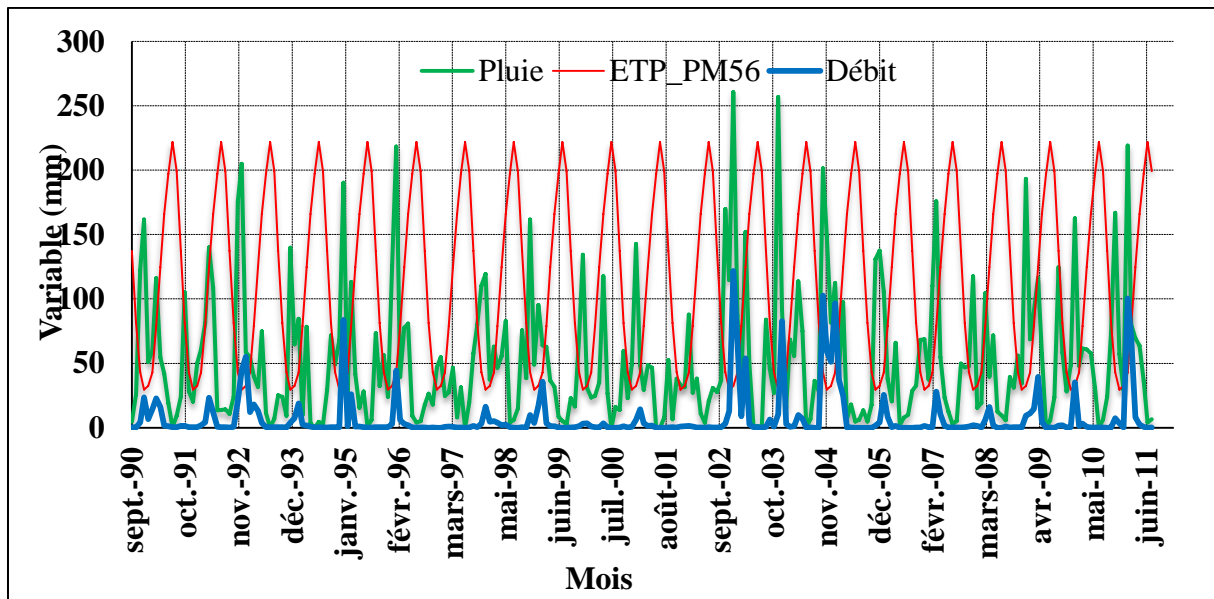


Figure 4.13. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT

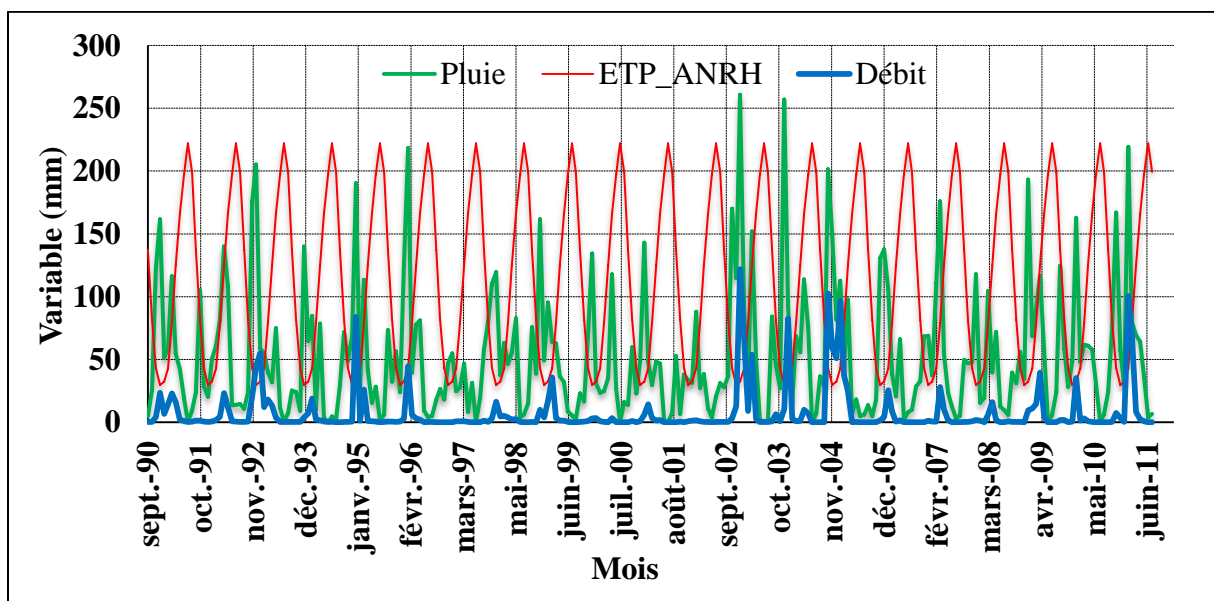


Figure 4.14. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT

L'application du modèle conceptuel GR2M pour ce cas a abouti aux résultats numériques consignés dans le tableau 4.4. Les visualisations graphiques sont données par les figures (15 et 16).

Tableau4.4. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et ETP_ANRH et Débits selon ANBT

Critère	Calage		Validation	
	ETP_PM56	ETP_ANRH	ETP_PM56	ETP_ANRH
<i>Nash</i>	67.7	68.5	60.882	60.842
<i>R</i>	0.823	0.828	0.809	0.808
<i>RMSE</i>	6.661	6.578	14.628	14.636
<i>B</i>	0.155	-0.003	-1.932	-2.149
<i>I</i>	0.97	1	1.24	1.27
<i>Paramètres du Modèle GR2M</i>	X1=5.38	X1=5.38		
	X2=0.61	X2=0.61		

Pour ce cas et tenant compte de la phase validation, il ressort des résultats du tableau 4.4 que la considération de l'ETP_PM56 améliore légèrement et d'une façon insignifiante les performances du modèle GR2M. Bien que les valeurs différentes de l'unité de *I* (1.24 et 1.27) indiquent que le modèle ne reproduit pas bien les valeurs extrêmes fortes des débits (crues). On constate aussi que le choix de la relation de l'ETP n'influe plus sur les valeurs des paramètres de calage (X1 et X2) du modèle conceptuel.

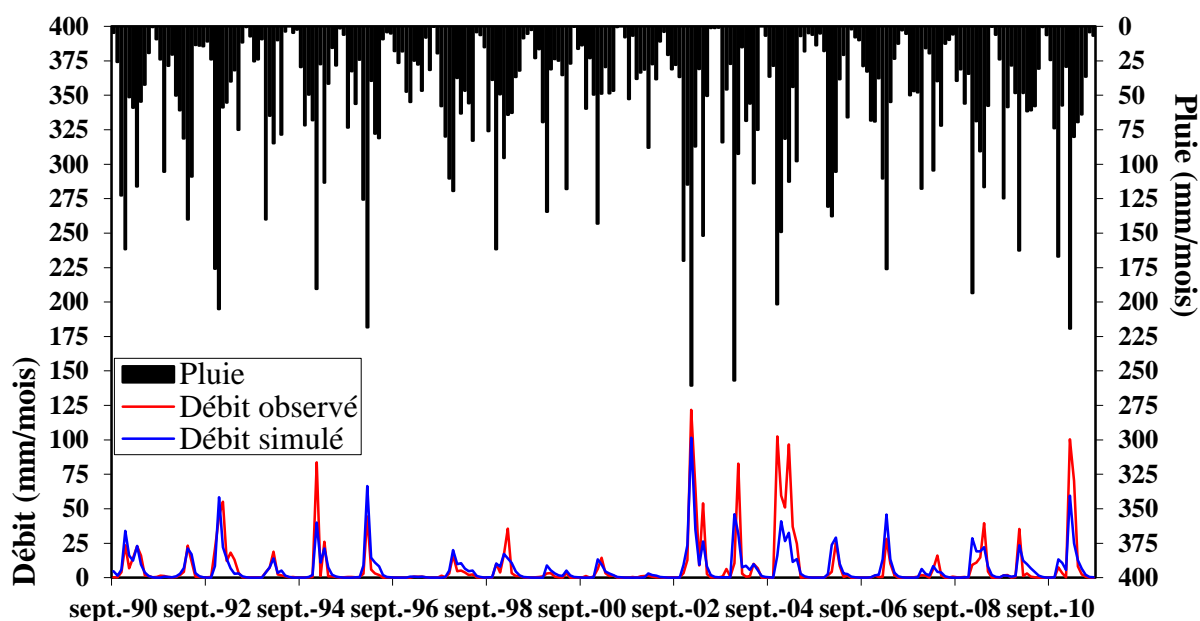


Figure 4.15. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_PM56 et Débits selon ANBT

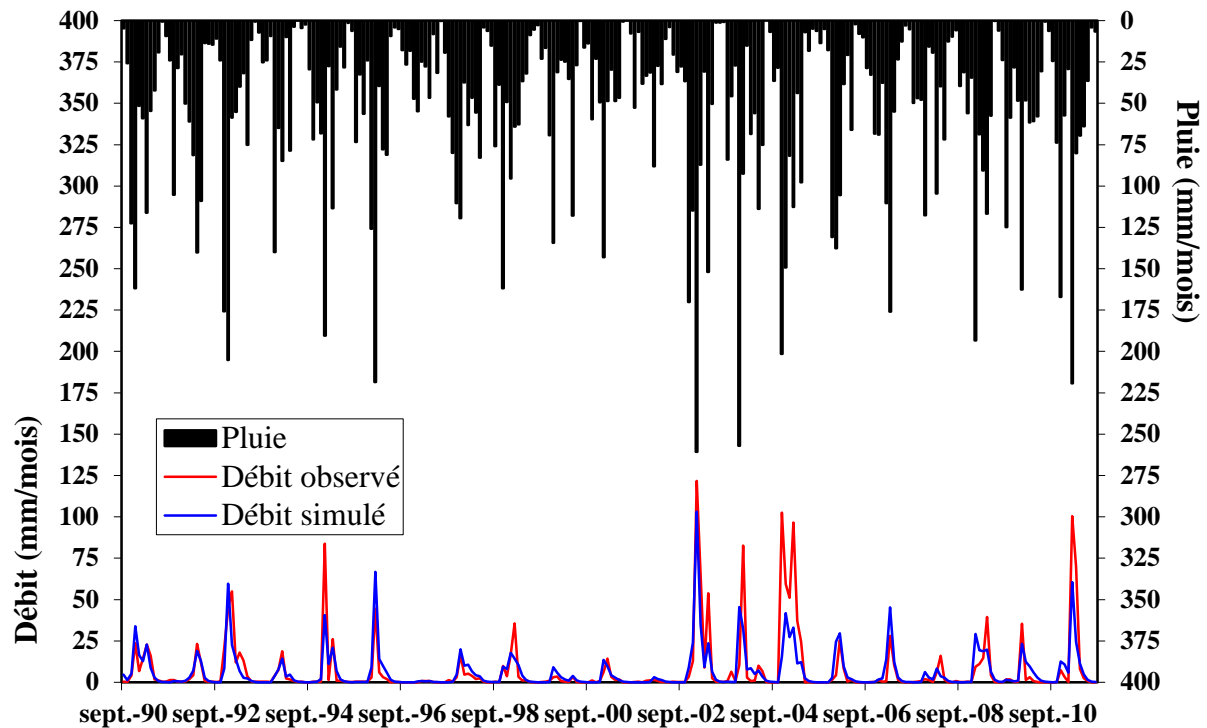


Figure 4.16. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91- 2010/11). Moyenne arithmétique des pluies, ETP_ANRH et Débits selon ANBT

2. La considération de la pluie mensuelle enregistrée dans la station pluviométrique du barrage Hammam Debagh pour la période (1990/91-2010/11) en tenant compte de l'évapotranspiration estimée par la relation de Penman Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 en premier lieu et estimée par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH en deuxième lieu.

Cette première configuration consiste en l'application du modèle conceptuel mensuel à deux paramètres dit GR2M ; les valeurs de pluies mensuelles (en mm) considérées sont issues de la station du barrage Hammam Debagh. L'entrée concernant l'évapotranspiration mensuelle (en mm) est estimée par la relation universelle de Peman-Monteith (FAO56), désignée par ETP_PM56 et estimée encore une fois par la relation dite ANRH, désignée par ETP_ANRH. Quant aux débits pris en mm aussi, sont issus de l'équation de continuité vérifiée au sein du barrage Hammam Debagh selon la relation déjà donnée dans le chapitre 2 de la première partie.

Les évolutions graphiques de toutes ces données sont illustrées par les figures (17 et 18).

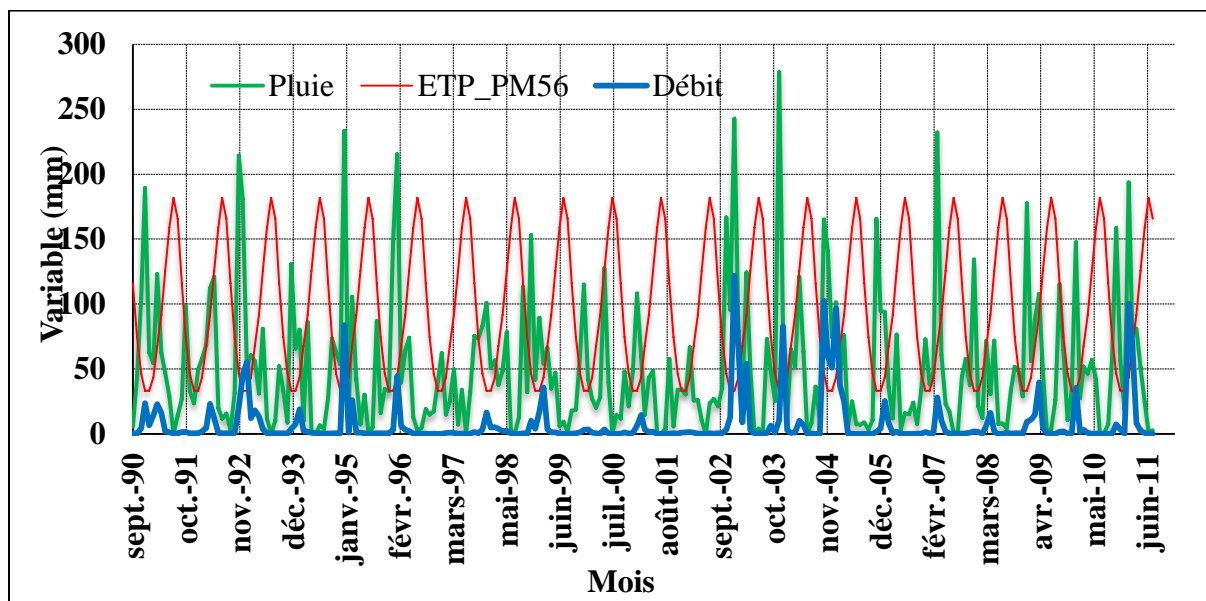


Figure 4.17. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_PM56 et Débits selon ANBT

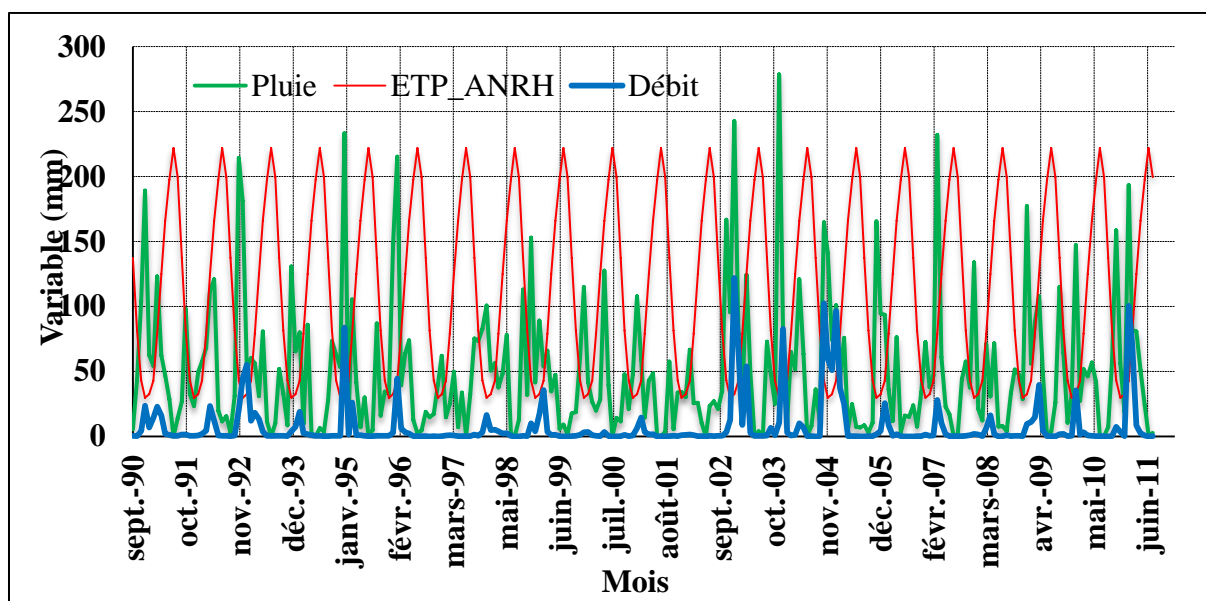


Figure 4.18. Evolutions graphiques des données du modèle conceptuel GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_ANRH et Débits selon ANBT

L'application du modèle conceptuel GR2M pour ce cas a abouti aux résultats numériques consignés dans le tableau 4.5. Les visualisations graphiques sont données par les figures (4.19 et 4.20).

Tableau 4.5. Résultats du calage et validation du modèle GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_PM56 et ETP_ANRHet Débits selon ANBT

Critère	Calage		Validation	
	ETP_PM56	ETP_ANRH	ETP_PM56	ETP_ANRH
<i>Nash</i>	74.102	74.722	50.705	52.055
<i>R</i>	0.861	0.8646	0.757	0.766
<i>RMSE</i>	5.965	5.893	16.42	16.195
<i>B</i>	-0.016	-0.094	-3.258	-3.322
<i>I</i>	1.0	1.02	1.48	1.50
<i>Paramètres du Modèle GR2M</i>	X1=5.43	X1=5.49		
	X2=0.63	X2=0.64		

Pour ce cas et tenant compte de la phase validation, il ressort des résultats du tableau 4.5 que la considération de l'ETP_ANRH améliore légèrement les performances du modèle GR2M. Bien que les valeurs nettement différentes de l'unité de *I* (1.48 et 1.5) indiquent que le modèle ne reproduit pas bien les valeurs extrêmes fortes des débits (crues). On constate aussi que le choix de la relation de l'ETP n'influe plus sur les valeurs des paramètres de calage (X1 et X2) du modèle conceptuel, mis à part une légère différence concernant les valeurs du paramètre X1.

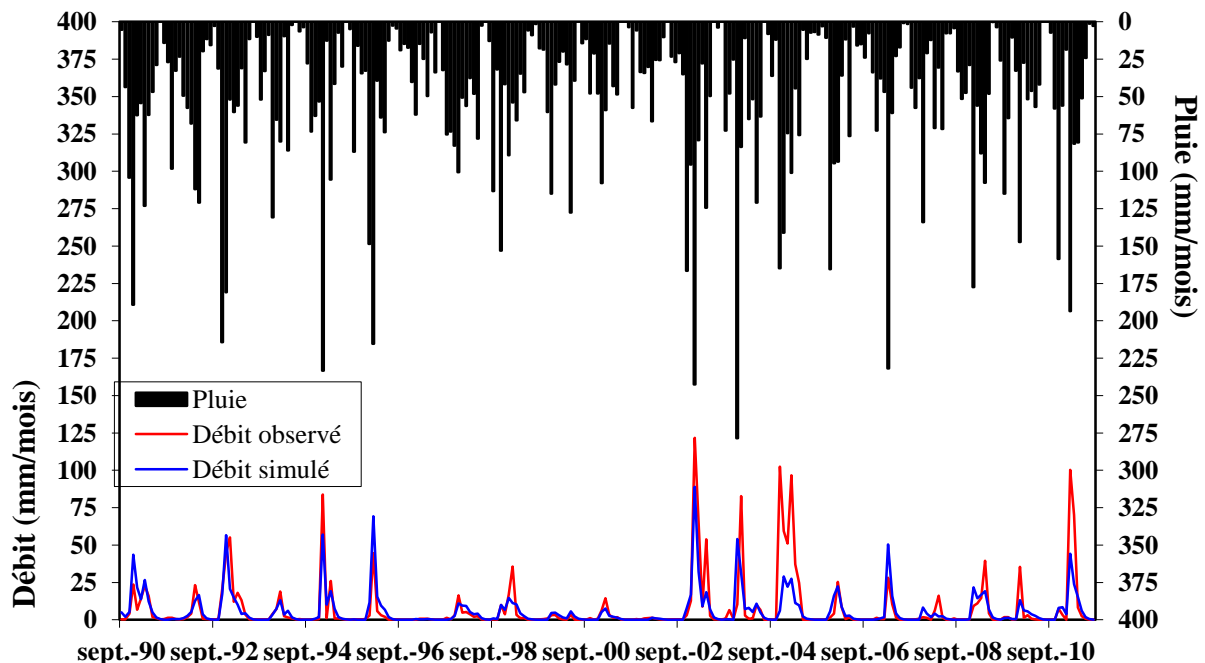


Figure 4.19. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91 - 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_PM56 et Débits selon ANBT

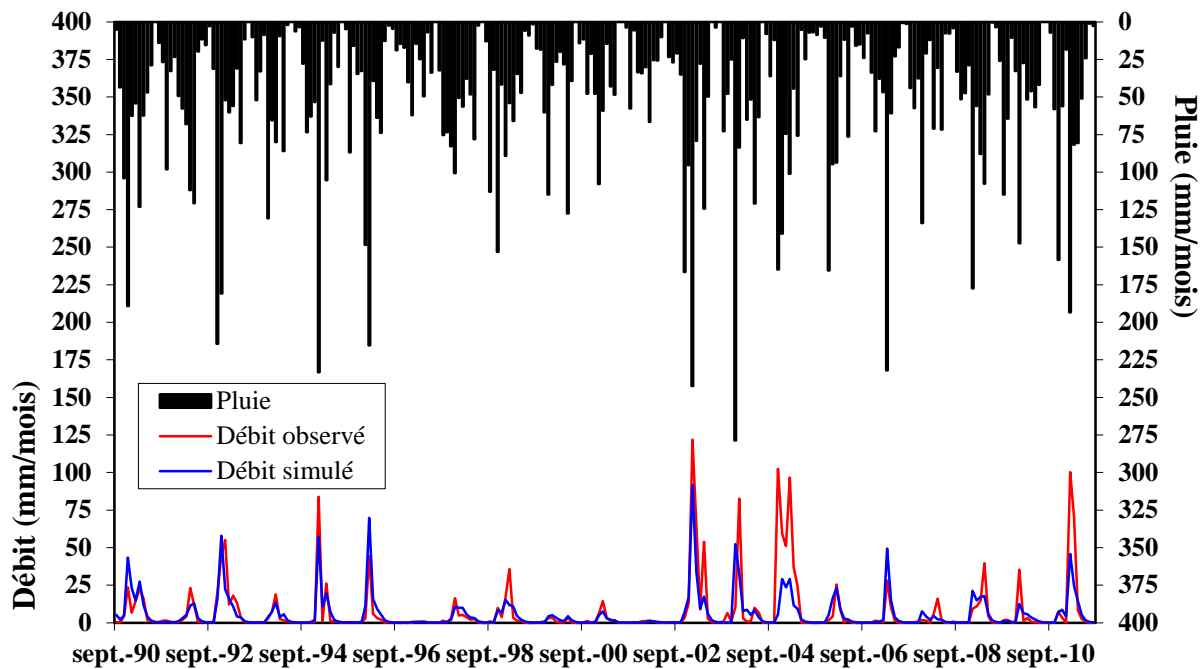


Figure 4.20. Visualisation graphique du calage et validation du GR2M pour la période (1990/91- 2010/11). Pluie mesurée à la station du barrage Hammam Debagh, ETP_ANRH et Débits selon ANBT

IV.7. Conclusion

En vertu des interprétations intermédiaires, il ressort de cette étude au travers ce chapitre que :

Le choix de la relation d'estimation de l'évapotranspiration mensuelle n'influe que d'une manière insignifiante sur les résultats de la modélisation conceptuelle moyennant le modèle GR2M avec des entrées des ETP (ETP_PM56 et ETP_ANRH). Ce résultat a été déjà confirmé auparavant dans (Ardoin et al., 2001), (Oudin et al., 2006), (Lespinas, 2008).

- Le modèle conceptuel GR2M ne reproduit pas fidèlement les valeurs extrêmes notamment les crues (se référer aux différentes valeurs du rapport I des coefficients de variation des débits observés et des débits prévus). Se rapporter aussi à l'indication visuelle assurée par les divers graphiques de visualisation en phase de calage et surtout validation (figure 4.19 et 4.20 à titre d'exemple)).
- Pour la station Medjez Amar II :
 1. La mauvaise qualité de modélisation a été détectée pour la période (1974/75- 1980/81) où la moyenne pondérée des pluies et l'ETP_ANRH ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits issus de la station hydrométrique Medjez Amar II. Ces performances, en phase de validation, sont

reflétées par la valeur acceptable du critère de Nash ($NS=75.105\%$) et des faibles valeurs de : la racine des moyennes des erreurs quadratiques ($RMSE=4.97mm$), la moyenne biaisée ($B=-1.638mm$). Le rapport des coefficients de variation est élevé ($I =1.55$). Une valeur du coefficient de corrélation ($R=0.905$) est admissible.

2. La meilleure qualité de modélisation a été détectée pour la période (1974/75-1980/81) où la moyenne arithmétique des pluies et l'ETP_PM56 ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits issus de la station hydrométrique Medjez Amar II. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur très satisfaisante du critère de Nash ($NS=78.48\%$) et des faibles valeurs de : la racine des moyennes des erreurs quadratiques ($RMSE=4.6mm$), la moyenne biaisée ($B=1.14mm$). Le rapport des coefficients de variation est toujours élevé même pour cette configuration ($I =1.33$). Une valeur forte du coefficient de corrélation ($R=0.94$) confirme la constatation.
- Pour le barrage Hammam Debagh :
 3. La mauvaise qualité de modélisation a été détectée pour la période (1990/91-2010/11) dans le cas où l'unique station pluviométrique du barrage Hammam Debagh est considérée comme la seule entrée pluviométrique et hydrométrique au modèle GR2M, cette dégradation des performances, en phase de validation, est reflétée par la valeur faible du critère de Nash ($NS=50\%$) et des fortes valeurs de : la racine des moyennes des erreurs quadratiques ($RMSE=16mm$), la moyenne biaisée ($B=3mm$) et le rapport des coefficients de variation ($I =1.5$). Une valeur moyenne du coefficient de corrélation ($R=0.75$) est à signaler.
 4. La meilleure qualité de modélisation a été détectée pour la période (1990/91-2010/11) où la moyenne arithmétique des pluies et l'ETP_PM56 ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits qui sont issus du barrage Hammam Debagh. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur moyenne du critère de Nash ($NS=60.88\%$) et des valeurs tout de même considérables de : la racine des moyennes des erreurs quadratiques ($RMSE=14.628mm$), la moyenne biaisée ($B=-1.932mm$). Le rapport des coefficients de variation est moyennement élevé même pour cette configuration ($I =1.24$). Une valeur moyenne du coefficient de corrélation ($R=0.809$).

La recherche et le teste d'une autre technique est nécessaire pour une ultime modélisation et une meilleure prévision des débits (Apports liquides) au sein du bassin Oued Bouhamdane, que ce soit contrôlé à la station Medjez Amar II ($S=1105\text{km}^2$) ou bien niveau du barrage Hammam Debagh avec une superficie contrôlée de 1070 km^2 .

Cette tâche sera élaborée dans le chapitre suivant (chapitre 5) où les techniques de modélisation par les modèles de séries temporelles seront explorées.

CHAPITRE 5 : Elaboration des modèles de séries temporelles pour la prévision des apports liquides du barrage Hammam Debagh

V.1. Introduction

Les résultats de la modélisation par le modèle conceptuel GR2M, réalisés dans le chapitre précédent, s'avèrent discutables et nécessitent d'être améliorés. Dans le souci d'amélioration de la qualité des prévisions des débits (apports liquides) du bassin versant oued Bouhamdane, le présent chapitre se propose d'explorer un autre moyen de modélisation autre que l'aspect passage "**pluie-débit**". En effet, c'est la modélisation qui se base sur l'aspect "**débit-débit**" qui sera exploitée. La dite modélisation est assurée par l'ajustement des modèles de séries temporelles types ARMA aux séries historiques des débits contrôlés dans l'oued Bouhamdane et spécialement au niveau du barrage Hammam Debagh.

Des modèles de séries temporelles seront testés comme une autre alternative de prévision des débits (apports liquides) et aux échelles de temps différentes.

L'ajustement des modèles ARMA à l'échelle mensuelle sera élaboré pour faire une logique comparaison avec les résultats issus du modèle GR2M appliqué déjà aux diverses périodes d'observation à la station hydrométrique Medjez Amar II et au niveau du barrage lui-même.

Les ajustements des modèles ARMA à des échelles : décadaire et journalière, seront par la suite entrepris dans le but de tirer des conclusions claires à propos de cette technique de modélisation qui est, à notre connaissance et jusqu'à l'heure actuelle, n'a pas été bien exploitée dans le domaine de la prévision des apports liquides des bassins versants Algériens.

1. L'échelle mensuelle concerne les périodes suivantes d'observation des débits :
 - La période (1974/75-1980/81) à la station hydrométrique Medjez Amar II.
 - La période (1990/91-1998/99) au sein du barrage Hammam Debagh.
 - La période (1990/91-2010/11) au sein du barrage Hammam Debagh.
2. L'échelle décadaire concerne la période d'observation (1990/91-2010/11) des apports liquides du barrage Hammam Debagh.
3. L'échelle journalière concerne la période d'observation (1990/91-2010/11) des apports liquides du barrage Hammam Debagh.

Les procédures de modélisation dans ce qui suit ne peuvent s'effectuer que d'une manière automatisée moyennant des logiciels appropriés tel que le logiciel

STATGRAPHICS® Centurion XVI(2009), adopté pour sa disponibilité, sa simplicité et sa réputation.

V.2. Aperçu descriptif de STATGRAPHICS® Centurion XVI

STATGRAPHICS Centurion est un produit de *Stat Point Technologies, Inc. (USA)*. Il est destiné à toute personne désirant mettre en œuvre des analyses statistiques et graphiques sans devoir investir les longues semaines nécessaires à l'apprentissage d'un logiciel d'analyse statistique. Il inclut plus de 180 procédures, allant des statistiques descriptives jusqu'aux plans d'expériences. Il n'est pas nécessaire d'être un statisticien pour utiliser le logiciel. Toutes les procédures sont pilotées par des menus et les outils Stat Wizard et Stat Advisor qui aident à utiliser le logiciel de façon efficace.

STATGRAPHICS Centurion XVI est une des versions de STATGRAPHICS pour micro-ordinateurs. La première version est apparue en 1982.

V.3. Analyses de séries temporelles et prévisions des débits à l'échelle mensuelle

V.3.1. Application aux débits mensuels observés pendant la période (1974/75-1980/81) à la station hydrométrique Medjez Amar II

Les débits mensuels de l'oued Bouhamdane observés à la station hydrométrique Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81) sont présentés par la figure 5.1. Ces débits déjà décrits dans la section II.3 du chapitre deux par le tableau 2.4.

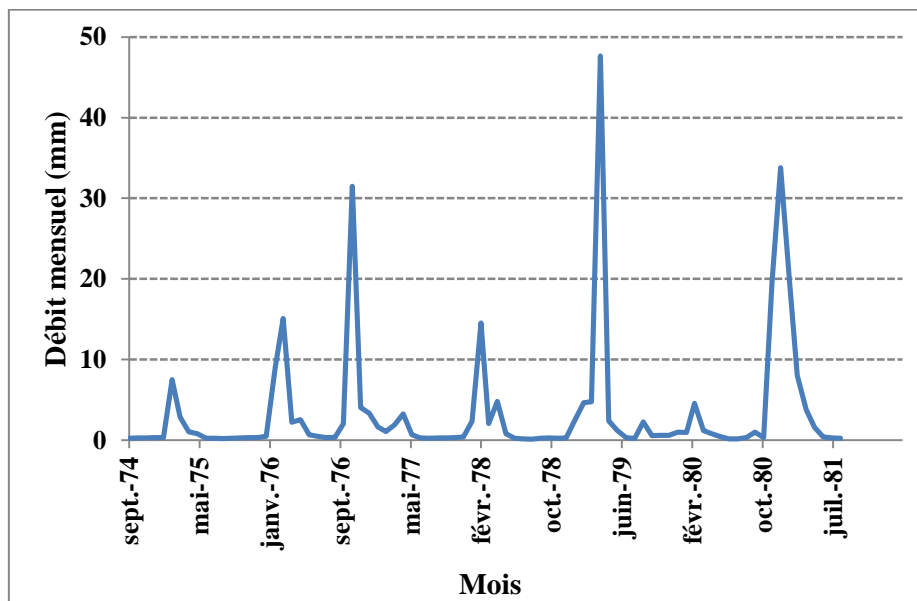


Figure 5.1. Visualisation des débits mensuels à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

a. Tests de stationnarité

L'adaptation des modèles de séries temporelles type ARMA aux débits mensuels ainsi présentés exige la condition de stationnarité. Deux tests de stationnarité et de non stationnarité vont être appliqués à cette série chronologique des débits. Il s'agit du test de stationnarité de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (KPSS) et du test de non stationnarité de Dickey-Fuller augmenté (ADF). Ces deux tests sont exécutés en utilisant le code Matlab avec les instructions suivantes :

- `adftest(série temporelle)` pour le test ADF. (H=1, série stationnaire ; H=0, série non stationnaire).
- `kpsstest (série temporelle)` pour le test KPSS. (H=1, série non stationnaire ; H=0, série stationnaire).

Les deux tests indiquent la **stationnarité** des débits mensuels bruts en (mm) ainsi analysés.

b. Fonctions d'autocorrélation, d'autocorrélation partielles et périodogramme

En appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les logarithmes népériens des débits bruts à l'échelle mensuelle de la période (1974/75-1980/81), sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.2, 5.3 et 5.4 respectivement. (Des graphiques similaires concernant les débits bruts sont représentés en annexe 1 1 (voir Figure 1, 2 et 3)).

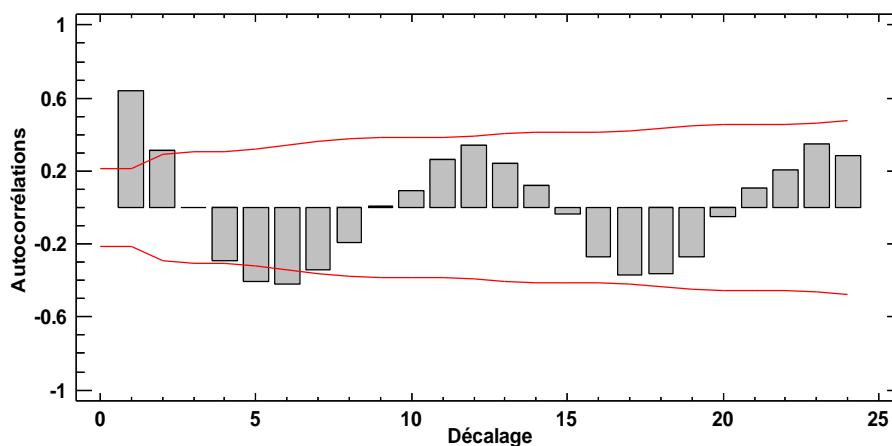


Figure 5.2. Fonctions d'autocorrélation des logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

La figure 5.2 indique que le premier coefficient d'autocorrélation est statistiquement significatif au niveau de confiance de 95.0%, ce qui peut donner un ordre de moyenne mobile

égal à un. Tandis que la figure 5.3 indique qu'il se peut qu'un ordre autorégressif unique ou à la limite deux, peut ou peuvent suffire dans un modèle ARMA. La figure 5.4 signale une périodicité claire à la fréquence 0.083 qui correspond à une période égale à $1/0.083$ soit 12 mois, ce qui semble très légitime.

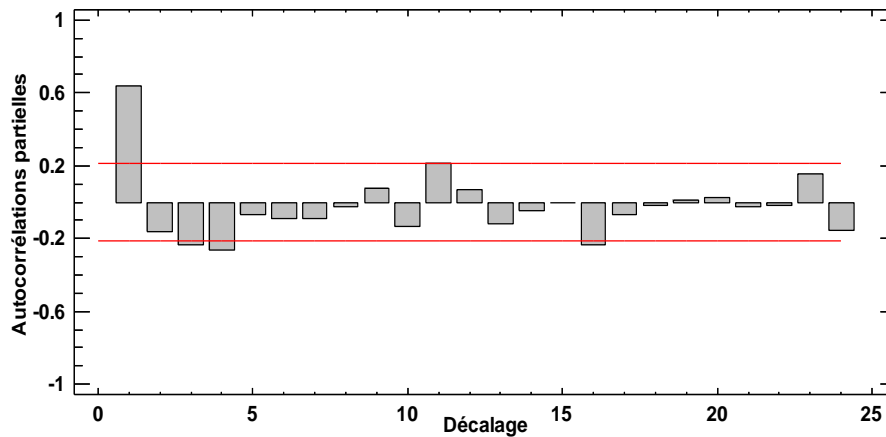


Figure 5.3. Fonctions d'autocorrélation partielles des logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

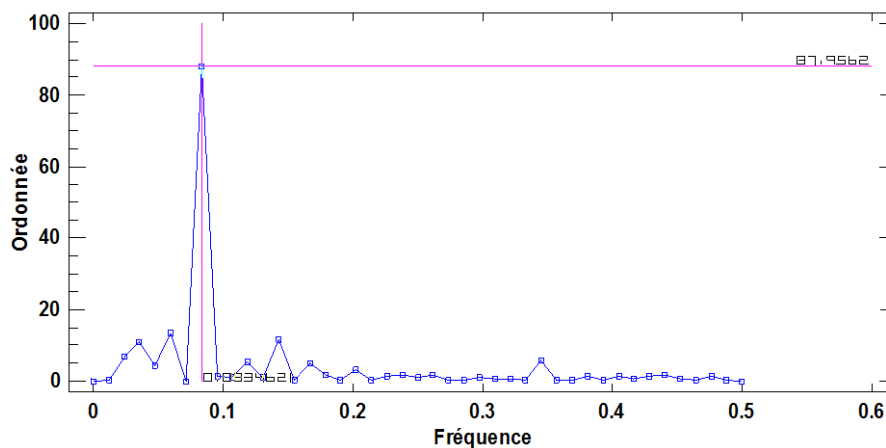


Figure 5.4. Périodogramme des logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

Le modèle ARMA correspondant à ses déductions est donné par Statgraphics dont les résultats sont consignés dans le tableau 5.1. Les critères (**racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)** et **rapport des coefficients de variation (I)**) déjà définis dans le chapitre précédent seront retenus pour des futures comparaisons de performance.

Tableau 5.1. Résultats du modèle ARMA (2,1) pour les débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (2,1)	AR(1)=1.43207	RMSE (mm)	5,97	8,99
	AR(2)=-0.6965 MA(1)=0.6935	I	1,55	2,09

La confrontation des débits mensuels observés et simulés en phase de calage et validation, tributaire du modèle ARMA (2,1) est assurée par la figure 5.5.

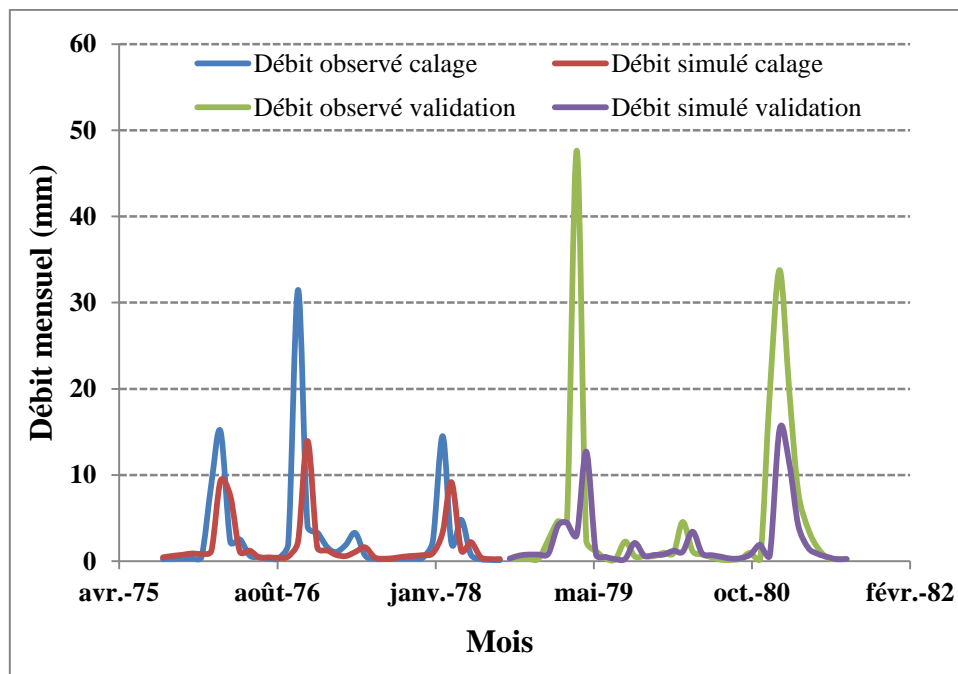


Figure 5.5. Confrontation des débits observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (2,1) pour les débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

L'allure du périodogramme cumulé des résidus issus de l'application du modèles ARMA(2,1) s'allonge d'une manière plus au moins régulière autour de la diagonale ce qui reflète le caractère aléatoire des résidus et la validité du modèle ainsi adopté.

La figure 4 et le tableau 1 dans l'annexe 1 correspondent au modèle ARMA(1,0) ajusté aux débits bruts mensuels. Ce modèle est considéré moins performant par rapport au modèle ARMA(2,1).

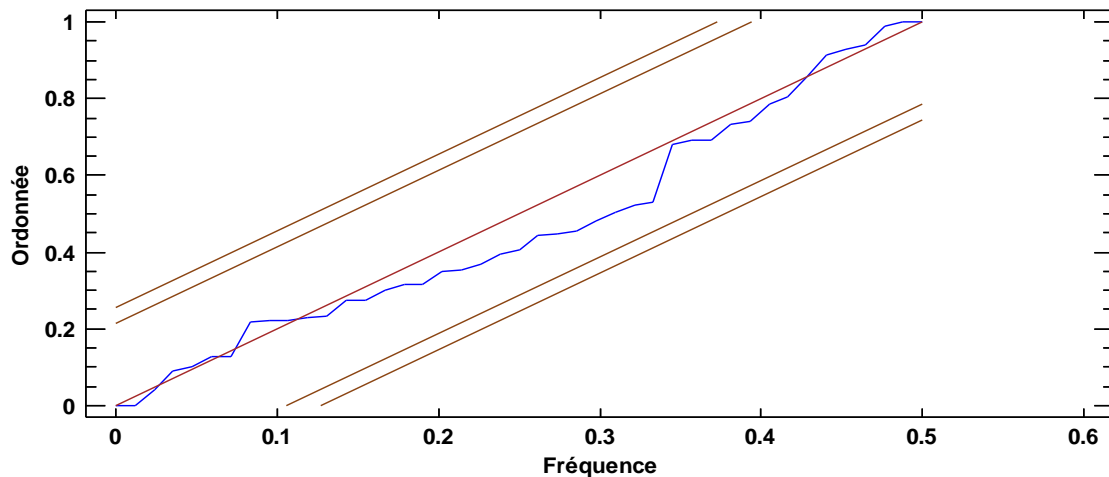


Figure 5.6. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,1) pour les logarithmes népériens des débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

V.3.2. Application aux apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

Les apports liquides mensuels en mm de l'oued Bouhamdane déduits du bilan hydrologique au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99) sont présentés par la figure 5.7. Ces débits sont déjà décrits dans la section II.3 du chapitre deux par le tableau 2.4.

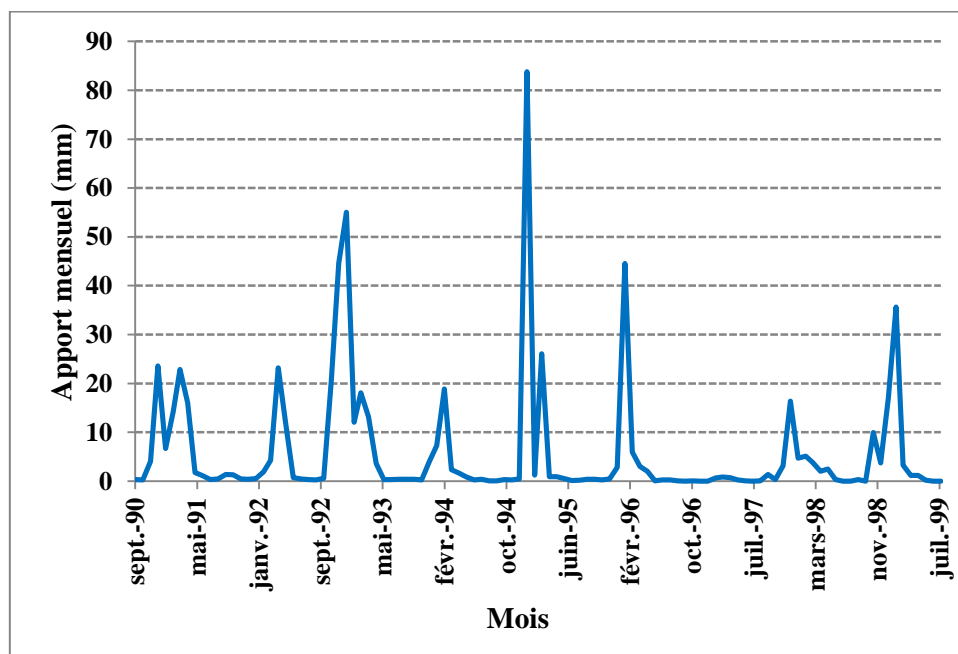


Figure 5.7. Visualisation des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

a. Tests de stationnarité

Les deux tests ADF et KPSS sont exécutés en utilisant le code Matlab et indiquent la *stationnarité* des apports mensuels bruts en (mm) ainsi analysés.

b. Fonctions d'autocorrélation, d'autocorrélation partielles et périodogramme

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides bruts à l'échelle mensuelle de la période (1990/91-1998/99), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.8, 5.9 et 5.10 respectivement. (Des graphiques similaires concernant les racines des apports liquides mensuels sont représentés en annexe 1 1 (voir Figure 5, 6 et 7)).

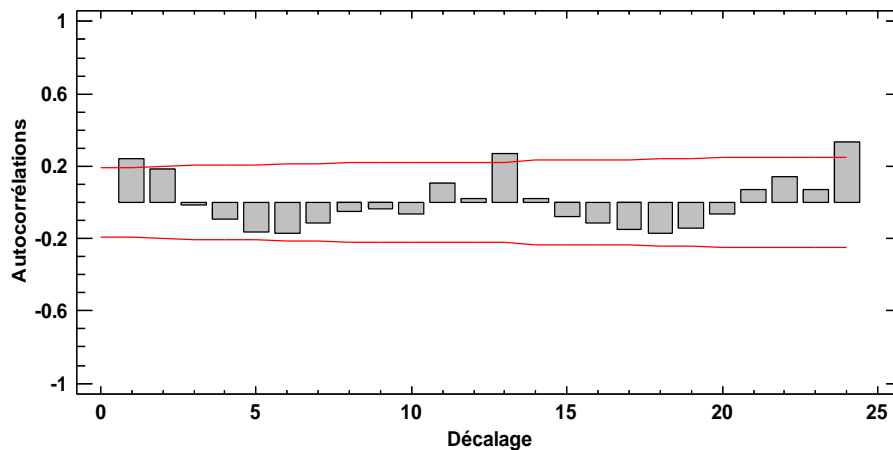


Figure 5.8. Fonctions d'autocorrélation des apports bruts mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

La figure 5.8 indique que le premier coefficient d'autocorrélation, à la limite le deuxième, sont statistiquement significatifs au niveau de confiance de 95.0%, ce qui peut donner un ordre de moyenne mobile égal à un ou deux. Tandis que la figure 5.9 indique qu'il se peut qu'un ordre autorégressif unique peut suffire dans un modèle ARMA. La figure 5.10 signale une périodicité claire à la fréquence 0.083 qui correspond à une période égale à 1/0.083 soit 12 mois.

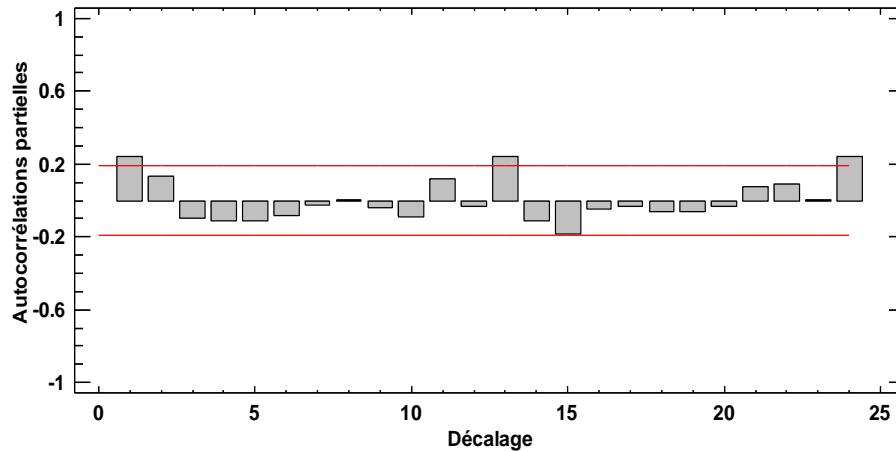


Figure 5.9. Fonction d'autocorrélation partielle des apports bruts mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

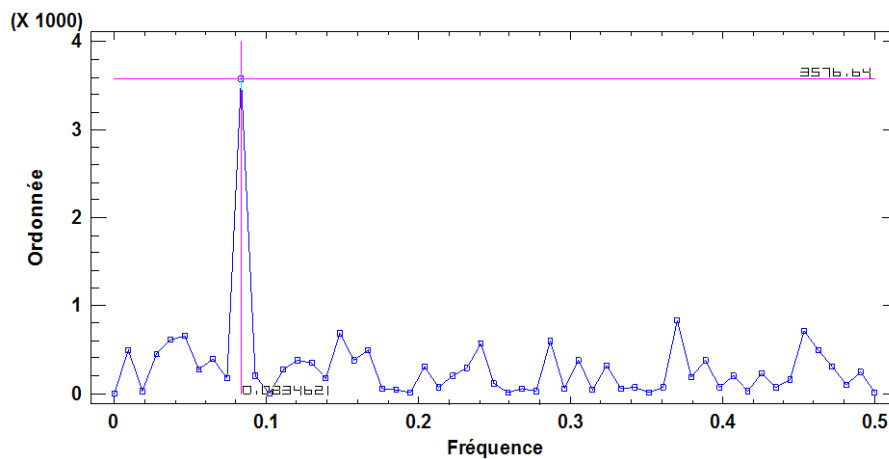


Figure 5.10. Périodogramme des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

Le modèle ARMA correspondant à ses déductions est donné par Statgraphics dont les résultats sont consignés dans le tableau 5.2. Les critères (**racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)** et **rapport des coefficients de variation (I)**) déjà définis dans le chapitre précédent seront de même retenus pour des futures comparaisons de performance.

Tableau 5.2. Résultats du modèle ARMA(2,0) pour les apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (2,0)	AR(1)=0.286489	RMSE (mm)	18,326	10,143
	AR(2)=0.263903	I	1,82	1,81

La confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation, tributaire du modèle ARMA (2,0) est assurée par la figure 5.11.

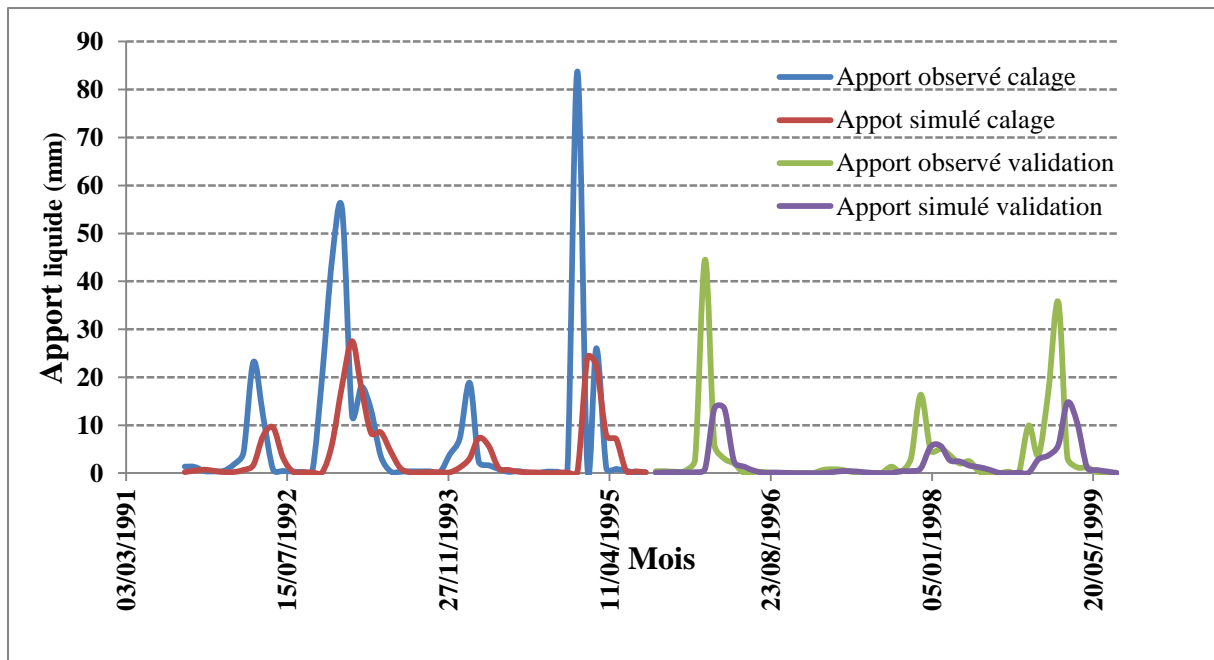


Figure5.11.Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

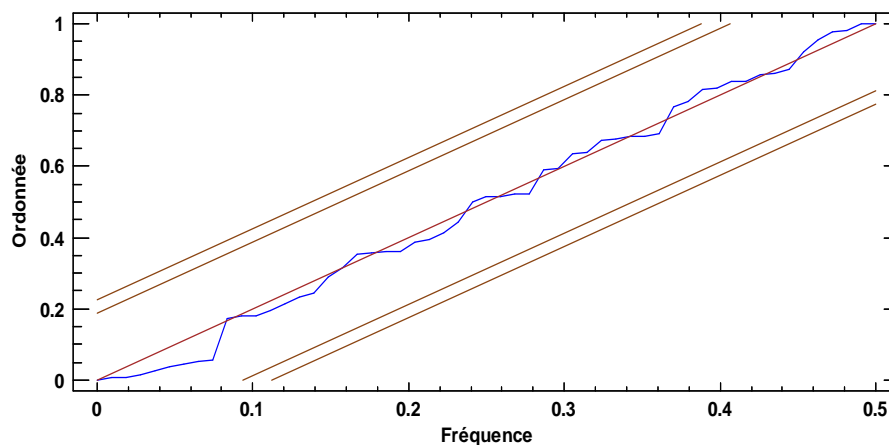


Figure5.12.Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels observés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

L'allure du périodogramme cumulé des résidus issus de l'application du modèles ARMA(2,0) s'allonge d'une manière plus au moins régulière autour de la diagonale ce qui reflète le caractère aléatoire des résidus et la validité du modèle ainsi adopté.

La figure 8 et le tableau 2 dans l'annexe 1 1 correspondent au modèle ARMA(2,0) ajusté aux racines des apports bruts mensuels. Ce modèle est considéré similaire comparé au modèle ARMA(2,0) pour les apports bruts.

V.3.3. Application aux apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11) et mise en évidence de l'effet de la taille de la série

Les apports liquides mensuels en mm de l'oued Bouhamdane déduits du bilan hydrologique au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11) sont présentés par la figure 5.13. Ces débits sont déjà décrits dans la section II.3 du chapitre deux par le tableau 2.4. Cette section vise outre la recherche du modèle adéquat, la mise en évidence de l'effet de la taille de la série chronologique étudiée. Dans le paragraphe V.3.2, les apports liquides du barrage Hammam Debagh avaient une taille de 96 individus. Dans le cas présent, la série est caractérisée par une taille de 252 individus soit 2.6 fois la taille précédente.

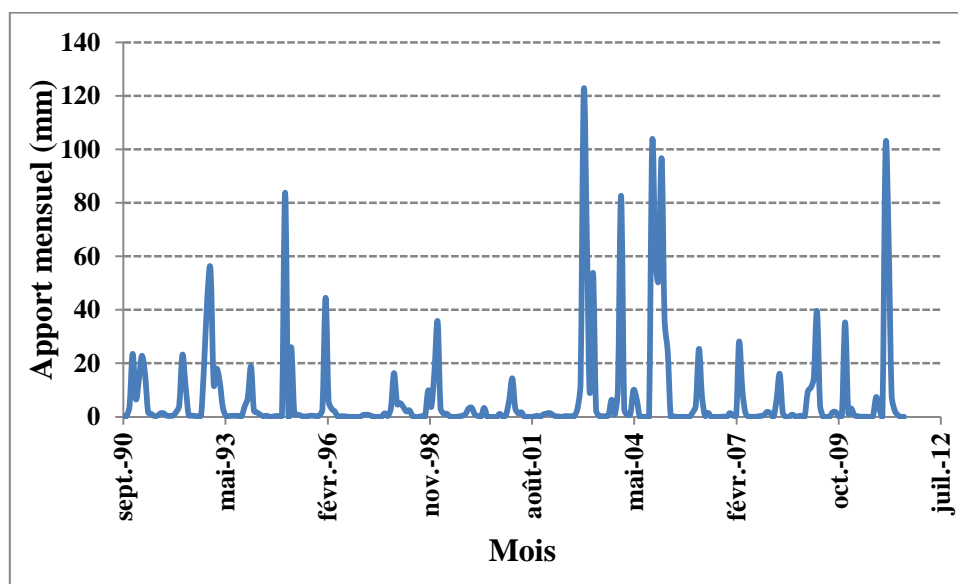


Figure5.13. Visualisation des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

a. Tests de stationnarité

Les deux tests ADF et KPSS sont exécutés en utilisant le code Matlab et indiquent la *stationnarité* des apports mensuels bruts en (mm) ainsi analysés.

b. Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides bruts à l'échelle mensuelle de la

période (1990/91-2010/11), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.14, 5.15 et 5.16 respectivement.

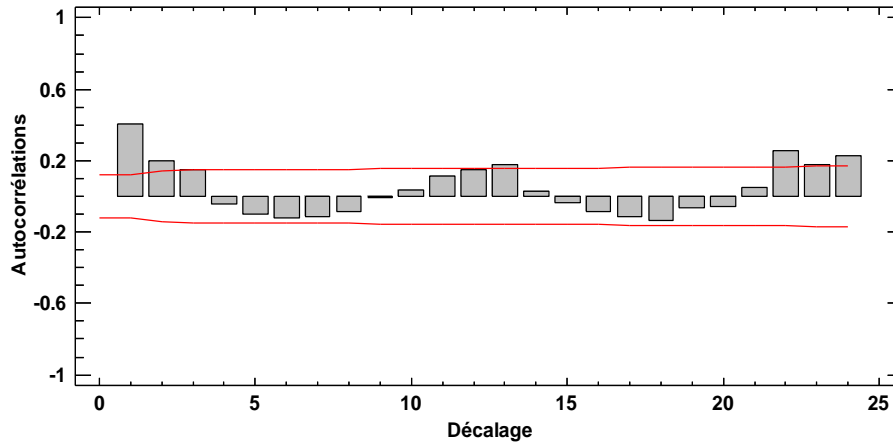


Figure 5.14. Fonction d'autocorrélation des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

La figure 5.14 indique que le premier, le deuxième coefficient d'autocorrélation et, à la limite le troisième, sont statistiquement significatifs au niveau de confiance de 95.0%, ce qui peut donner un ordre de moyenne mobile égal à deux ou trois. Tandis que la figure 5.15 indique qu'il se peut qu'un ordre autorégressif unique peut suffire dans un modèle ARMA. La figure 5.16 signale une périodicité claire à la fréquence 0.083 qui correspond à une période égale à $1/0.083$ soit 12 mois.

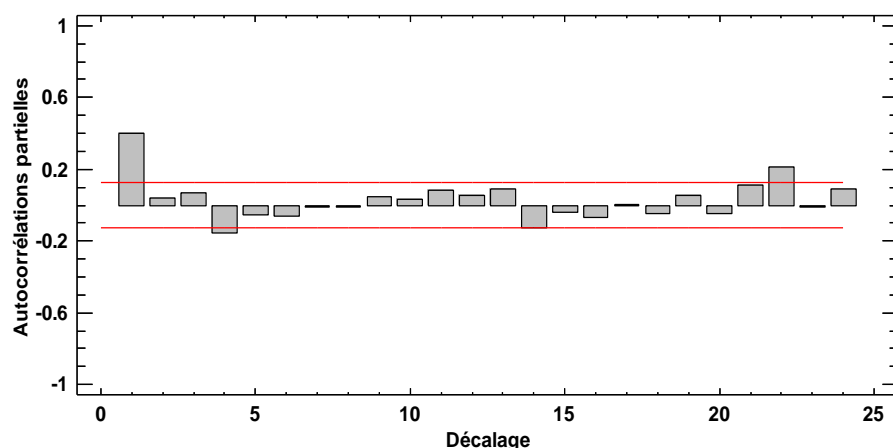


Figure 5.15. Fonction d'autocorrélation partielle des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

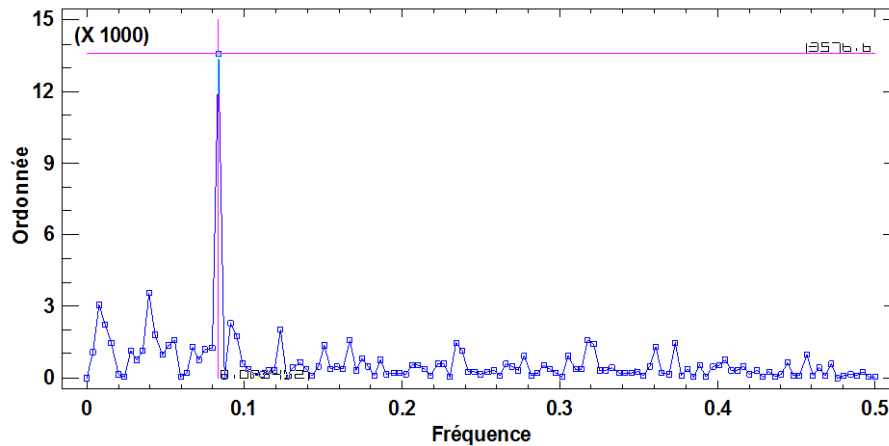


Figure 5.16. Périodogramme des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Le modèle ARMA correspondant à ses déductions est donné par Statgraphics dont les résultats sont consignés dans le tableau 5.3. Les critères (**racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)** et **rapport des coefficients de variation (I)**) déjà définis dans le chapitre précédent seront de même retenus pour des éventuelles comparaisons de performance.

Tableau 5.3. Résultats du modèle ARMA(2,0) pour les apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (2,0)	AR(1)=0.302196	RMSE (mm)	11,547	22,215
	AR(2)=0.217920	I	1,92	1,92

La confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation, tributaire du modèle ARMA (2,0) est assurée par la figure 5.17.

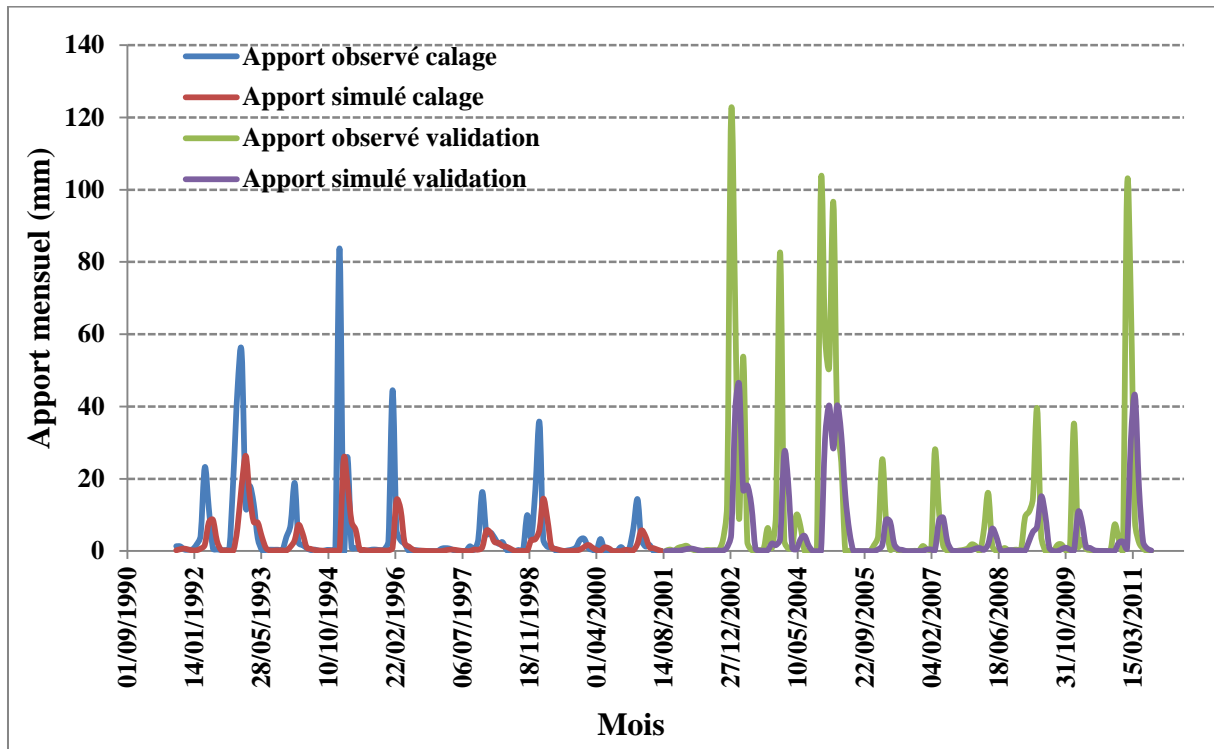


Figure 5.17. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

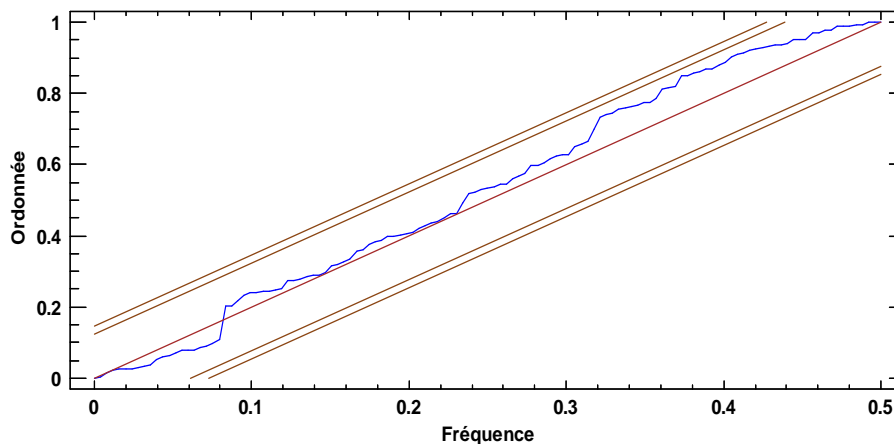


Figure 5.18. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,0) pour les apports liquides mensuels observés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

L'allure du périodogramme cumulé des résidus issus de l'application du modèle ARMA(2,0) s'allonge d'une manière plus ou moins régulière autour de la diagonale ce qui reflète le caractère plus ou moins aléatoire des résidus et la validité du modèle ainsi adopté.

Constatations :

- L'enrichissement en taille de la série n'a pas apporté des améliorations nettes au modèle ARMA.
- Le modèle ARMA(2,0) persiste avec des petites différences dans les valeurs des paramètres.
- La présence de fortes crues surtout en phase de validation a fait dégrader considérablement la valeur du RMSE.

V.4. Analyses de séries temporelles des apports liquides à des échelles plus courtes au sein du barrage Hammam Debagh

La forte dépendance entre les observations successives à des échelles plus courtes (autre que l'échelle annuelle et mensuelle), favorise l'utilisation des méthodes de séries temporelles pour les débits décennaux et journaliers (Fortin et al., 1997).

Pour le choix définitif des modèles de prévision des apports liquides pour des échelles courtes, nous procédons à l'application de plusieurs modèles type ARIMA aux apports bruts, normalisés, différenciés ou le cas échéant transformés et nous considérons le meilleur modèle celui qui répond au critère de qualité le plus reconnu à savoir le critère d'information de Akaike (*AIC*), (Akaike, 1974). Ce dernier, comme déjà vu au troisième chapitre, sélectionne le modèle qui a la plus petite erreur quadratique moyenne en lui appliquant une pénalité qui est fonction du nombre de paramètres inconnus qui doivent être estimés. Le critère d'information d'Akaike (*AIC*) favorise donc les modèles parcimonieux et il est calculé par la relation (3.27 du troisième chapitre). (Paragraphe 3.2.2.10).

L'analyse des résidus de l'ARIMA constitue un test important du modèle. La procédure d'estimation postule que les résidus ne sont pas autocorrélés et qu'ils sont complètement aléatoires, comme déjà fait pour l'échelle mensuelle.

Nous rappelons que l'analyse en série temporelles type ARIMA exige la condition de stationnarité qui se présente souvent comme contrainte handicapante pour élaborer de tels modèles. Plusieurs moyens sont à utiliser en cas où les séries chronologiques ne sont pas stationnaires, entre autre la normalisation standard selon la relation (3.14) du chapitre trois et la transformation des données brutes sans oublier l'opération très efficace qui consiste à différencier les valeurs successives de la variable étudiée selon un ordre nécessaire pour rendre stationnaire les séries en question.

La présence des valeurs nulles (ce qui les cas à l'échelle décennale et journalière) complique l'opération de transformation, du moment que les transformations usuelles

(logarithme, racine carrée,) sont inutiles ou impossibles mathématiquement. L'application d'une transformation Box-Cox (Box-Cox, 1964) selon la relation (3.15) du troisième chapitre, peut remédier efficacement à ce problème.

V.4.1. Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Les apports liquides décennaux en mm de l'oued Bouhamdane déduits du bilan hydrologique au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11) sont présentés par la figure 5.19. Ces débits sont déjà décrits par le tableau 2.6 du paragraphe II.4.2.

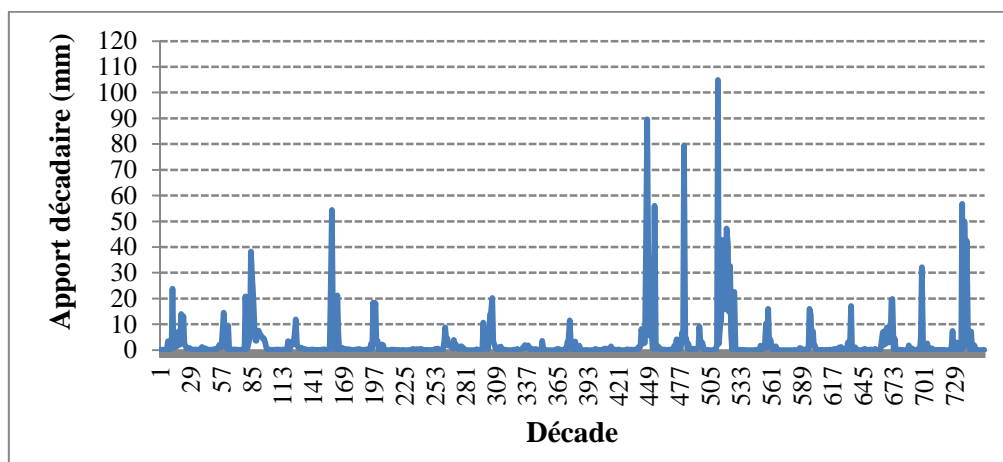


Figure 5.19. Visualisation des apports décennaux au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

- **Tests de stationnarité**

Les deux tests ADF et KPSS sont exécutés, comme déjà fait précédemment, en utilisant le code Matlab et indiquent les résultats résumés par le tableau 5.3. Ces tests concernent les apports liquides décennaux bruts, normalisés, transformés et différenciés une fois. Le tableau 5.4 indique que seuls les apports liquides décennaux différenciés une fois vérifient la stationnarité quel que soit le test. Cependant les autres formes d'apports liquides décennaux (bruts, normalisés et transformés) testés par KPSS se présentent comme non stationnaires. Le cas prudent incite à les considérer non stationnaires. Quoiqu'une violation soit permise si l'analyse de séries temporelles de ces diverses formes aboutit à des modèles ayant des résidus aléatoires.

Tableau 5.4. Résultats des tests ADF et KPSS pour les apports décennaux au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Pas de temps	Apports liquides	Test	Hypothèse	Décision
Décennaire	Bruts	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Normalisés	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Transformés	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Différenciés	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=0 (stationnaire)	

V.4.1.1 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux bruts

- **Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme**

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides bruts à l'échelle décennaire de la période (1990/91-2010/11), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.20, 5.21 et 5.22 respectivement.

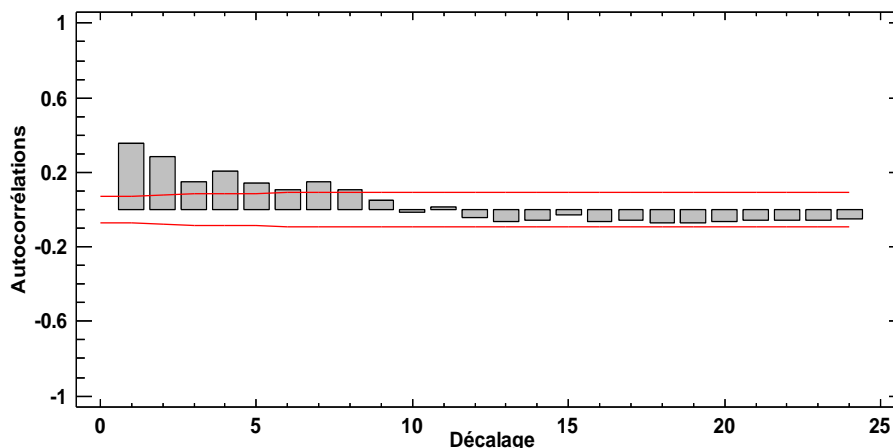


Figure 5.20. Fonction d'autocorrélation des apports liquides décennaux bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

La figure 5.20 indique une descente lente et oscillatoire des valeurs des coefficients d'autocorrélation ce qui reflète une périodicité dans le processus temporel. Cette constatation est renforcée en examinant la figure 5.22 du périodogramme (une périodicité de 1/0.028 soit 36 décades). Les valeurs brutes nécessitent d'être normalisés, différenciés ou transformés. Par contre la figure 5.21 indique qu'un modèle autorégressif d'ordre trois ou quatre peut être utile.

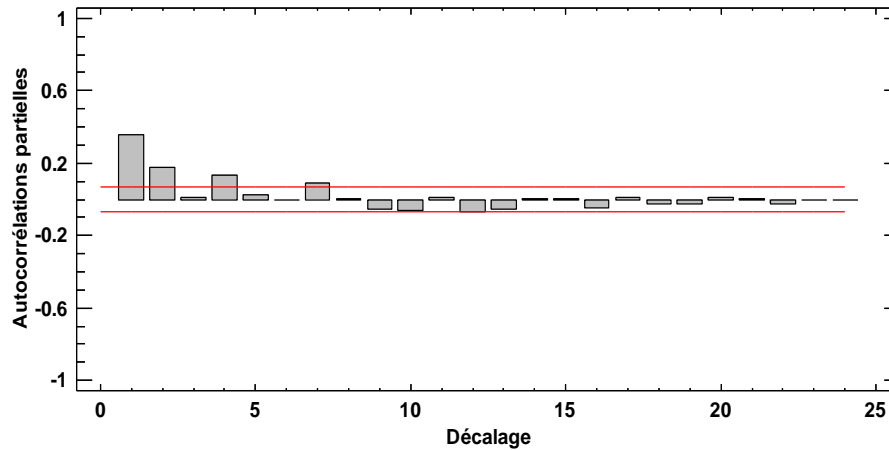


Figure 5.21. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décennaux bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

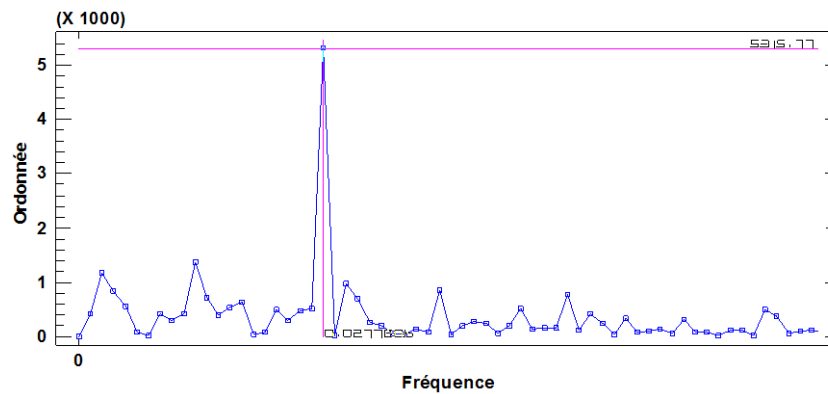


Figure 5.22. Périodogramme des apports décennaux bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

V.4.1.2 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux normalisés

Les apports liquides décennaux normalisés de l'oued Bouhamdane déduits du bilan hydrologique au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11) sont présentés par la figure 5.23.

- **Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme**

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides normalisés à l'échelle décennale de la période (1990/91-2010/11), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 9, 10 et 11 respectivement (voir annexe 1 1). La normalisation dans le cas en cours n'a apporté aucune amélioration et ne diffère plus des résultats issus des valeurs brutes des débits décennaux.

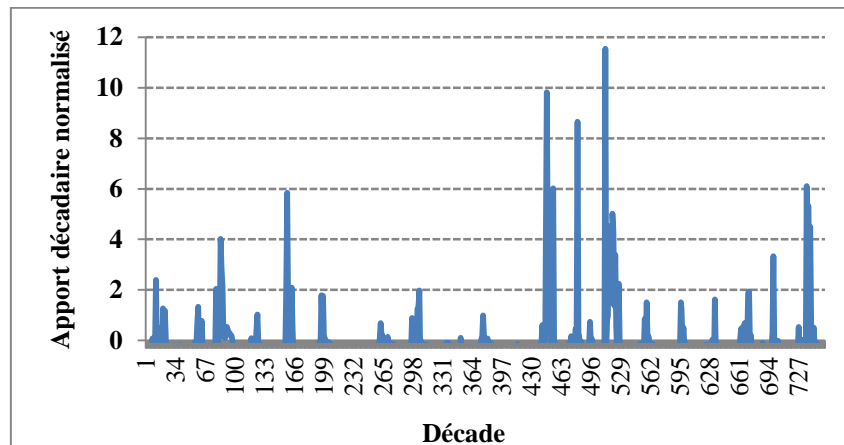


Figure5.23. Visualisation des apports décadaires normalisés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

V.4.1.3 Analyses de séries temporelles des apports liquides décadaires différenciés

La visualisation graphique des apports liquides décadaires, au sein du barrage Hammam Debagh, différenciés une fois, est donnée par la figure 5.24.

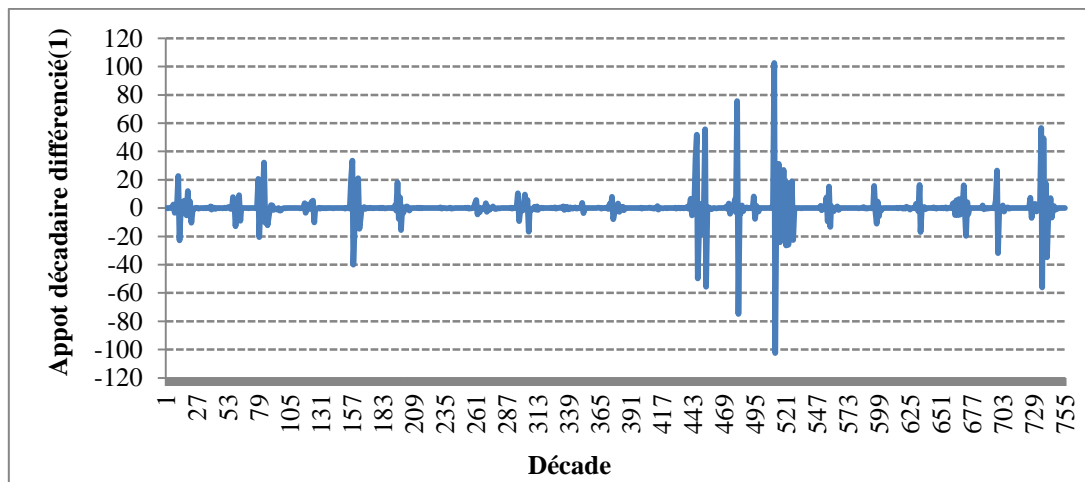


Figure5.24. Visualisation des apports décadaires différenciés une fois, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

- **Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme**

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides différenciés une fois à l'échelle décadaire de la période (1990/91-2010/11), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.25, 5.26 et 5.27 respectivement.

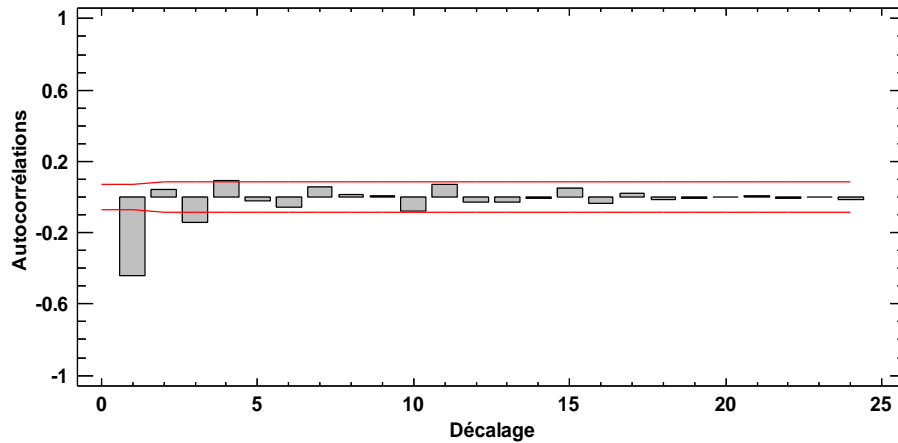


Figure 5.25. Fonction d'autocorrélation des apports liquides décennaux différenciés une fois au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

La figure 5.25 indique que le premier, le troisième coefficient d'autocorrélation et, à la limite le quatrième, sont négatifs et statistiquement significatifs au niveau de confiance de 95.0%, ce qui peut donner une idée que cette différenciation, quant à elle n'est pas vraiment nécessaire. Tandis que la figure 5.26 approuve ce qui est dit à propos de la figure 5.25. La figure 5.27 signale l'absence progressive du phénomène de périodicité. La différenciation d'ordre un a été utile de ce point de vue.

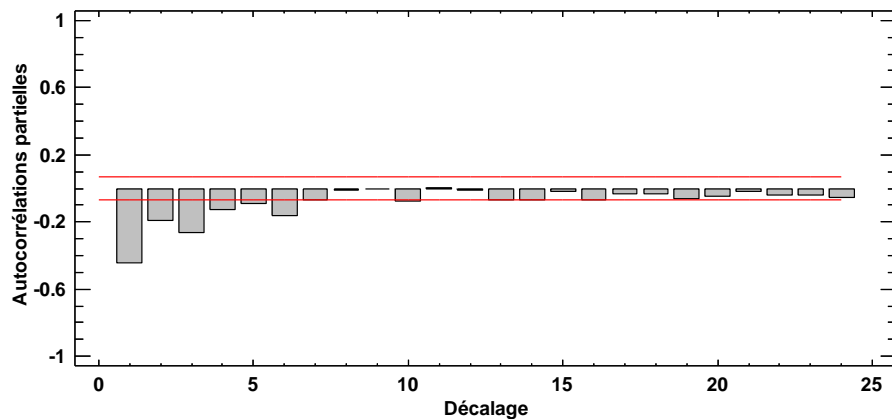


Figure 5.26. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décennaux différenciés une fois au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

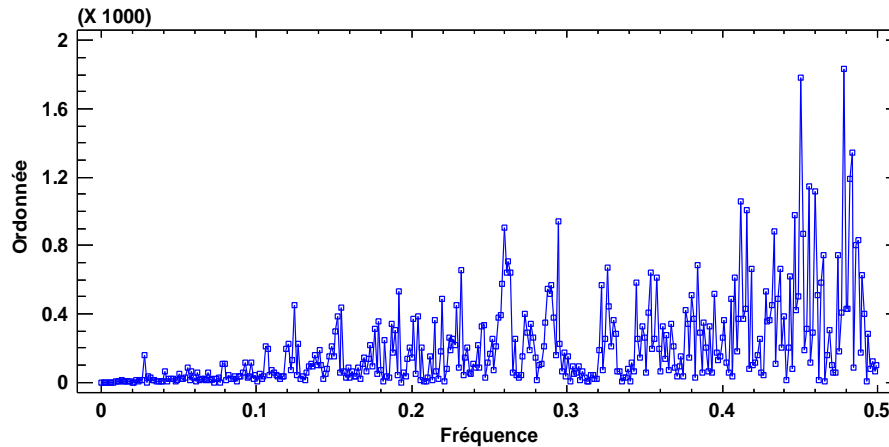


Figure 5.27. Périodogramme des apports décennaux différenciés une fois au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

V.4.1.4 Analyses de séries temporelles des apports liquides décennaux transformés

La visualisation graphique des apports liquides décennaux, au sein du barrage Hammam Debagh, transformés par la méthode Box-Cox, est donnée par la figure 5.28.

La transformation a été optimisée pour avoir des données régulières normales le plus possible. La présence des valeurs nulles (apports liquides décennaux nuls) exige un ajout λ_2 différent de zéro dans la formulation de transformation. Pour avoir des valeurs transformées positives, la valeur de l'ajout a été aussi différente de l'unité. Une valeur de ($\lambda_2=1.5$) a été finalement adoptée. Une valeur de l'exposant $\lambda_1 = -1.72645$ a été en conséquence estimée. Les résultats de la transformation Box-Cox sont résumés sur le graphique de la figure 12 de l'annexe 1.

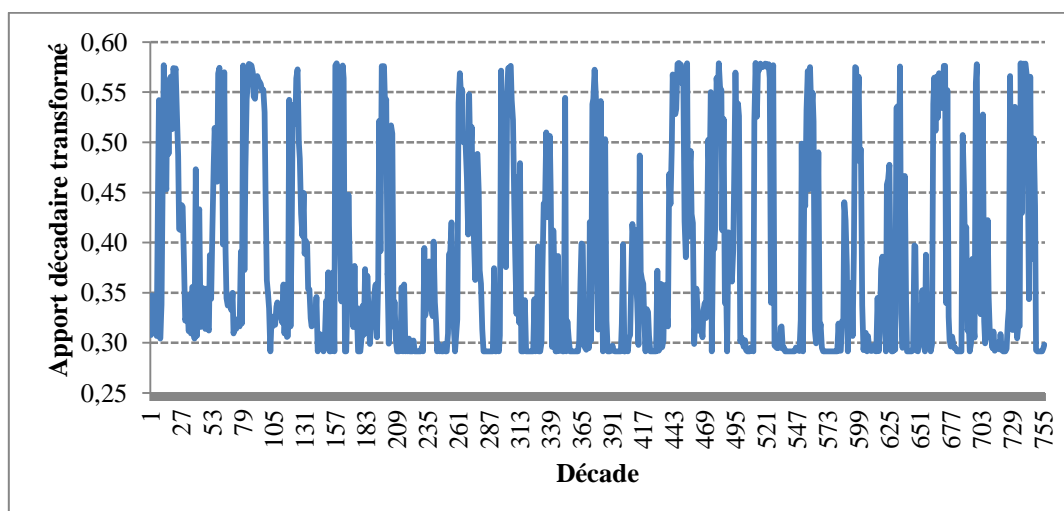


Figure 5.28. Visualisation des apports décennaux transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

- **Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme**

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides transformés à l'échelle décadaire, selon Box-Cox, de la période (1990/91-2010/11), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.29, 5.30 et 5.31 respectivement.

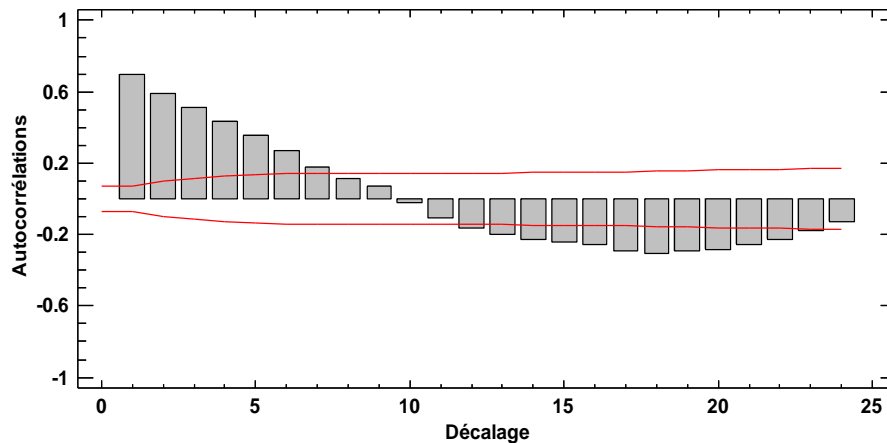


Figure5.29.Fonction d'autocorrélation des apports liquides décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

La figure 5.29 indique le retour du phénomène oscillatoire remarqué avec les valeurs brutes des apports décadaires ce qui reflète une périodicité dans le processus temporel. Cette constatation est renforcée en examinant aussi la figure 5.31 du périodogramme (une périodicité de $1/0.028$ soit 36 décades). Tandis que la figure 5.30 laisse désirer avoir un modèle autorégressif d'ordre trois. La figure 5.31 signale le retour de la périodicité déjà signalée.

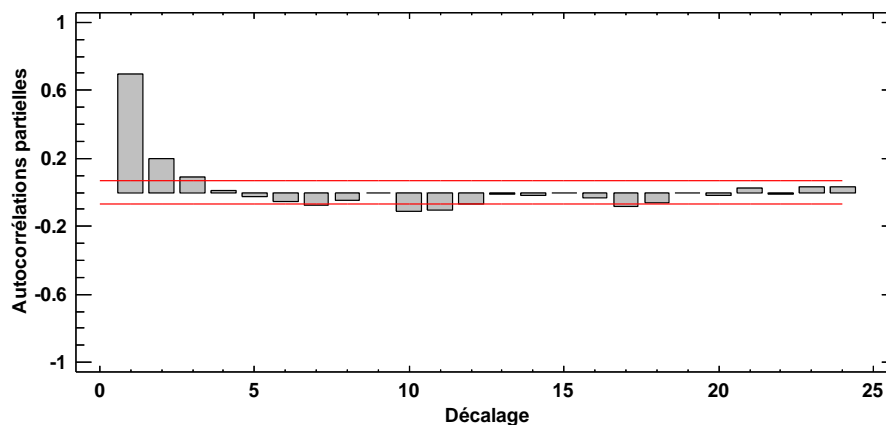


Figure5.30.Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décadaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

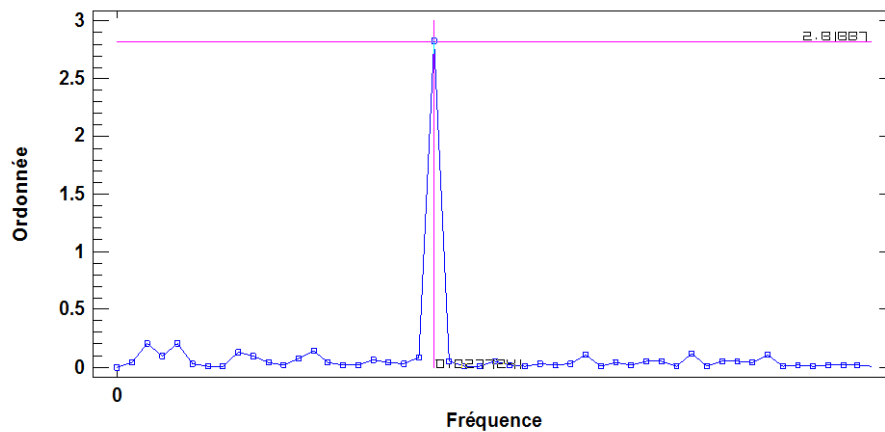


Figure 5.31. Périodogramme des apports décennaux transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Le modèle ARMA correspondant à ses attentes est donné par Statgraphics dont les résultats sont consignés dans le tableau 5.5. Les critères (**racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)** et **Coefficient de corrélation (R)**) déjà définis dans le chapitre précédent seront de même retenus pour des éventuelles comparaisons de performance. Le choix du modèle est bien entendu basé sur le critère d' Akaike (AIC).

Tableau 5.5. Résultats du modèle ARMA(1,1) pour les apports décennaux transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (1,1)	AR(1)=0.995897	AIC	-5.36349	--
	MA(1)=0.389148	RMSE (mm)	1.249	1.485

La confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation, tributaire du modèle ARMA (1,1) est assurée par la figure 5.32. Cette confrontation est ôté de toute valeur extrême sachant au préalable que le modèle ne l'a reproduit pas.

D'autres modèles ARIMA compétitifs sont classés dans le tableau 5.5 par ordre de mérite selon les valeurs de l'AIC.

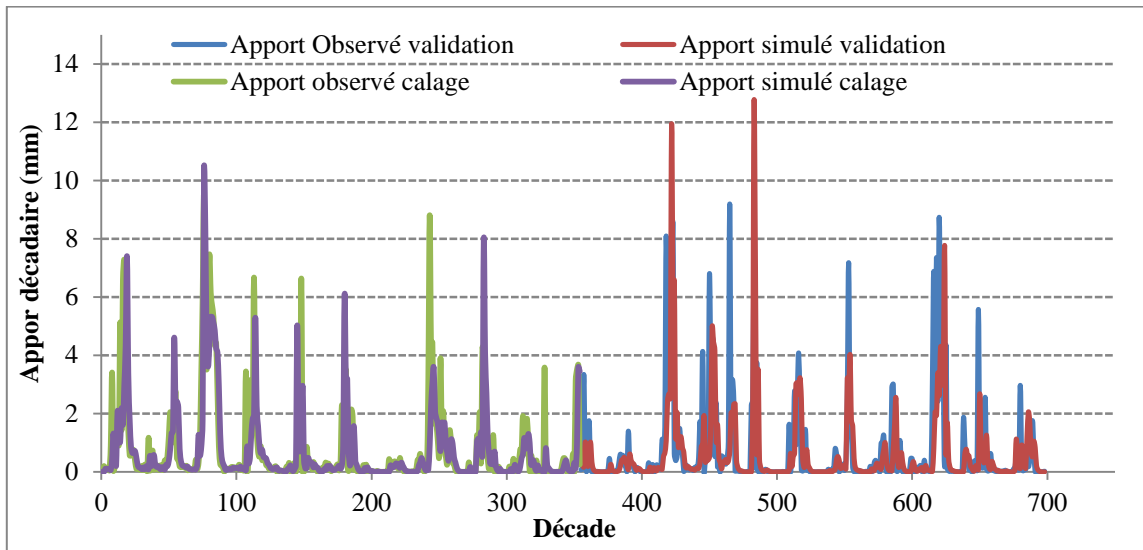


Figure5.32.Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides décennaires au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

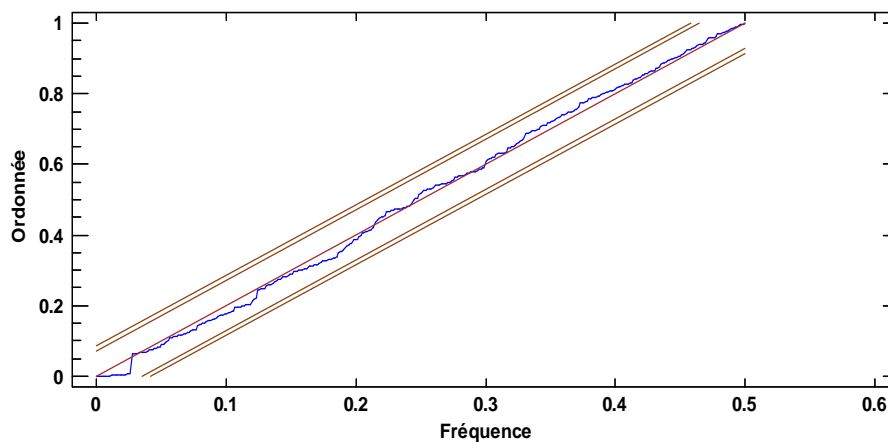


Figure5.33.Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides décennaires transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

L'allure du périodogramme cumulé des résidus issus de l'application du modèles ARMA(1,1) s'allonge d'une manière plus au moins régulière autour de la diagonale ce qui reflète le caractère plus au moins aléatoire des résidus et la validité du modèle ainsi adopté.

Tableau 5.5.Valeurs de l'AIC pour d'autres modèles ARIMA compétitifs

Modèle	AIC
ARIMA (1,0,1)	-5.36349
ARIMA (1,1,1)	-5.36275
ARIMA (0,1,2)	-5.36271

V.4.2. Analyses de séries temporelles des apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Les apports liquides journaliers en mm de l'oued Bouhamdane déduits du bilan hydrologique au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11) sont présentés par la figure 5.34. Ces débits sont déjà décrits par le tableau 2.5 du paragraphe II.4.1.

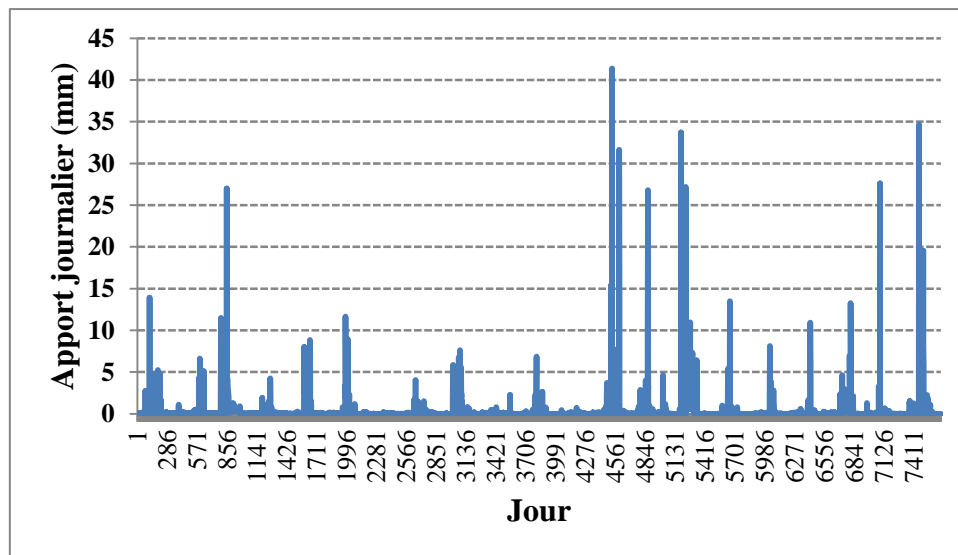


Figure 5.34. Visualisation des apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

- **Tests de stationnarité**

Il est de même ; les deux tests ADF et KPSS sont exécutés, sur la série chronologique journalière des apports liquides du barrage Hammam Debagh, en utilisant le code Matlab. Les tests indiquent les résultats résumés par le tableau 5.6.

Tableau 5.6. Résultats des tests ADF et KPSS pour les apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

Pas de temps	Variable	Test	Hypothèse	Décision
Journalier	Brute	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Normalisée	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Différenciée	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=0 (stationnaire)	
	Transformée	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	

- **Remarque :** Par mesure de commodité liée à la masse énorme des valeurs à l'échelle journalière soit 7670 valeurs d'apport liquide journalier, et ce, tout en facilitant l'exécution du processus d'analyse automatique par le logiciel Stagraphics. Tenant compte de tous cela, on se contentera dans ce qui suit à considérer pour l'élaboration des modèles ARMA, les deux dernières années (les plus récentes), il s'agit : (de 01/09/2009 jusqu'au 31/08/2011). Une année pour le calage (de 01/09/2009 jusqu'au 31/08/2010) et une année pour la validation (01/09/2010 jusqu'au 31/08/2011).

Les apports liquides journaliers en mm de l'oued Bouhamdane déduits du bilan hydrologique au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11) sont présentés par la figure 5.35.

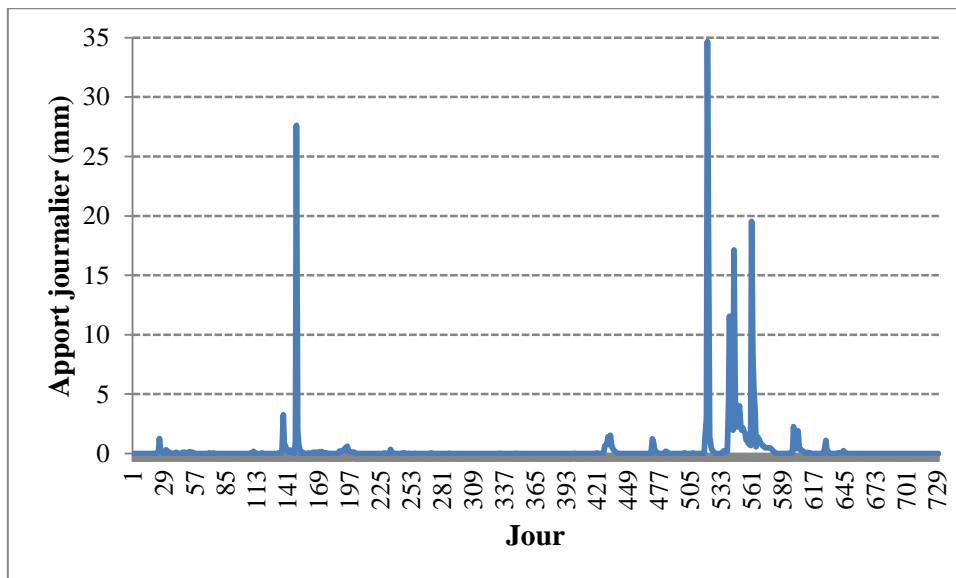


Figure 5.35. Visualisation des apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/2010-2010/11)

- **Tests de stationnarité**

Il est de même ; les deux tests ADF et KPSS sont exécutés, sur la série journalière, de deux ans, des apports liquides du barrage Hammam Debagh, en utilisant le code Matlab. Les tests indiquent les résultats résumés par le tableau 5.7.

Tableau 5.7. Résultats des tests ADF et KPSS pour les apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

Pas de temps	Variable	Test	Hypothèse	Décision
Journalier	Brute	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Normalisée	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	
	Différenciée	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=0 (stationnaire)	
	Transformée	ADF	H=1 (stationnaire)	Stationnaire
		KPSS	H=1 (non stationnaire)	

V.4.2.1. Analyses de séries temporelles des apports liquides journaliers transformés

La visualisation graphique des apports liquides journaliers, au sein du barrage Hammam Debagh, transformés par la méthode Box-Cox, est donnée par la figure 5.36.

La transformation a été optimisée pour avoir des données régulières normales le plus possible. La présence des valeurs nulles (apports liquides journaliers nuls) exige un ajout λ_2 différent de zéro dans la formulation de transformation. Pour avoir des valeurs transformées positifs, la valeur de l'ajout a été aussi différente de l'unité. Une valeur de ($\lambda_2=2$) a été finalement adoptée. Une valeur de l'exposant $\lambda_1= -5$ a été en conséquence estimée. Les résultats de la transformation Box-Cox sont résumés sur le graphique de la figure 13 de l'annexe 1.

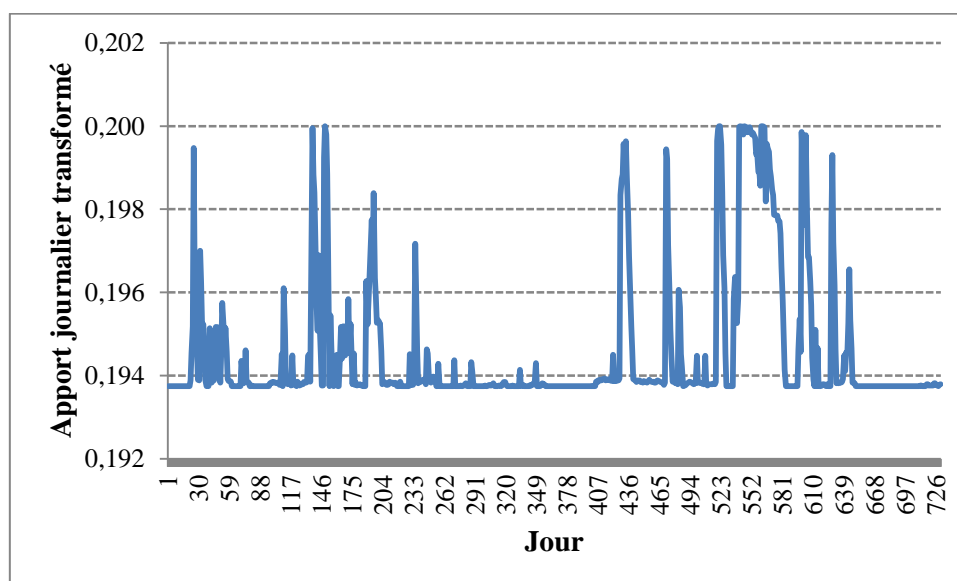


Figure 5.36. Visualisation des apports journaliers transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

- **Fonction d'autocorrélation, d'autocorrélation partielle et périodogramme**

De même en appliquant la fonctionnalité du logiciel Statgraphics liée à l'analyse descriptive des séries temporelles, les apports liquides transformés à l'échelle journalière, selon Box-Cox, de la période (2009/10-2010/11), au sein du barrage Bouhamdane, sont caractérisés par une fonction d'autocorrélation et une fonction d'autocorrélation partielle ainsi qu'un périodogramme illustrés par les figures 5.37, 5.38 et 5.39 respectivement.

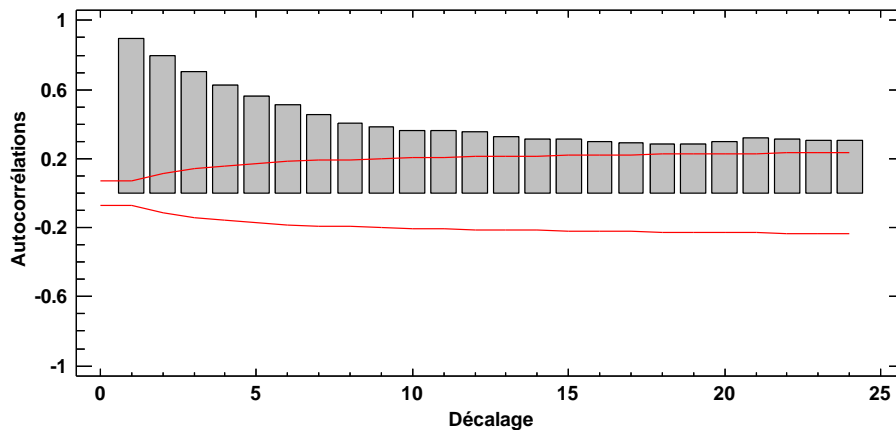


Figure 5.37. Fonction d'autocorrélation des apports liquides journaliers transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

La figure 5.37 indique la décroissance linéaire de la fonction d'autocorrélation qui reflète la présence d'une tendance dans la série. Cette constatation est renforcée en examinant la figure 5.36 de l'évolution des apports. En effet une phase caractérisée par des valeurs nulles peut être la source de ce phénomène de tendance. Tandis que la figure 5.38 favorise un modèle autorégressif d'ordre un. La figure 5.39 signale la périodicité dans la série (une périodicité de $1/0.0025$ soit 400 jours, environ une année).

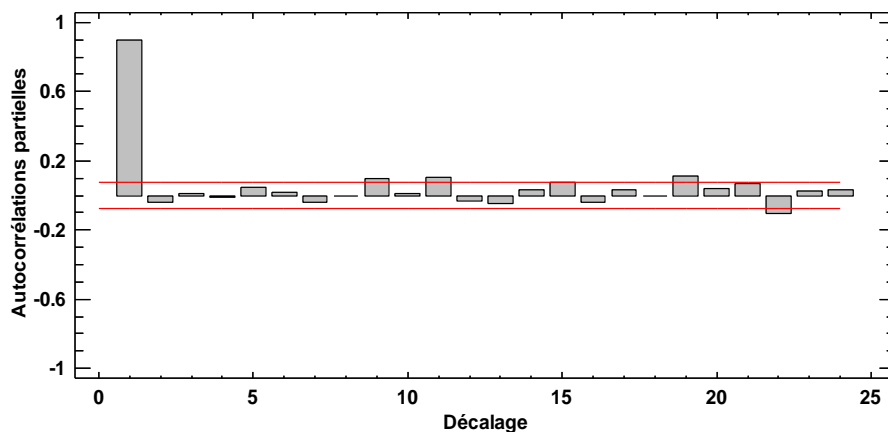


Figure 5.38. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décennaires transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

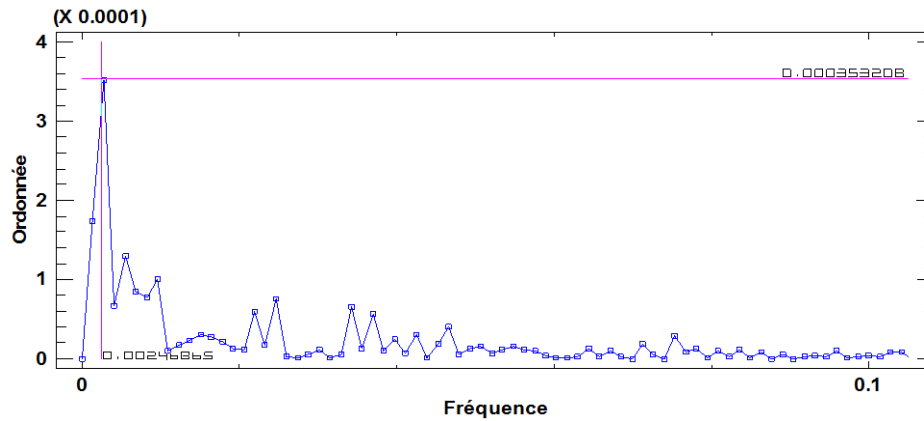


Figure 5.39. Périodogramme des apports journaliers transformés, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

Le modèle ARMA correspondant à ses attentes est donné par Statgraphics dont les résultats sont consignés dans le tableau 5.8. Les critères (**racine de la moyenne des erreurs quadratique (RMSE)**, **Coefficient de corrélation (R)** et **le rapport des coefficients de variation (I)**), seront retenus pour des éventuelles conclusions sur la performance du modèle. Le choix du modèle est bien entendu basé sur le critère d' Akaike (AIC).

Tableau 5.8. Résultats du modèle ARMA(1,0) pour les apports journaliers transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (1,0)	AR(1)=0.999948	AIC	-14.429	--
		RMSE (mm)	0.297	0.473
		R	0.979	0.909
		I	1.072	1.049

La confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation, tributaire du modèle ARMA (1,0) est assurée par la figure 5.40. La figure 5.41 est le même graphique de la figure 5.40, juste zoomé à une limite de 1 mm d'apport liquide journalier pour bien visualisé les apports de faibles valeurs.

D'autres modèles ARIMA compétitifs sont classés dans le tableau 5.9 par ordre de mérite selon les valeurs de l' AIC.

Les modèles ARIMA pour les apports journaliers bruts, normalisés et différenciés aboutissent à des résidus non aléatoires et autocorrélés (voir leurs périodogrammes cumulés en annexe 1 sur les figures 14, 15 et 16 respectivement).

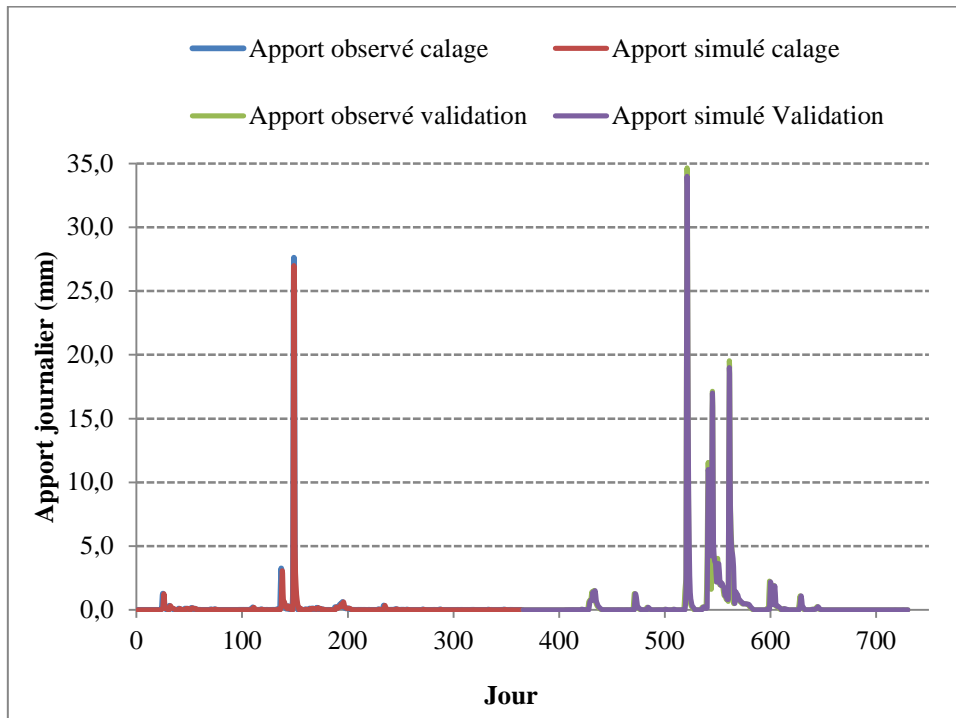


Figure 5.40. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

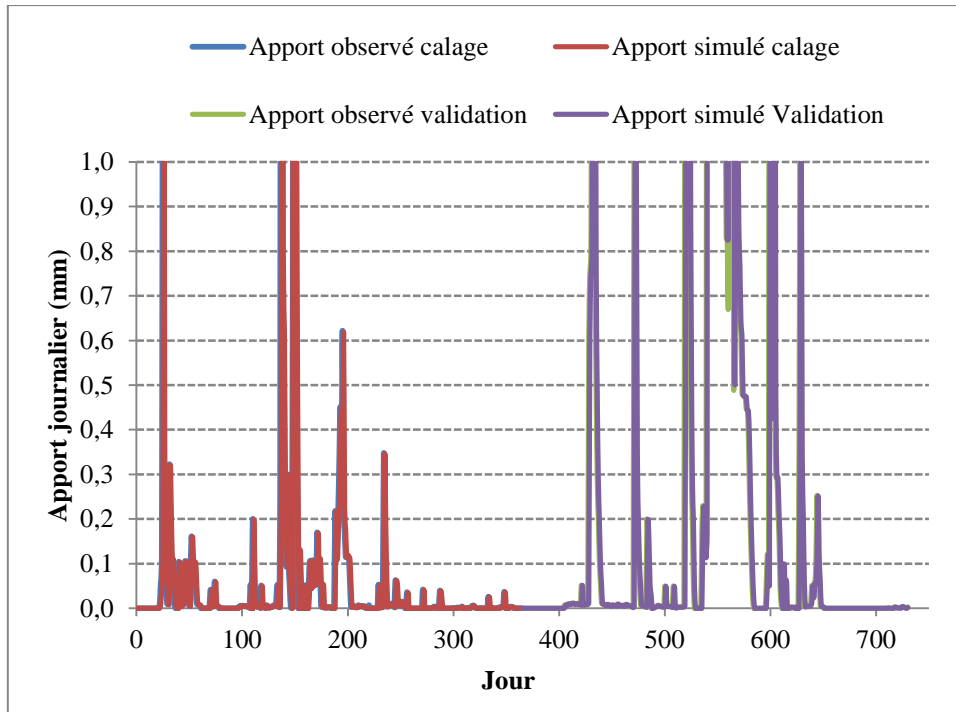


Figure 5.41. Confrontation des apports liquides observés et simulés en phase de calage et validation ; Modèle ARMA (1,1) pour les apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11) : Graphe zoomé limité à 1 mm

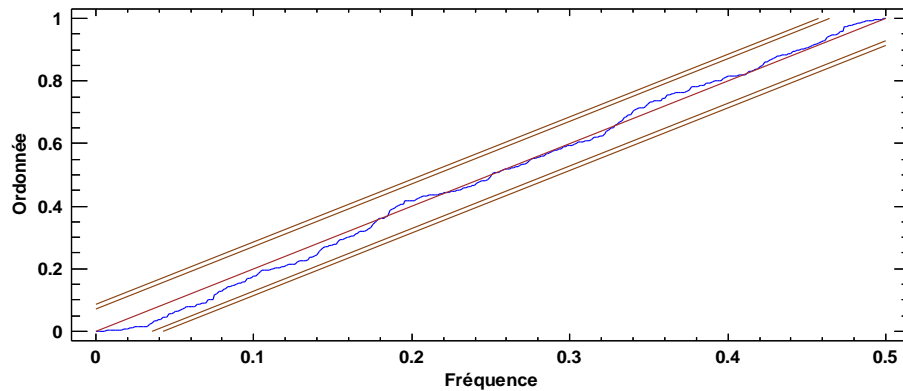


Figure 5.42. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,0) pour les apports liquides journaliers transformés selon Box-Cox, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/101-2010/11)

L'allure du périodogramme cumulé (figure 5.42) des résidus issus de l'application du modèles ARMA(1,0) s'allonge d'une manière plus au moins régulière autour de la diagonale ce qui reflète le caractère plus au moins aléatoire des résidus et la validité du modèle ainsi adopté.

Tableau 5.9. Valeurs de l'AIC pour d'autres modèles ARIMA compétitifs

Modèle	AIC
ARIMA (1,0,0)	-14.429
ARIMA (2,0,0)	-14.4228
ARIMA (2,0,1)	-14.4206

V.5. Conclusion

L'étude élaborée dans ce chapitre ressortit les résultats énumérés comme suit :

- Les modèles conceptuels sont plus performants à l'échelle mensuelle que leurs homologues issus de séries temporelles type ARIMA.
- Les modèles de séries temporelles type ARIMA sont plus commodes à une échelle plus courte à savoir l'échelle décadaire et surtout journalière.
- Aucun des modèles testés à l'échelle mensuelle (conceptuel ou ARIMA) reproduit fidèlement les valeurs extrêmes des débits (apports liquides).
- A échelles courtes, la présence des valeurs nulles complique la tâche de modélisation et pousse à des transformations et acrobaties mathématiques pour rendre compte aux exigences des modèles à adopter.
- A l'échelle journalière les modèles ARIMA semblent très consistants et reproduit très bien l'historique en calage et en validation et ne ratent pas les valeurs extrêmes.

CHAPITRE 6 : Mise en exploitation des modèles établis pour la prévision des apports liquides du barrage Hammam Debagh et recommandations

VI.1. Introduction

La prévision des débits horaires, journaliers, hebdomadaires, décadaires ou mensuels d'un cours d'eau est une tâche nécessaire pour une gestion efficace des ressources en eau de surface et pour permettre un réflexe appropriée et rapide dans les situations d'urgence.

Il est important, dans cette introduction, de faire la distinction entre la prévision et la prédiction. La prévision concerne l'estimation des conditions futures à une date donnée, ou durant un intervalle de temps spécifique, alors que la prédiction représente l'estimation des conditions futures, sans référence à un temps spécifique (Lettenmaier et Wood, 1993 in Fortin et al., 1997).

Les résultats de la modélisation des apports liquides par le modèle conceptuel GR2M, réalisés dans le quatrième chapitre ainsi que ceux de la modélisation par les séries temporelles type ARIMA au cinquième chapitre, s'avèrent intéressants et se prêtent à la mise en exploitation pour la prévision des apports liquides au sein du barrage Hammam Debagh à court (journalier) et à moyen (décadaire et mensuel) terme.

VI.2. Rappels des résultats établis des différentes modélisations

VI.2.1. Résultats établis par le modèle conceptuel GR2M

Au cours du quatrième chapitre, la meilleure qualité de modélisation conceptuelle a été aperçue pour la période (1974/75-1980/81) où la moyenne arithmétique des pluies et l'ETP_PM56 ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits issus de la *station hydrométrique Medjez Amar II*. Ces performances, en phase de validation, sont justifiées par la valeur très satisfaisante du critère de Nash ($NS \sim 78.5\%$ environ). Tandis que la meilleure qualité de modélisation a été aperçue pour la période (1990/91-2010/11) où la moyenne arithmétique des pluies et l'ETP_PM56 ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M où les débits sont issus du *barrage Hammam Debagh*. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur moyenne du critère de Nash ($NS \sim 61\%$).

VI.2.2. Résultats établis par les modèles de séries temporelles type ARIMA

a. A L'échelle mensuelle

Au cours du cinquième chapitre, Le modèle **ARIMA (2,0,1)** a été choisi comme meilleur modèle type ARIMA pour les débits mensuels observés à la station hydrométrique Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81). Par contre pour les apports mensuels

au sein du barrage Hammam Debagh, le modèle ARIMA (2,0,0) a été choisi comme meilleur modèle type ARIMA pendant la période (1990/91-1998/99) et la structure du modèle ARIMA (2,0,0) a été adoptée pour la période (1990/91-2010/11).

b. A L'échelle décadaire

Au cours du chapitre cinq, Le modèle **ARIMA (1,0,1)** a été choisi comme meilleur modèle type ARIMA pour les apports décadaires au sein du barrage Hammam Debagh, pour la période (1990/91-2010/11).

c. A L'échelle journalière

Au cours du même chapitre, Le modèle **ARIMA (1,0,0)** a été choisi comme meilleur modèle type ARIMA pour les apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh, pour la période (1990/91-2010/11).

VI.3. Mise en exploitation des modèles choisis pour la prévision des débits

VI.3.1. Exploitation des modèles conceptuels (GR2M) pour la prévision des débits mensuels

VI.3.1.1. Exploitation pas à pas des modèles conceptuels (GR2M) pour la prévision des débits mensuels

Les débits mensuels à la station hydrométrique Medjez Amar II ainsi que les apports liquides mensuels du barrage Hammam Debagh peuvent être prévus pas à pas (du mois au mois) moyennant les modèles GR2M correspondants en suivant les étapes suivantes :

- On garde les valeurs des paramètres de calage X1 et X2 dans le modèle GR2M choisi.
- On fait la lecture des valeurs de pluies aux différentes stations pluviométriques pour le mois correspondant et on procède à la moyenne arithmétique de ces valeurs.
- On estime la valeur de l'ETP par la relation adéquate (ETP_PM56 ou ETP_ANRH).
- En faisant rentrer la valeur résultante de la pluie et la valeur de l' ETP dans le modèle GR2M, une lecture directe déduite du modèle est décidée comme valeur mensuelle prévue du débit.

VI.3.1.2. Génération synthétique des débits mensuels par les modèles conceptuels (GR2M)

Les débits mensuels à la station hydrométrique Medjez Amar II ainsi que les apports liquides mensuels du barrage Hammam Debagh peuvent être simulés et générés pour des séries synthétiques moyennant les modèles GR2M correspondants et ainsi établis en suivant les étapes suivantes ([Houichi, 2010](#)) :

- Simulation des séries synthétiques des pluies mensuelles, dans les stations pluviométriques concernées, par les lois de probabilités les plus adéquates tout en considérant les pluies mensuelles comme variables aléatoires.
- Simulation des séries synthétiques des évapotranspirations mensuelles par les séries de Fourier tout en considérant les ETP mensuelles comme variables cycliques.
- En appliquant le modèle GR2M correspondant avec ces paramètres de calage gardés fixes.
- On déduit ainsi les séries synthétiques des débits mensuels ou bien les apports liquides mensuels.
- On vérifie la persistance des caractéristiques statistiques (moyenne, écart type, coefficient de variation ...) dans les valeurs générées et les valeurs historiques.

VI.3.2. Exploitation des modèles type ARIMA pour la prévision des apports liquides

Partant des conclusions intermédiaires concernant l'adéquation des modèles élaborés à différentes échelles, on se contentera à utiliser uniquement le modèle ARIMA(1,0,0) ou tout simplement AR(1) pour prévoir les apports liquides journaliers au sein du barrage Hammam Debagh. Les valeurs décadaires et mensuelles seront par la suite déduites par cumul progressif.

VI.3.2.1. Exploitation du modèle ARIMA (1,0,0) pour la prévision des apports liquides journaliers

VI.3.2.1.1. Exploitation pas à pas du modèle ARIMA (1,0,0) pour la prévision des apports liquides journaliers

Le modèle adopté se désigne par ARIMA (1,0,0) ou AR(1) et s'écrit en équation sous la forme :

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (6.1)$$

Où :

X_t est le débit ou l'apport liquide journalier (transformé pour notre cas) à prévoir ;

X_{t-1} est le débit ou l'apport liquide journalier (transformé pour notre cas) précédent ;

ϕ_1 est le coefficient autorégressif d'ordre un, égale pour le présent cas (0.999948) ;

ε_t est le résidu aléatoire du modèle.

Les apports liquides journaliers en application du modèle AR(1) selon la relation 6.1, sont représentés sur le graphique de la figure 6.1. Une tentative de 30 jours prévoit des valeurs de crues.

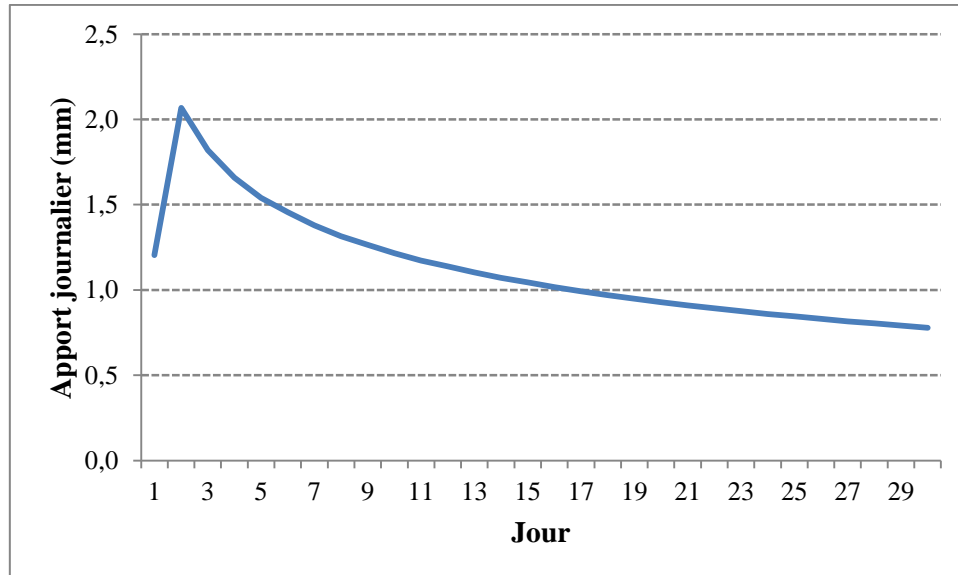


Figure 6.1. Apports liquides de 30 jours prévus par AR(1) selon l'EQ. 6.1 au sein du barrage Hammam Debagh

NB : Les valeurs des apports liquides déduites en sommation des valeurs journalières donnent trois valeurs décennales (12.7 mm, 11.3 mm et 7.5 mm) et une valeur mensuelle de 32.5mm.

VI.3.2.1.1. Génération synthétique des apports liquides journaliers par le modèle ARIMA(1,0,0)

Pour générer des valeurs synthétiques des apports journaliers au sein du barrage Hammam Debagh, on procède à la simulation des résidus aléatoires transformés ε_t du modèle ARIMA (1,0,0) ou AR(1), en phase de calage, tout en gardant fixe la valeur du coefficient autorégressif ϕ_1 lors de l'application de la relation 6.1.

Le graphique de la figure 5.42 du chapitre cinq renvoie, bien entendu, le caractère aléatoire des résidus en phase de calage du modèle AR(1) adopté. La figure 6.2 donne l'évolution temporelle des résidus du modèle AR(1) en phase de calage.

La figure 6.3 donne l'évolution temporelle des résidus transformés selon Box-Cox du modèle AR(1) en phase de calage.

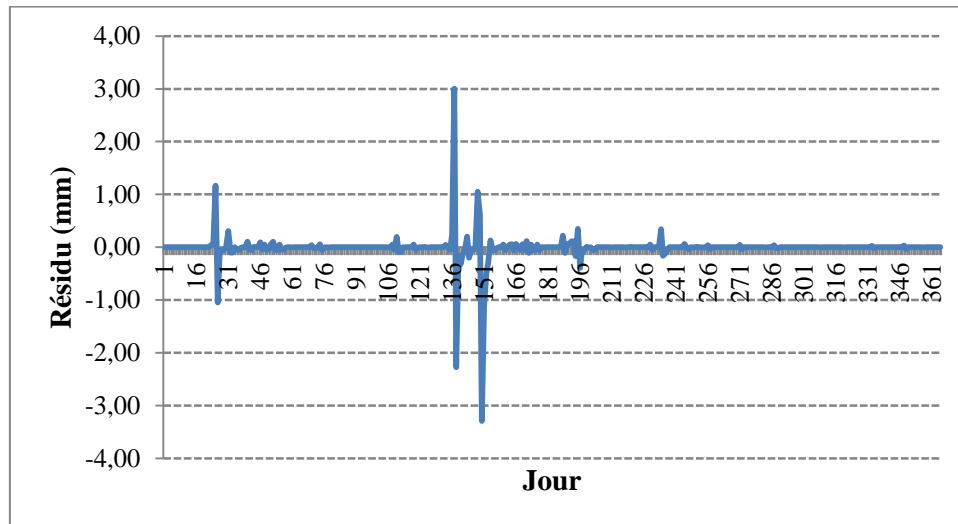


Figure6.2.Evolution temporelle des résidus du modèle AR(1,0,0) en phase de calage

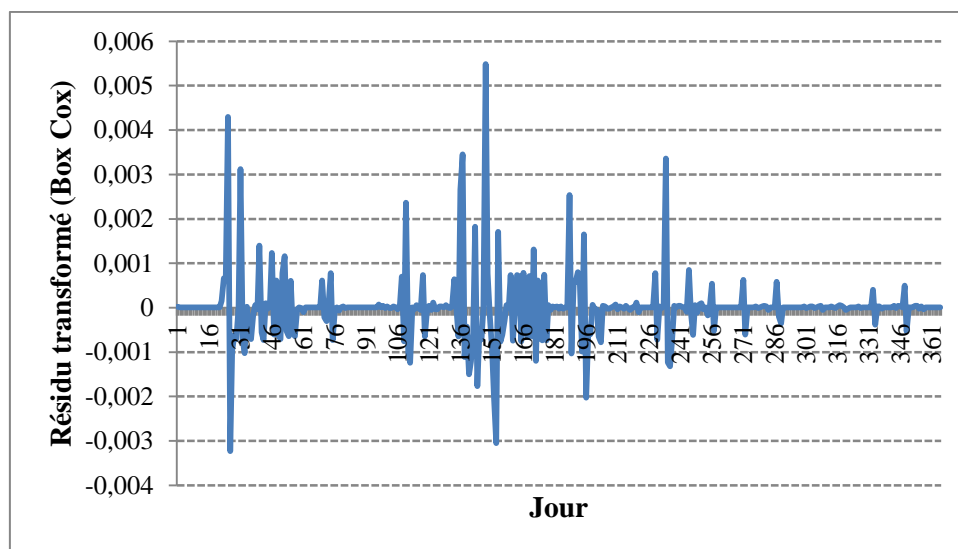


Figure6.3.Evolution temporelle des résidus transformés selon Box-Cox du modèle AR(1,0,0) en phase de calage

Les résidus (transformés) suivent une loi Normale et seront légitimement simulés dans cette loi bien connue, cette simulation sera faite pour une moyenne nulle et un écart type transformé égale à 0.19660775 soit 0.296 mm.

L'histogramme des résidus transformés par rapport à la fonction de densité de probabilité de la loi normale est donné par la figure 6.4

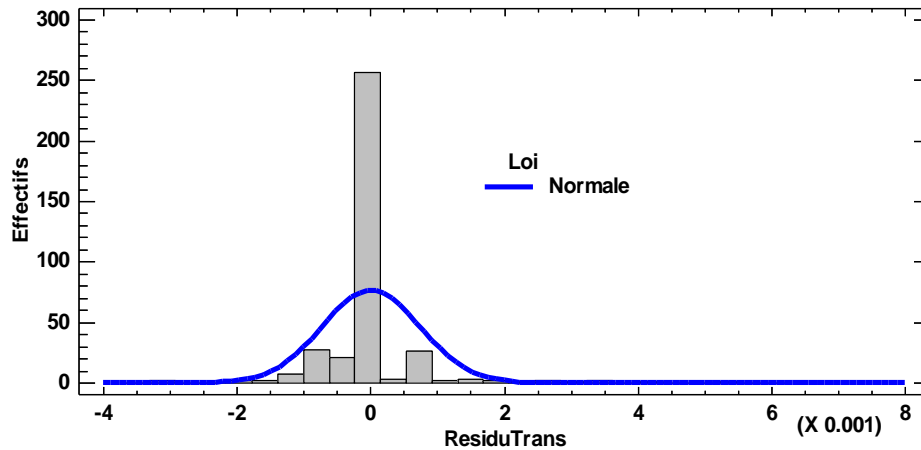


Figure6.4.Histogramme des résidus transformés par rapport à la fonction de densité de probabilité de la loi normale

Un exemple à titre indicatif de simulation des apports journaliers est illustré par les figures 6.5 et 6.6. En effet partant d'une moyenne interannuelle de 21 ans égale à 0.26 mm de toute la série historique complète de la période (1990/91-2010/11), on constate que la série simulée garde les mêmes caractéristiques statistiques de base à savoir : une moyenne de 0.349 mm, un écart type de 1.484 mm et un coefficient de variation de 4.647 vis-à-vis une moyenne de 0.26 mm, un écart type de 1.45 mm et un coefficient de variation de 5.55 de l'historique.

Cette opération de simulation doit se faire des centaines de fois pour confirmer la persistance du modèle à garder la structure statistique historique.

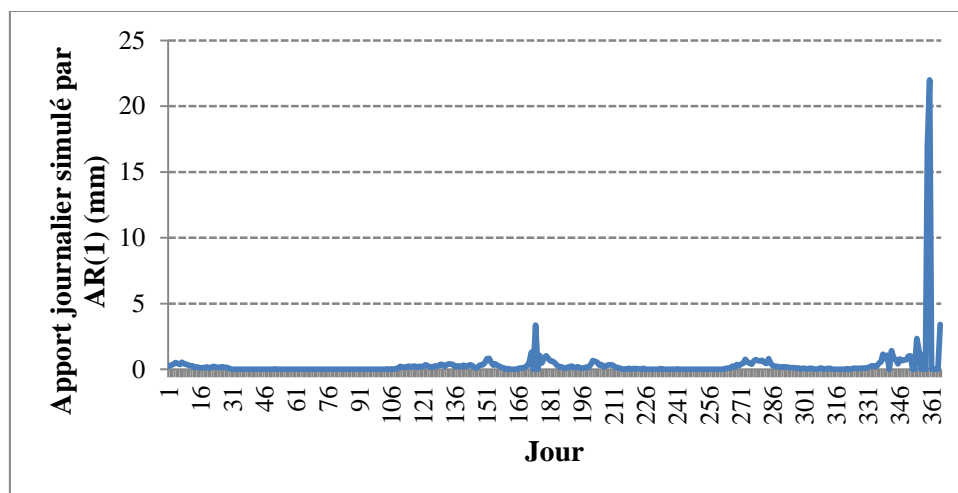


Figure6.5.Un exemple à titre indicatif de simulation des apports journaliers par le modèle AR(1,0,0) au sein du barrage Hammam Debagh

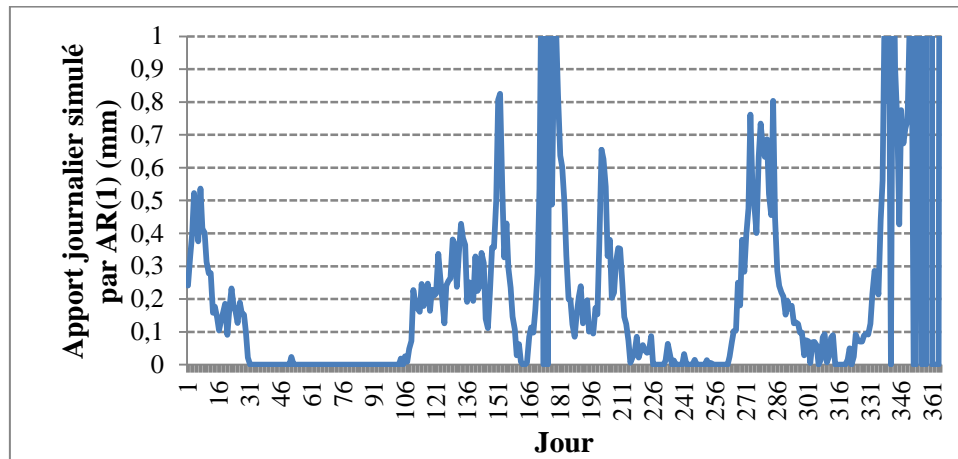


Figure 6.6. Un exemple à titre indicatif de simulation des apports journaliers par le modèle AR(1,0,0) au sein du barrage Hammam Debagh ; Graphe zoomé limité à 1 mm pour illustrer les apports faibles

Les apports décennaires et mensuels simulés peuvent être déduits des simulations journalières par cumuls correspondants.

VI.4. Conclusions et recommandations

Au terme de ce chapitre, plusieurs conclusions et recommandations peuvent être citées et formulées à savoir :

- Le modèle conceptuel GR2M peut être considéré comme une source acceptable à exploiter pour la prévision des apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh quoi que ce type de modèle ne reproduise pas fidèlement les valeurs extrêmes. La procédure d'exploitation dudit modèle doit prendre en charge et mettre l'accent sur le bon choix des valeurs d'entrée telles les pluies concernées et les évapotranspirations adéquates.
- Les modèles de séries temporelles type ARIMA peuvent remplacer les modèles conceptuels surtout à court terme et à l'échelle journalière, et ce, pour prévoir les apports liquides au sein du barrage Hammam Debagh. L'exploitation des modèles ARIMA à petite échelle aboutit d'une manière fiable à la prévision des apports liquides pour des pas de temps plus grands par un simple cumul correspondant.
- Une recherche d'amélioration des résultats de modélisation demeure indispensable et l'utilisation d'autres techniques plus performantes et à la mode s'avère séduisante comme éventuelle alternative qui assure la prévision des apports liquides sans contrainte des valeurs extrêmes tout en surmontant le problème des valeurs nulles.

Conclusion générale

La caractérisation hydrologique exacte des entités naturels dits bassins versants demeure un phénomène qui s'éloigne de la maîtrise même avec les études poussées et approfondies réalisées depuis des décennies et qui ont abouti à des éléments de réponses plus ou moins adéquats.

La modélisation est grosso modo définie comme une représentation abstraite d'un phénomène naturel simple ou complexe, qui permet reproduire fidèlement ce phénomène.

Différents types de modèles ont été proposés, par la communauté scientifique, pour la modélisation et la simulation des séries hydrométriques (débits ou apports liquides). Les modèles autorégressifs et à moyenne mobile ARMA ont été parmi les premiers à être utilisés, outre les modèles conceptuels basés sur le processus de passage pluie-débit. Cependant, et à notre connaissance, l'application des types ARMA n'a pas connue d'exploration au profit des données hydrologiques des bassins en Algérie.

Nous avons procédé dans cette contribution à la collecte des données relatives aux apports liquides du bassin versant Oued Bouhamdane, mesurés à la station hydrométrique Medjez Amar II pour une surface drainée de 1105 km² et évalués au niveau du Barrage Hammam Debagh pour une surface moindre de 1070 km², et ce, dans le but d'élaborer des modèles de simulation des scénarios avenir desdits apports en appliquant le modèle conceptuel mensuel parcimonieux de Cemagref dénommé GR2M ainsi que plusieurs modèles de séries temporelles type ARMA aux différents pas de temps à savoir : mensuel, décadaire et journalier.

Le mémoire s'est alors articulée autour de deux parties constituées chacune de trois chapitres.

La première partie a contenu, en premier chapitre et en premier lieu, une description sommaire du sous bassin d'oued Bouhamdane qui est un affluent important de la Seybouse. Le sous bassin est caractérisé essentiellement par une superficie drainée de 1105 km². Toutes les autres caractéristiques sont données et résumées sous forme de tableaux et figures (cartes et photos). En deuxième lieu le Barrage Hammam Debagh a été décrit historiquement et techniquement. Grosso modo le barrage est en terre et emmagasine plus de 200 millions de m³ d'eau. Il est muni de deux évacuateurs fonctionnant en charge type tulipe. La retenue reçoit les eaux de l'oued Bouhamdane pour une superficie de 1070 km². La collecte des données, pluviométriques et hydrométriques ainsi que leurs présentations sous forme de tableaux de valeurs numériques et sous forme de graphiques illustratifs, qui va servir de déceler la nature

de ces données et leur aptitude à se prêter à des procédures de modélisations à entamer dans la deuxième partie de ce mémoire, est accomplie au deuxième chapitre. Dans le troisième, plusieurs notions, définitions et formulations mathématiques, ont été énumérés, décrites et rappelées. Ces notions sont attachées à la modélisation basée sur les modèles conceptuels, particulièrement au pas de temps mensuel à savoir le modèle GR2M. Elles concernaient également la modélisation basée sur la méthodologie de séries temporelles type ARIMA. Deux aperçus distincts ont été donnés de la partie littérature à propos des modèles conceptuels et des modèles ARIMA.

La deuxième partie, quant à elle, a proposé au quatrième chapitre, le fruit d'une adaptation conceptuelle à travers l'application, aux données hydrométriques du bassin Oued Bouhamdane, du modèle conceptuel à l'échelle mensuelle de CEMAGREF baptisé GR2M (Génie Rural à deux paramètres à l'échelle mensuelle). L'application du modèle GR2M a intéressé les données des apports liquides au sein de la station hydrométrique Medjez Ammar II et au niveau du Barrage Hammam Debagh. Dans ce chapitre, il ressort que :

Le choix de la relation d'estimation de l'évapotranspiration mensuelle n'influe que d'une manière insignifiante sur les résultats de la modélisation conceptuelle moyennant le modèle GR2M et que le modèle conceptuel GR2M ne reproduit pas fidèlement les valeurs extrêmes notamment les crues. *Pour la station Medjez Amar II*, la mauvaise qualité de modélisation a été détectée pour la période (1974/75-1980/81) où la moyenne pondérée des pluies et les évapotranspirations évaluées par la formule de l'ANRH ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits issus de la station hydrométrique Medjez Amar II. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur acceptable du critère de Nash ($NS=75.105\%$). La meilleure qualité de modélisation a été détectée pour la période (1974/75-1980/81) où la moyenne arithmétique des pluies et les évapotranspirations évaluées par la formule de Penman-Monteith (FAO56) ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits issus de la station hydrométrique Medjez Amar II. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur très satisfaisante du critère de Nash ($NS=78.48\%$). *Pour le barrage Hammam Debagh*, La mauvaise qualité de modélisation a été détectée pour la période (1990/91-2010/11) dans le cas où l'unique station pluviométrique du barrage Hammam Debagh est considérée comme la seule entrée pluviométrique et hydrométrique au modèle GR2M, cette dégradation des performances, en phase de validation, est reflétée par la valeur faible du critère de Nash ($NS=50\%$). La meilleure qualité de modélisation a été détectée pour la période (1990/91-2010/11) où la moyenne arithmétique des pluies et les évapotranspirations évaluées par la formule de Penman-Monteith (FAO56)

ont été prises comme entrées pour le modèle GR2M avec les débits qui sont issus du barrage Hammam Debagh. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur moyenne du critère de Nash ($NS=60.88\%$). Le cinquième chapitre est consacré à l'application des modèles des séries temporelles type ARIMA (Auro-régressif à Moyenne mobiles Intégrée). Cette phase de modélisation a été élaborée aussi avec les données des apports liquides au sein de la station hydrométrique Medjez Ammar II et au niveau du Barrage Hammam Debagh. L'étude raffinée dans ce chapitre ressortit les résultats énumérés comme suit : (1) Les modèles conceptuels sont plus performants à l'échelle mensuelle que leurs homologues issus de séries temporelles type ARIMA ; (2) Les modèles de séries temporelles type ARIMA sont plus commodes à une échelle plus courte à savoir l'échelle décadaire et surtout journalière ; (3) Aucun des modèles testés à l'échelle mensuelle (conceptuel ou ARIMA) reproduit fidèlement les valeurs extrêmes des débits (apports liquides) ; (4) A échelles courtes, la présence des valeurs nulles complique la tâche de modélisation et pousse à des transformations mathématiques pour rendre compte aux exigences des modèles à adopter ; (5) A l'échelle journalière les modèles ARIMA semblent très consistants et reproduit très bien l'historique en calage et en validation et ne ratent pas les valeurs extrêmes. Ces performances, en phase de validation, sont reflétées par la valeur faible du $RMSE$ qui est de 0.473 mm et un rapport des coefficients de variation très proche de l'unité ($I = 1.049$). Au terme du sixième chapitre, plusieurs conclusions et recommandations peuvent être citées et formulées à savoir que : (1) le modèle conceptuel GR2M peut être considéré comme une source acceptable à exploiter pour la prévision des apports liquides mensuels au sein du barrage Hammam Debagh quoi que ce type de modèle ne reproduise pas fidèlement les valeurs extrêmes. La procédure d'exploitation dudit modèle doit prendre en charge et mettre l'accent sur le bon choix des valeurs d'entrée telles les pluies concernées et les évapotranspirations adéquates. (2) Les modèles de séries temporelles type ARIMA peuvent remplacer les modèles conceptuels surtout à court terme et à l'échelle journalière, et ce, pour prévoir les apports liquides au sein du barrage Hammam Debagh. (3) L'exploitation des modèles ARIMA à petite échelle aboutit d'une manière fiable à la prévision des apports liquides pour des pas de temps plus grands par un simple cumul correspondant. (4) Une recherche d'amélioration des résultats de modélisation demeure indispensable et l'utilisation d'autres techniques plus performantes et à la mode s'avère séduisante comme éventuelle alternative qui assure la prévision des apports liquides sans contrainte des valeurs extrêmes tout en surmontant le problème des valeurs nulles.

ANNEXE 1

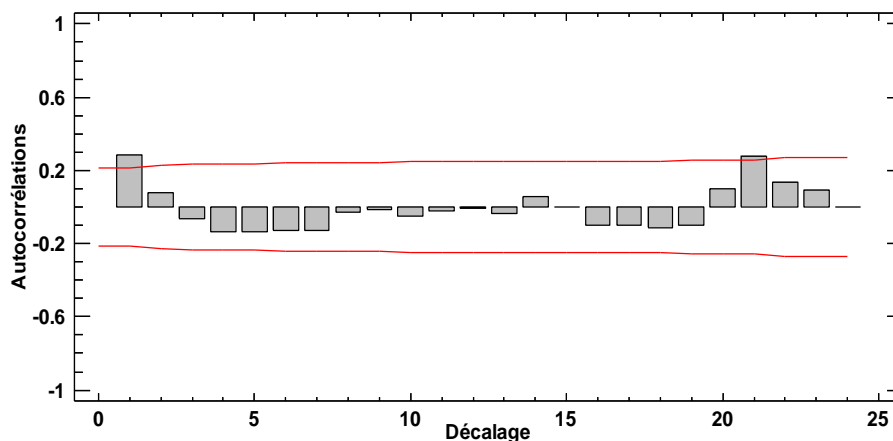


Fig. 1. Fonction d'autocorrélation des débits bruts mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

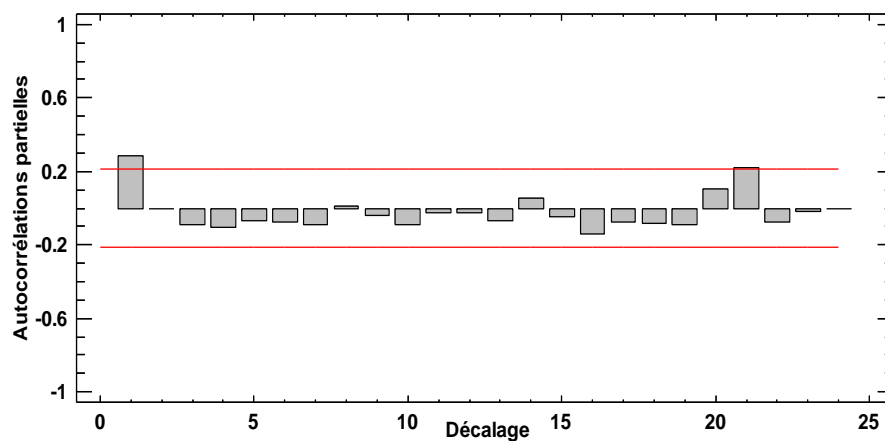


Fig. 2. Fonction d'autocorrélation partielle des débits bruts mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

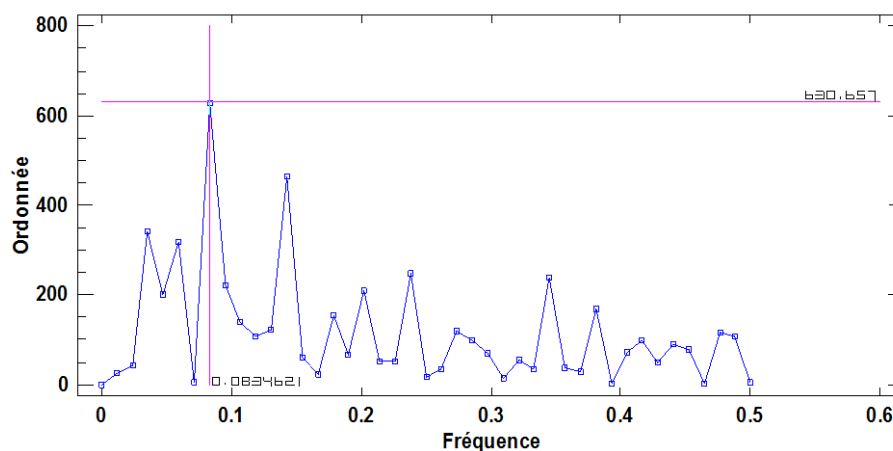


Fig. 3. Périodogramme des débits bruts mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

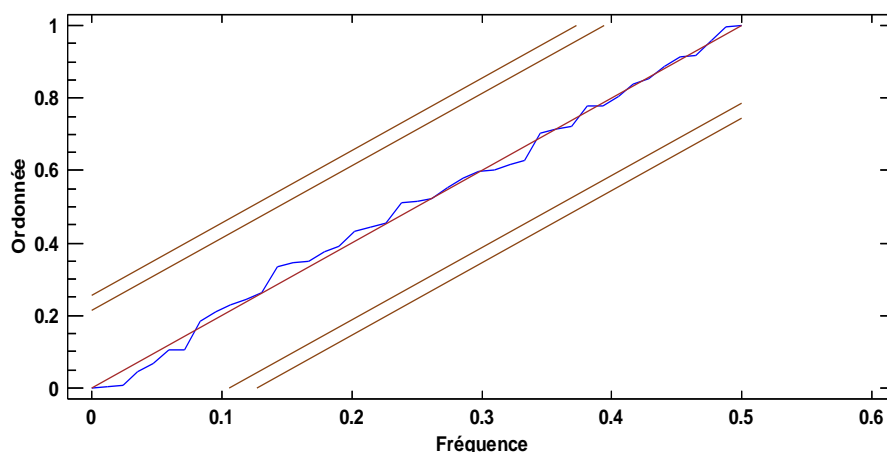


Fig. 4. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,0) pour les débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

Tableau 1. Résultats du modèle ARMA(1,0) pour les débits mensuels observés à la station Medjez Amar II pendant la période (1974/75-1980/81)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (1,0)	AR(1) = 0.297954	RMSE (mm)	6,37	9,987
		I	3,35	3,36

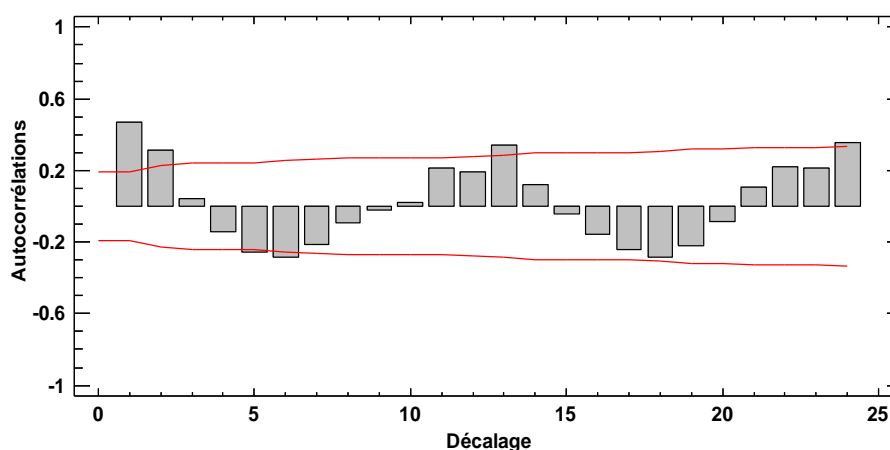


Fig. 5. Fonction d'autocorrélation des racines des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

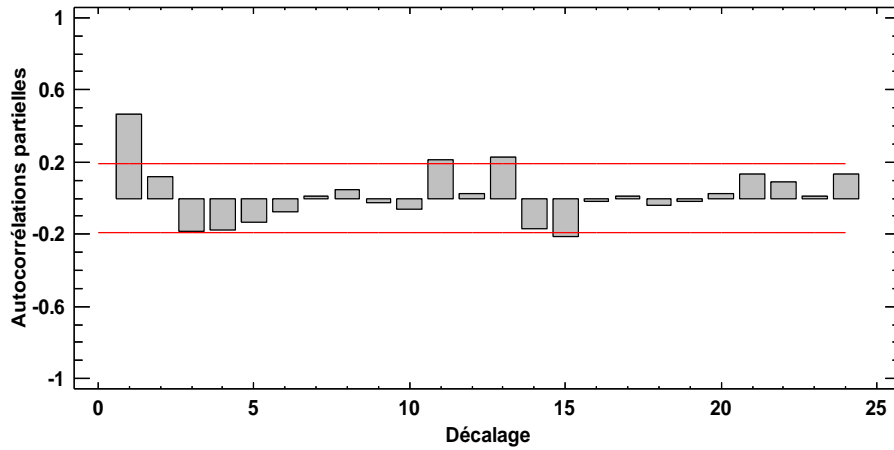


Fig. 6. Fonction d'autocorrélation partielle des racines des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

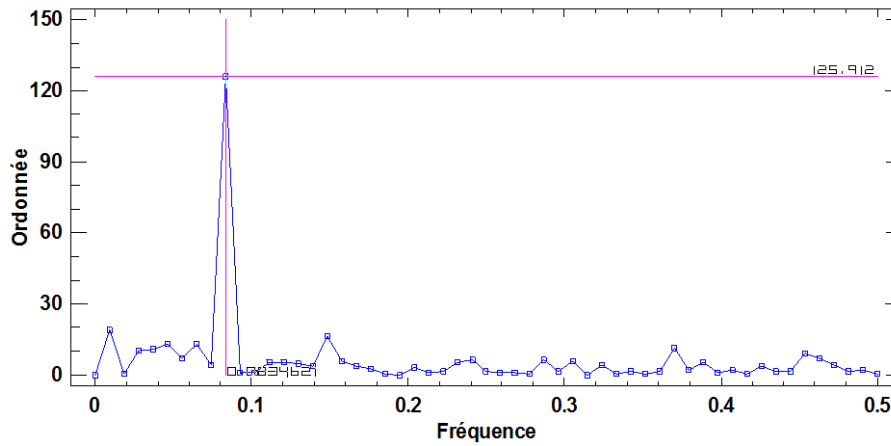


Fig. 7. Périodogramme des racines des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

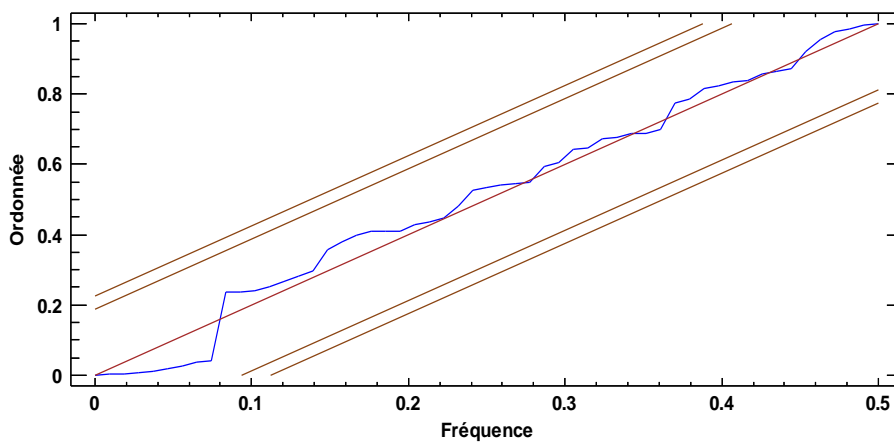


Fig. 8. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (2,0) pour les racines des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

Tableau 2. Résultats du modèle ARMA(2,0) pour les racines des apports mensuels au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-1998/99)

Modèle	Paramètres du modèle	Critères	Calage	Validation
ARMA (2,0)	$AR(1) = 0.49782$	RMSE (mm)	18,326	10,029
	$AR(2) = 0.297991$	I	1,87	1,81

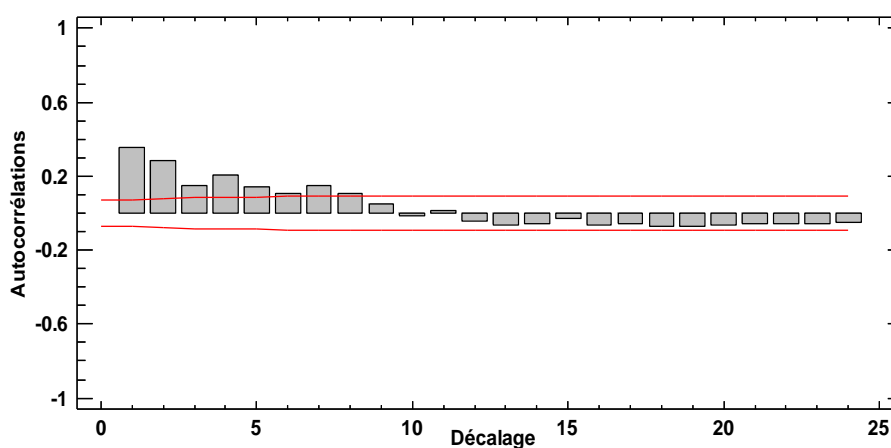


Fig. 9. Fonction d'autocorrélation des apports liquides décennaux normalisés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

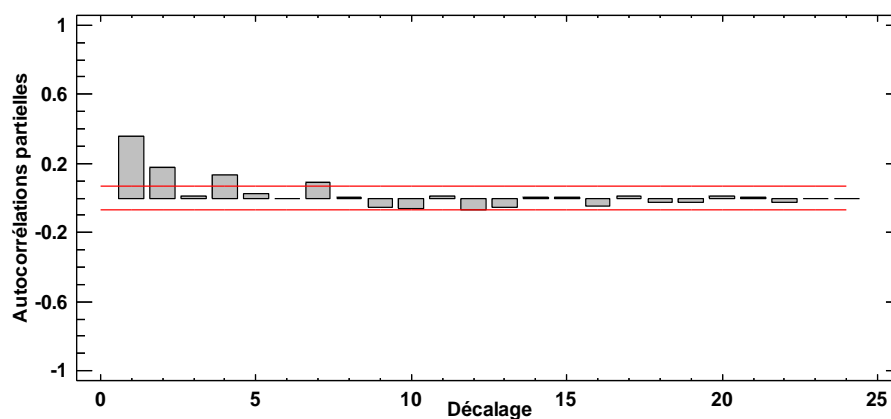


Fig. 10. Fonction d'autocorrélation partielle des apports liquides décennaux normalisés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

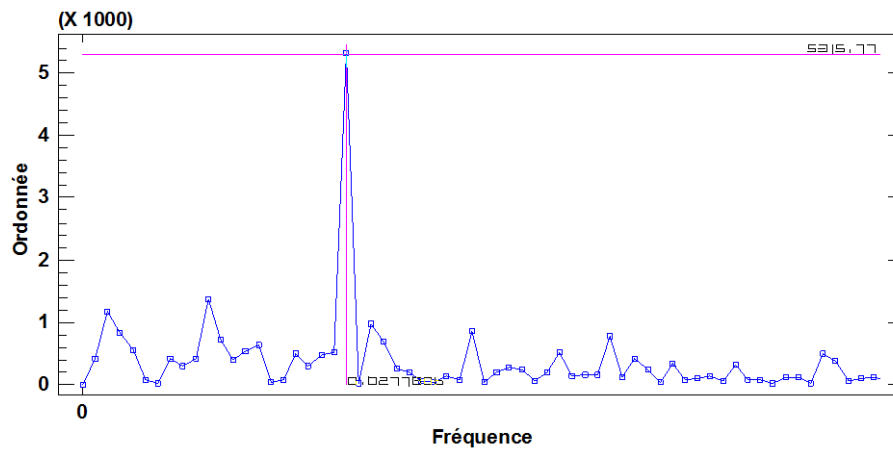


Fig. 11. Périodogramme des apports décennaux normalisés au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

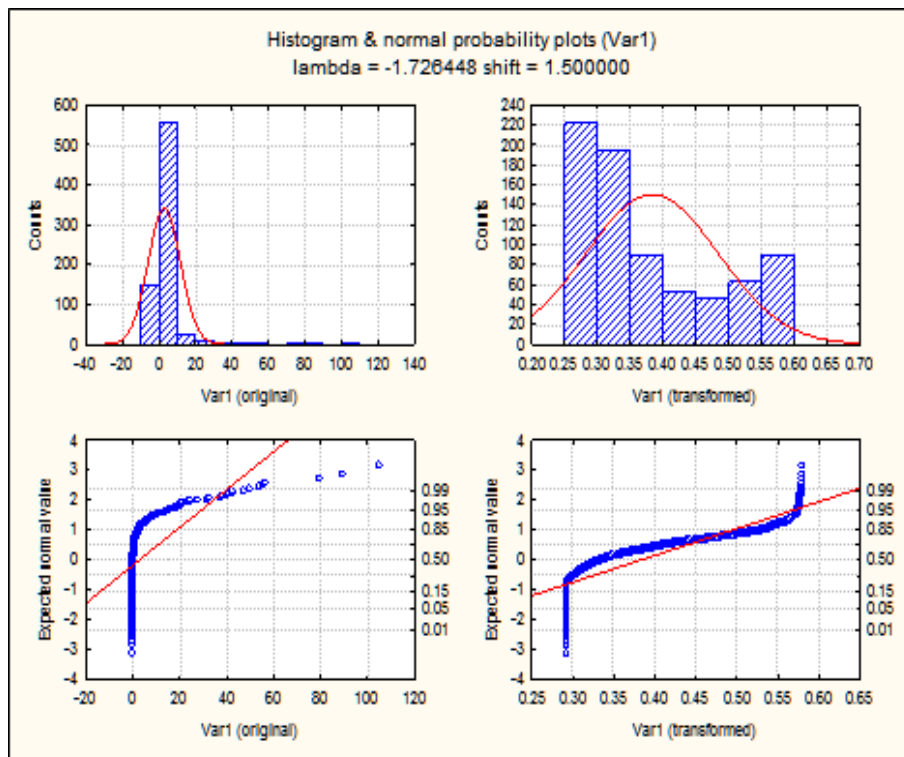


Fig. 12. Transformation Box-Cox des apports décennaux bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (1990/91-2010/11)

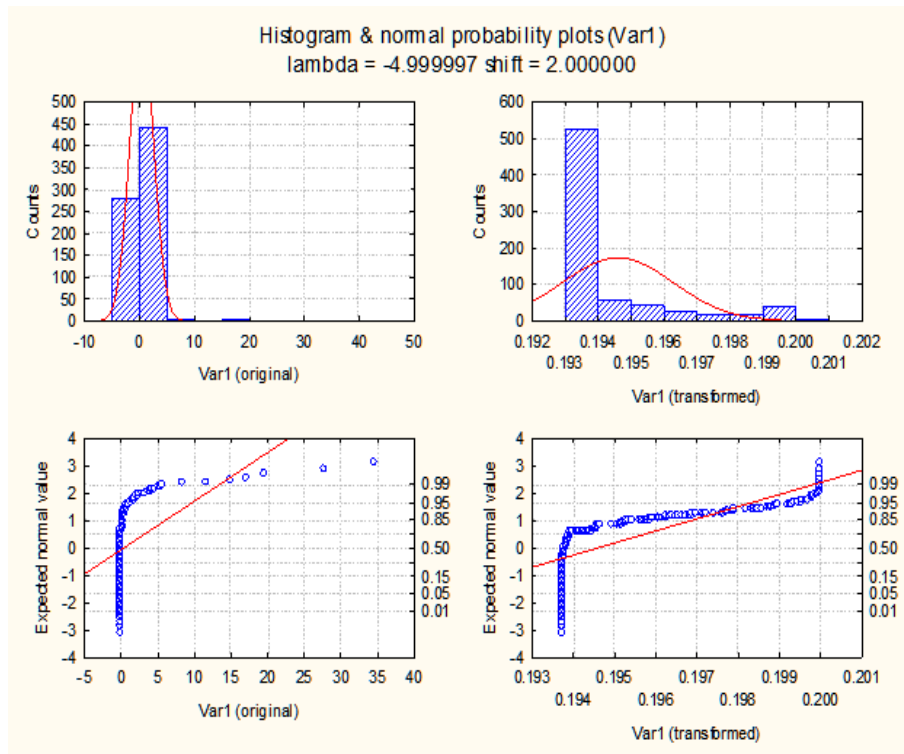


Fig. 13. Transformation Box-Cox des apports journaliers bruts au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/10-2010/11)

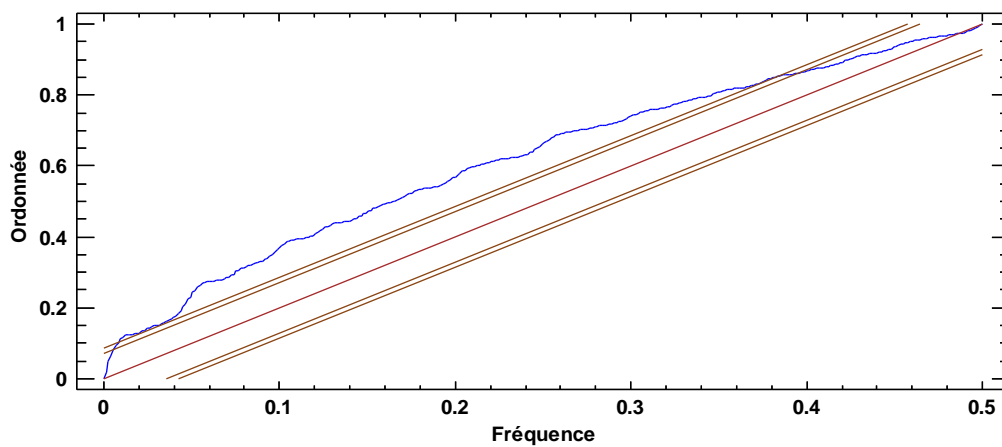


Fig. 14. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,0) pour les apports liquides journaliers **bruts**, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/101-2010/11), $AR(1)=0.117754$; $RMSE_{val}=2.513$ mm

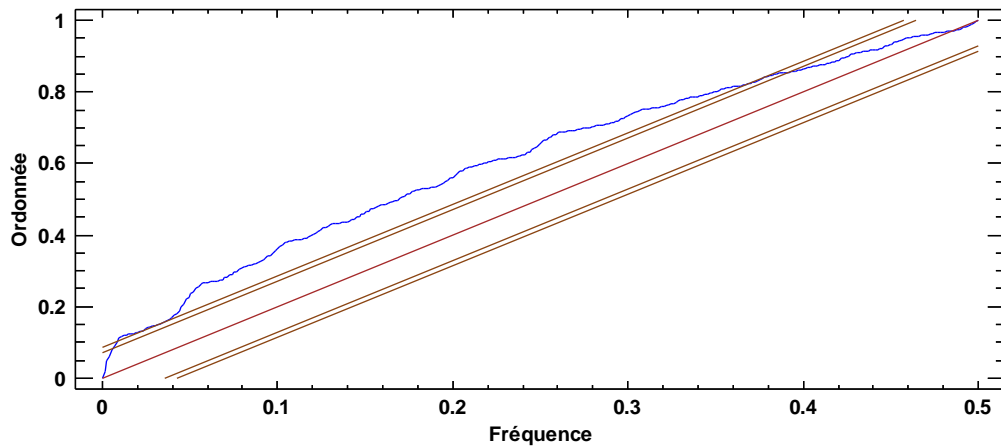


Fig. 15. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,0) pour les apports liquides journaliers **normalisés**, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/101-2010/11), $AR(1)=0.129574$; $RMSEval=2.808$ mm

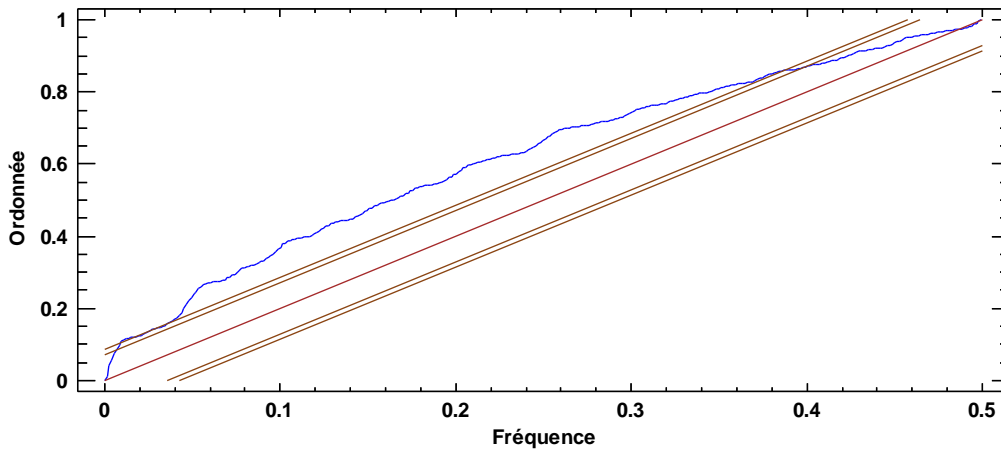


Fig. 16. Périodogramme cumulé des résidus ; Modèle ARMA (1,0,1) pour les apports liquides journaliers **différenciés une fois**, au sein du barrage Hammam Debagh pendant la période (2009/101-2010/11), $AR(1)= 0.106286$, $MA(1)= 0.995388$; $RMSEval=2.48073$ mm

Bibliographie

ABH. (1999). Les cahiers de l'Agence de Bassin Hydrographique : Constantinois-Seybousse-Mellegues, N°01. (Juin 1999).

ANB. (1985). Barrage Hammam Debagh, Fiche technique.

ANRH. (2005). Carte du réseau hydroclimatologique et de surveillance de la qualité des eaux du nord de l'Algérie.

ANRH-GTZ. (2003). Etude de synthèse sur les ressources en eaux de surface de l'Algérie du Nord (Rapport d'étude). Alger : Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), 2003. 41pp.

AKAIKE H. (1974). A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Automat. Control, 19: 716-723.

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy

ARDOIN S., DEZETTER A., SERVAT E., BOCQUILLON C. (2001). Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de la relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. C.R.A.S. Série (IIa), 333, 10, 611-616.

BENCHAIBA L. (2006). Condition d'écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau : Bassin versant de l'oued Bouhamdane (W. DE GUELMA, EST ALGERIEN). Mémoire de Magister en hydraulique. Univ de Batna. Algérie.

BOX G. E. P., COX D. R. (1964). An analysis of transformations, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 26, pp. 211- 252.

BOX G.E.P., JENKINS G.M. (1976). Time series analysis: Forecasting and control. Oakland, CA: Holden-Day, 1976.

CAN I., TOSUNOGLU F., KAHYA E. (2012). Daily streamflow modelling using autoregressive moving average and artificial neural networks models: case study of Çoruh basin, Turkey. Water and Environment Journal **26** (2012) 567–576.

CHKIR N. (1994). Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Thèse doctorat. L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris. P22.

DICKEY D.A., FULLER W.A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. J. Am. Stat. Assoc. 74, 423–431.

FORTIN V., OUARDA T.B.M.J., RASMUSSEN P.F., BOBEE B. (1997). Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits : A review of streamflow forecasting methods. Revue des Sciences de l'Eau, Rev. Sci. Eau 10 (4) ,1997. 461-487.

GHACHI A. (1986). Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie : le bassin de la Seybousse, Alger, O.P.U., 508 p.

GHANBARPOUR M. R. , AMIRI M. , ZAREI M., DARVARI Z. (2012). Comparison of stream flow predicted in a forest watershed using different modelling procedures: ARMA, ANN, SWRRB, and IHACRES models, *International Journal of River Basin Management*, 10:3, 281-292, DOI: 10.1080/15715124.2012.699893

HOUICHI L. (2010). Generation of the data input of a monthly conceptual model for scenarios of management of the liquid flow - Application to Wadi Reboâ in Algeria. 2nd Congress Scientific and Engineering. Zarqa University. Jordan. 24-25 November 2010.

HOUMOURA L. (2012). Elaboration des structures neuronales et adaptations d'un modèle conceptuel sur la base des mesures historiques pour le transfert pluie -débit à l'échelle annuelle et mensuelle pour des bassins jaugés de l'Algérie. Mémoire de Magister en Hydraulique. Univ. De Béjaia.

JABLOUN M., SAHLI A. (2008). Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia, *Agricultural Water Management* 95(6), 707–715.

KABOUYA M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.

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.

KWIATKOWSKI D., PHILLIPS P.C.B., SCHMIDT P., SHIN Y. (1992). Testing the null of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *J. Econometrics* 54, 159–178.

KUO J.T., SUN Y.H. (1993). An intervention model for average 10 day streamflow forecast and synthesis. *Journal of Hydrology*, 151 (1993) 35-56

LABORDE J.P., MOUHOUS N. (1998). Hydrolab 98.2. Notice d'utilisation du logiciel Hydrolab. 43 p. Université de Nice-Sophia Antipolis.

LABORDE J.P. (2013). Éléments d'hydrologie de surface, Université de Nice-Sophia Antipolis. Edition 213. 215p.

LESPINAS F. (2008). Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan.

LETTENMAIER D. P., WOOD E. F. (1993). Hydrologic forecasting. In *Handbook of Hydrology*. D. R. Maidment ed., McGraw Hill.

LOUAMRI A. (2013). Le bassin-versant de la Seybouse (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux. Thèse de doctorat en sciences (Géographie et Aménagement du Territoire, option : Hydrologie). Université de Constantine 1. Algérie.

MAKHLOUF Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.

MAKHLOUF Z., MICHEL C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318.

MEBARKI A. (2005). Hydrologie des bassins de l'est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse d'Etat, Université Mentouri de Constantine.

MEBARKI A. (2009). Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est, Office des Publications Universitaires (OPU), Alger, DZ.

MOELETSI, M. E., WALKER S., HAMANDAWANA H. (2013). Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* 66 (2013) 4–15.

MOUELHI S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.

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

MUJUMDAR P.P., KUMAR N.D. (1990). Stochastic Models of Stream Flow: Some Case Studies. *Hydrol. Sci. J.*, **35**, 395–409.

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.

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

UDIN L., PERRIN C., MATHEVET T., ANDREASSIAN V., MICHEL C. (2006). Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. *J. Hydrol.*, 320, 62-83.

PIETER H.A.J.M., VAN G., CONG V. M., WEN W., GHAFAROKI S., MOHAMMAD R., MADELON B. (2008). Data management of extreme marine and coastal hydro-meteorological events, *Journal of Hydraulic Research*, 46:S2, 191-210, DOI: 10.1080/00221686.2008.9521954

PNE. (2010). Etude d'actualisation du plan national de l'eau. EuropeAid /126155/D/SER/DZ. ANRH et UE.

SAID S.E., DICKEY D. (1984). Testing for unit roots in autoregressive moving-average models with unknown order. *Biometrika* 71, 599–607.

SAIDI A. (1990). Bilan des connaissances sur l'apport moyen en Algérie (Analyse bibliographique), *Eau et Développement*, n° 9, pp. 47-56.

STATGRAPHICS® Centurion XVI. (2009). Manuel de l'utilisateur. StatPoint Technologies, Inc. www.STATGRAPHICS.com .Traduction par Christian R. CHARLES. www.STATGRAPHICS.fr

TESFAYE Y. G. (2005). Seasonal Time Series Models and Their Application to the Modeling of River Flows. PHD en Hydrology. Université de Nevada Reno.

TOULMIT A. et T'KOUTI A. (2013). Simulation des apports liquides du barrage Hammam Debagh (W. de Guelma) par les modèles conceptuels. Mémoire de Master en Hydraulique. Univ. de Batna.

ZEKKOUR Z., TOUATI B. (2013). Simulation des apports liquides du barrage Hammam Debagh (W. de Guelma) par l'analyse en composantes principales. Mémoire de Master en Hydraulique. Univ. de Batna. Algérie.