

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Kasdi Merbah- Ouargla

Faculté des Sciences et Sciences Appliquées

Département de Génie civil

Option: constructions hydrauliques et
aménagement



THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Thème

**MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT A DIFFERENTS
PAS DE TEMPS PAR LES MODELES CONCEPTUELS, NEURO-
FLOUS ET PAR LE FILTRE DE KALMAN**

Présenté par

✓ **AMIRECHE Mohamed**

Soutenue le :

Devant le jury:

Président :Pr.ZEDDOURI Aziz (Université d'Ouargla)

Directeur de Thèse : Pr.BERMAD Abdelmalek (ENP Alger)

Co-Directeur de Thèse :Pr.BOUTOUTAOU Djamel (Université de Ouargla)

Examineurs :Pr. BALI Abderrahim (ENP Alger)

Pr.KADRI Mohamed (Université de Boumerdes)

Dr.KATEB Samir (Université d'Ouargla)

Année universitaire : 2018-2019

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

- A ma chère mère.
- A mon cher père.
- A ma femme et mes enfants.
- A mes frères et sœurs.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Allah le tout Puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour effectuer ce travail.

Je tiens à remercier mon Directeur de Thèse Pr. Abdelmalek BERMAD pour le soutien qu'il m'a offert et la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années. Son contact a d'ailleurs été très enrichissant tant au niveau humain qu'au niveau de mon travail. Qu'il trouve ici toutes les expressions de gratitude et de reconnaissance.

Je n'oublierai jamais le soutien et les efforts du Pr. Djamel BOUTOUTAOU, mon Co-Directeur de Thèse, pour m'avoir soutenu et orienté durant l'élaboration de ce travail.

Je remercie Pr. A., ZEDDOURI d'avoir bien accepté de présider ce Jury, ainsi que Pr. A.BALI, Pr. M.KADRI et Dr. S. KATEB d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Je tiens aussi à manifester toute ma gratitude au Pr. MERABTENE Tarek (Sharjah University) qui m'a accueilli dans mon stage et pour ses conseil et sa direction le long de ma formation et le long de ce travail.

Je remercie aussi l'administration de la faculté des Sciences et Sciences appliquées de l'Université d'Ouargla de m'avoir facilité les procédures administratives pour mes inscriptions au cycle de Doctorat.

Merci à tous mes anciens professeurs dont j'ai senti d'avantage leurs sacrifices depuis que moi-même suis devenu enseignant.

ملخص

لطالما كانت نمذجة العلاقة بين الأمطار و منسوب السيول موضوعاً مفضلاً لدى علماء الهيدرولوجيا نظراً لتعقيده وأهميته. في هذه الدراسة ، وضعنا نموذجاً للعلاقة الأمطار بمنسوب السيول على أربعة أحواض مياه جزائرية عند المدى الزمني الشهري واليومي بثلاثة نماذج مختلفة :

- نماذج (الهندسة الريفية) ، نماذج العلب السوداء : الأنظمة العصبية المضطربة ونموذج الخزان المصاحب لمرشح كالمان - العادي والممتد.

- أظهرت النتائج تفوقاً ملحوظاً لنموذج الخزان مقترناً بمرشح كالمان الممتد على بقية النماذج ، كما أظهرت كذلك تكيفه - مع الظروف المناخية شبه الجافة الشائعة في الجزائر

الكلمات الدالة : النمذجة ، الأمطار-منسوب السيول ، نموذج الهندسة الريفية ، الشبكات العصبية المضطربة ، مرشح كالمان ، الحوض المائي .

Résumé :

La modélisation de la relation pluie-débit a toujours constitué un sujet de prédilection pour les hydrologues au vue de sa complexité et de son importance. Dans cette étude, nous avons modélisé la relation pluie-débit sur quatre bassins versants algériens au pas de temps mensuel et journalier avec trois modèles différents :

- Les modèles GR (Génie Rural), les modèles « boîte noire » : Systèmes Neuro-Flous et le Tank Model couplé au Filtre de Kalman Standard et Etendu.

Les résultats obtenus montrent une supériorité remarquable du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu sur le reste des modèles et son adaptation aux conditions climatiques semi-arides très courantes en Algérie.

Mots clés : Modélisation, pluie-débit, GR , Anfis, Filtre de Kalman , bassin versant.

Abstract :

The modeling of the rainfall-runoff relationship has always been a favorite subject for hydrologists in view of its complexity and importance. In this study, we modeled the rainfall-runoff relationship on four Algerian watersheds at the monthly and daily time step with three different models:

- GR models (Genie Rural), black box models: Neuro-Fuzzy systems and the Tank Model coupled to the Standard and Extended Kalman Filter.

- The results show a remarkable superiority of the Tank model coupled to the Kalman Filter Extended on the rest of the models and its adaptation to the existing semi-arid climatic conditions in Algeria.

Key words : Modeling, rainfall-runoff , GR , Anfis, Kalman filter , watershed.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I- ETAT DE L'ART	5
<i>1.1-Introduction :</i>	6
1.1.1-Etude des processus hydrologiques:	6
1.1.2 Les facteurs de génération des débits	7
<i>1.2.La modélisation pluie-débit en hydrologie</i>	8
1.2.1-Définition d'un modèle mathématique	9
1.2.2-Pourquoi des modèles pluie-débit ?	10
1.2.3- Propriétés requises des modèles	12
1.2.4-Des modèles en fonction des caractéristiques hydrologiques des bassins	13
<i>1.3-Classification des modèles hydrologiques :</i>	13
1.3.1-Classification selon le mécanisme	14
1.3.2-Classification selon l'approche mathématique	16
1.3.3-Classification spatiale	16
1.3.4-Classification temporelle	17
<i>1.4-Paramétrisation des modèles :</i>	18
1.4.1-Calage des modèles :	18
1.4.2-Validation des modèles	19
1.4.3-Difficultés	19
<i>1.5-Synthèse bibliographique :</i>	20
1.5.1-Les modèles ' boîte noire ':	20
1.5.2-Les modèles conceptuels (à réservoirs):	22
1.5.3- Les modèles physiquement fondés	25
1.5.4- Nouveaux outils de la modélisation pluie-débit : Apport de la télédétection	26
<i>1.6-Défis de la modélisation :</i>	26
1.6.1-Disponibilité et exactitude des données d'entrée	26
1.6.2- Bassins non jaugés	28
1.6.3- Couplage de modèles	29
<i>1.7-Modélisation pluie-débit : travaux les bassins versants algériens :</i>	29
Chapitre II-Les modèles GR	31
<i>II.1 Les modèles du Génie Rural (GR) :</i>	32
II.1.1 Introduction	32
II.1.2Description du modèle pluie-débit annuel GR1A :	33
II.1.3 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M:	34
II.1.4- Description du modèle pluie-débit journalier GR4J :	37
<i>II.2-Applications des modèles "GR"</i>	42
<i>II.3- Conclusion</i>	43
Chapitre III-Le Tank Model couplé au Filtre de Kalman	44

<i>III.1. Introduction à la modélisation conceptuelle</i>	45
III.1.1.Présentation générale du Tank Model	45
III.1.2.Calibration du Tank Model	48
<i>III.2-Formulation mathématique du Tank Model(TK):</i>	52
<i>III.3-Applications des modèles conceptuels</i>	53
<i>III.4-Applications du Tank Model :</i>	54
<i>III.5-Introduction du Filtre de Kalman :</i>	55
<i>III.6-Présentation du Filtre de Kalman</i>	56
<i>III.7-Fonctionnement du Filtre de Kalman</i>	58
III.7.1.Modèle de Système	58
III.7.2.Modèle de Mesure	59
III.7.3.Procédure de Filtre de Kalman Standard	59
III.7.4.Etapes du Filtre de Kalman	60
<i>III.8-Formulation du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Standard</i>	61
III.8.1.Modèle de Système	61
III.8.2.Modèle de Mesure	62
III.8.3.Algorithme récursif du couplage	62
<i>III.9-Filtre de Kalman Étendu (Extended) pour les systèmes non linéaires</i>	64
<i>III-10-Formulation mathématique du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu :</i>	65
<i>III.11. Approches Updating et Not updating :</i>	68
<i>III.12. Les application du Filtre de Kalman</i>	68
III.12.1 Dans les divers domaines	68
III.12.2 En hydrologie	69
<i>III.13-Conclusion</i>	70
Chapitre IV-Les systèmes Neuro-Flous	71
<i>IV.1-Introduction</i>	72
<i>IV.2-Systèmes Neuro-Flous</i>	72
IV.2.1.Les sous-ensembles flous	73
IV.2.2.Les fonctions d'appartenance	74
IV.2.3.Variables linguistiques	74
IV.2.4.Les opérateurs flous	75
IV.2.5.La fuzzyfication	75
IV.2.6.L'inférence floue	76
IV.2.7.La Défuzzyfication	76
IV.2.8.Fonctionnement des réseaux neuro-flous (VASILE, 2008):	77
IV.2.9.Les architectures neuro-flous (VASILE, 2008)	77
IV.2.10.Présentation de l'architecture ANFIS et son fonctionnement	79
<i>IV.3-Formulation adoptée :</i>	81
<i>IV.4-Conclusion</i>	81
Chapitre V-Présentation de la zone d'étude	82
<i>V.1-Introduction:</i>	83

<i>V.2-Les bassins versants en Algérie :</i>	83
<i>V.3-Présentation du bassin versant des Isser :</i>	84
<i>V.3.1Description du bassin versant :</i>	84
V.3.1.1.Climat	84
V.3.1.2.Caractéristiques géomorphologique du bassin versant	84
<i>V.3.2.Données utilisées</i>	85
V.3.2.1.Données hydrométriques	85
V.3.2.2.Données pluviométriques	85
<i>V.4-Présentation du Bassin de Zardezas :</i>	87
<i>V.5-Présentation du bassin versant de La Cheffia :</i>	88
<i>V.6-Bassin de Bouchegouf</i>	89
<i>V.7-Synthèse des caractéristiques morphologiques des bassins étudiés :</i>	92
<i>V.8- Données hydro-climatiques et hydrométrique des bassins étudiés:</i>	93
<i>V.9-CONCLUSION:</i>	94
Chapitre VI-Résultats et discussions	95
<i>VI.1-Méthodologie et Critères de validité :</i>	96
VI.1.1 - Calage des modèles	96
VI.1.1.1 - Le calage manuel	96
VI.1.1.2 - Le calage automatique	96
VI.1.2 - Validation des modèles	97
VI.1.3 - Exploitation des modèles	97
VI.1.4 - Variables des modèles	97
VI.1.5 - Critères d'évaluation et d'efficacité des modèles	98
VI.1.6 - Evaluation graphique	98
VI.1.7 - Evaluation statistique	98
VI.1.8 - Les régressions standard	98
VI.1.9 - Les critères adimensionnels	99
VI.1.10 - Critère du bilan (Perrin 2000) :	100
VI.1.11 - Les indices d'erreurs :	100
VI.1.12 - Intervalles d'efficacité des modèles	102
<i>VI.2- Résultats des GR :</i>	103
VI.2.1- Le modèle journalier GR4J :	103
VI.2.1.1- Calibration :	103
VI.2.1.2-Paramètres da calibration :	103
VI.2.1.3-Tableau récapitulatif :	103
VI.2.1.4- Illustration graphique :	103
VI.2.1.5 Commentaires sur les résultats des GR4J :	105
VI.2.2- Le modèle mensuel GR2M :	106
VI.2.2.1- Calibration :	106
VI.2.2.2- Paramètres da calibration :	106
VI.2.2.3-Tableau récapitulatif :	106
VI.2.2.4- Illustration graphique :	107
VI.2.2.5 Commentaires sur les résultats des GR2M :	109
<i>VI.3- Résultats du Tank Model simple:</i>	109

VI.3.1 Pas de temps journalier :	109
VI.3.1.1- Paramètres du TankModel :	109
VI.3.1.2 -Résultats du TankModel :	110
VI.3.1.3-Illustration graphique :	110
VI.3.1.4 Commentaires sur les résultats du Tank Model simple (journalier) :	112
VI.3.2 Pas de temps mensuel :	112
VI.3.2.1- Paramètres du TankModel :	112
VI.3.2.2 -Résultats du TankModel :	113
VI.3.2.3-Illustration graphique :	114
VI.3.2.4 Commentaires sur les résultats du Tank Model simple (Mensuel) :	116
<i>VI.4- Résultats du Tank Model utilisant le Filtre de KalmanStandard:</i>	<i>116</i>
VI.4.1 Pas de temps journalier :	116
VI.4.1.1- Paramètres du TankModel :	116
VI.4.1.2- Paramètres du filtre :	116
VI.4.1.3-Résultats :	116
VI.4.1.4.Illustration graphique :	117
VI.4.1.5 Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Standard (Pas de temps journalier) :	120
VI.4.2 Pas de temps mensuel :	120
VI.4.2.1- Paramètres du TankModel :	120
VI.4.2.2- Paramètres du filtre	120
VI.4.2.3-Résultats :	121
VI.4.2.4-Illustration graphique	122
VI.4.2.5 Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Standard (Pas de temps mensuel) :	124
<i>VI.5- Résultats du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu</i>	<i>124</i>
VI.5.1-L'approche Updating :	124
VI.5.1.1 -Pas de temps journalier :	124
VI.5.1.2 -Pas de temps mensuel-Updating:	128
VI.5.2- La formulation 'Not Updating' :	131
VI.5.2.1 -Pas de temps journalier :	131
VI.5.2.2-Pas de temps mensuel (Not Updating):	135
<i>VI.6- Résultats de la modélisation par système Neuro-Flou :</i>	<i>138</i>
VI.6.1- Le modèle Neuro-Flou au pas de temps mensuel :	138
VI.6.1.1- Tableaux récapitulatifs des résultats	139
VI.6.1.2- Illustrations graphiques :	140
VI.6.1.3 Commentaires sur les résultats du Neuro flou (Pas de temps mensuel) :	143
VI.6.2- Le modèle à pas de temps journalier :	143
VI.6.2.1 Tableaux récapitulatifs des résultats	143
VI.6.2.2 Illustration graphique :	144
VI.6.2.3 Commentaires sur les résultats du Neuro flou (Pas de temps journalier):	150
<i>VI.7- Discussion générale et résultats :</i>	<i>150</i>
VI.7.1- Selon les fonctions «objectifs» :	150
VI.7.1.1.Pas de temps journalier :	150
VI.7.1.2.Pas de temps mensuel :	152
VI.7.2- Le TankModel de Sugawara adopté pour le cas algérien :	153
VI.7.3- Temps de calcul	154
VI.7.4- Taille de l'échantillon :	154
<i>VI.8. CONCLUSION :</i>	<i>154</i>

CONCLUSION GENERALE

156

BIBLIOGRAPHIE

159

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: Valeurs des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants	37
Tableau II.2: Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants	42
Tableau IV.1: Avantages et inconvénients des RNA et de la logique floue	73
Tableau IV-2: Opérateurs logiques floues les plus utilisés	75
Tableau V.1: Caractéristiques du BV de l'Isser, Station hydrométrique Lakhdaria (ANRH)	85
Tableau V.2- Caractéristiques de Bassin versant Cheffia(ANRH)	88
Tableau V-3 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant d'Oued Mellah à la Station de Bouchegouf d'après (A.N.R.H), (Mebarki ,2005)	92
Tableau V.4 - Synthèse des caractéristiques pour les bassins étudiés	92
Tableau V.5- Stations hydrométriques étudiées.	93
Tableau V.6-Périodes d'observations utilisées dans cette étude	93
Tableau VI.1 : Intervalles d'appréciation des critères d'évaluation	102
Tableau VI.2: Paramètres de calibration du modèle GR4J	103
Tableau VI.3: Valeurs des critères d'évaluation du modèle GR4J	103
Tableau VI.4: Paramètres de calibration du modèle GR2M	106
Tableau VI.5: Valeurs des critères d'évaluation du modèle GR2M	106
Tableau VI.6: Paramètres du TankModel pour les bassins versants	109
Tableau VI.7: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model (Calage)	110
Tableau VI.8: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model(Validation)	110
Tableau VI.9 : Paramètres du TankModel pour les bassins versants	113
Tableau VI.10: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model(phase de calage)	113
Tableau VI.11: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model (phase de validation)	113
Tableau VI.12: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Calage)	117
Tableau VI.13: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Validation)	117
Tableau VI.14: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Calage)	121

TableauVI.15: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Validation)	121
Tableau VI.16: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Calage)	125
Tableau VI.17: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Validation)	125
Tableau VI.18: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Calage)	129
Tableau VI.19: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Validation)	129
Tableau VI.20: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Calage)	132
Tableau VI.21: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Validation)	132
Tableau VI.22: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK-FK Etendu (Calage)	135
TableauVI.23: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_ FK étendu (validation)	136
Tableau VI.24: Tableau récapitulatif des résultats -Période de Calage Mensuel	139
Tableau VI.25: Tableau récapitulatif des résultats -Période de Validation Mensuel	139
Tableau VI.26 : Tableau récapitulatif des résultats -Période de Calage Journalier	143
Tableau VI.27 : Tableau récapitulatif des résultats -Période de Validation Journalier	143
Tableau VI.28: Récapitulatif des résultats moyens du GR4Jsur les BV étudiés	150
Tableau VI.29: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Standardsur les BV étudiés	151
Tableau VI.30: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendusur les BV étudiés	151
Tableau VI.31: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendusur les BV étudiés	151
TableauVI.32: Récapitulatif des résultats moyens du Neuro-flouesur les BV étudiés	151
Tableau VI.33: Récapitulatif des résultats moyens du GR2M sur les BV étudiés	152
TableauVI.34: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Standardsur les BV étudiés	152
TableauVI.35: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendusur les BV étudiés	152
TableauVI.36: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendusur les BV étudiés	153
TableauVI.37: Récapitulatif des résultats moyens du Neuro-flouesur les BV étudiés	153

LISTE DES FIGURES

Figure (I .1)- Représentation simplifiée d'un modèle pluie-débit.	10
Figure (I.2)- Relation entre les modèles Pluie – Débit selon Berthier (2008)	14
Figure (II.1) : Schéma de la structure du modèle GR2M	35
Figure (II.2): Structure du modèle GR4J	38
Figure (III.1) : Représentation générale du Tank Model simple	46
Figure (III.2) : Schéma représentant les types d'écoulement dans le modèle à réservoirs selon Setiawan et al. en 2013	46
Figure (III-3) : Différents cas du Tank Model(Sugawara, 1979)	47
Figure (III.4) : Le Tank Model pour l'étude des crues (Sugawara, 1979)	48
Figure (III.5) : Tank Model initial	49
Figure (III.6) : Structure du Tank Model	51
Figure (III.7) : Etapes du Filtre de Kalman (NDJENG N,2009)	61
Figure (III.8) : Organigramme du Couplage Tank Model - FK standard	63
Figure (IV.1): Différents types de fonctions d'appartenance	74
Figure (IV.3)-:Architecture de l'ANFIS (JANG et al., 1997)	79
Figure(IV.4): Les trois types de partitionnement de l'espace d'entrée (VASILE, 2008)	81
Figure(V.2): Carte des situations des stations hydro-climatologique du bassin versant de l'Isser	86
Figure (V.3) - Situation du bassin versant de Zardezas	87
Figure(V.4)- Situation du bassin versant du Cheffia	89
Figure (V.5) : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Seybouse	90
Figure(V.6) : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Bouchegouf (ABHCS-M, 2013).	91
Figure (VI.1) : Calibration Cheffia GR4J	104
Figure (VI.2) : Calibration CheffiaGR4J	104
Figure (VI.3) : Validation CheffiaGR4J	105
Figure (VI.4) : ValidationCheffia GR4J	105

Figure (VI.5) : Calibration GR2M - Zardezas	107
Figure (VI.7) : Validation GR2M Zardezas	108
Figure (VI.8) : Validation GR2M Zardezas	108
Figure (VI.9) : Calibration du bassin des Isser (TK Model simple- journalier)	110
Figure (VI.10) : Validation du bassin des Isser (TK Model simple-journalier)	111
Figure(VI.11) : Calibration du bassin de Zardezas (TK Model simple-journalier)	111
Figure (VI.12) : Validation du bassin de Zardezas (TK Model simple-journalier)	112
Figure (VI.13) : Calibration du bassin de Cheffia (TK Model simple-mensuel)	114
Figure (VI.14) : Validation du bassin de Cheffia (TK Model simple-mensuel)	114
Figure (VI.15) : Calibration du bassin de Bouchegouf (TK Model simple-mensuel)	115
Figure (VI.16) : Validation du bassin de Bouchegouf (TK Model simple-mensuel)	115
Figure (VI.17) : Calibration du bassin de Bouchegouf	118
Figure (VI.18) : Validation du bassin de Bouchegouf	118
Figure (VI.19) : Calibration du bassin de Zardezas	119
Figure (VI.20) : Validation du bassin de Zardezas	119
Figure (VI.21) : Calibration du bassin de Bouchegouf	122
Figure (VI.22) : Validation du bassin de Bouchegouf	122
Figure (VI.23) : Calibration du bassin de Zardezas	123
Figure (VI.24) : Validation du bassin de Zardezas	123
Figure (VI.25) : Calibration du bassin de Bouchegouf	126
Figure(VI.26) : Validation du bassin de Bouchegouf	126
Figure (VI.27) : Calibration du bassin de Zardezas	127
Figure (VI.28) : Validation du bassin de Zardezas	127
Figure (VI.29) : Calibration du bassin de Bouchegouf	129
Figure (VI.30) : Validation du bassin de Bouchegouf	130
Figure (VI.31) : Calibration du bassin de Zardezas	130
Figure (VI.32) : Validation du bassin de Zardezas	131

Figure (VI.33) : Calibration du bassin de Bouchegouf	133
Figure (VI.34) : Validation du bassin de Bouchegouf	133
Figure (VI.35) : Calibration du bassin de Zardezas	134
Figure (VI.36) : Validation du bassin de Zardezas	134
Figure (VI.37) : Calibration du bassin de Bouchegouf	136
Figure (VI.38) : Validation du bassin de Bouchegouf	137
Figure (VI.39) : Calibration du bassin de Zardezas	137
Figure (VI.40) : Validation du bassin de Zardezas	138
Figure (VI.41) : Calibration Cheffia -64 règles floues-Pas de temps mensuel	140
Figure (VI.42) : Validation Cheffia -64 règles floues-Pas de temps mensuel	140
Figure (VI.43) : Calibration Bouchegouf -25 règles floues-Pas de temps mensuel	141
Figure (VI.44) : Validation Bouchegouf -25 règles floues-Pas de temps mensuel	141
Figure (VI.45) : Calibration Bouchegouf -64 règles floues-Pas de temps mensuel	142
Figure (VI.46) : Validation Bouchegouf -64 règles floues-Pas de temps mensuel	142
Figure (VI.47) : Calibration Isser - 25 règles floues-Pas de temps journalier	144
Figure (VI.48) : Validation Isser -25 règles floues-Pas de temps journalier	144
Figure(VI.49) : Calibration Isser -121 règles floues-Pas de temps journalier	145
Figure (VI.50) : Validation Isser -121 règles floues-Pas de temps journalier	145
Figure (VI.51) : Calibration Zardezas -25 règles floues-Pas de temps journalier	146
Figure (VI.52) : Validation Zardezas -25 règles floues-Pas de temps journalier	146
Figure (VI.53) : Calibration Zardezas -121 règles floues-Pas de temps journalier	147
Figure (VI.54) : Validation Zardezas -121 règles floues-Pas de temps journalier	147
Figure (VI.55) : Calibration Bouchegouf -25 règles floues-Pas de temps journalier	148
Figure (VI.56) : Validation Bouchegouf -25 règles floues-Pas de temps journalier	148
Figure (VI.57) : Calibration Bouchegouf -121 règles floues-Pas de temps journalier	149
Figure (VI.58) : Validation Bouchegouf -121 règles floues-Pas de temps journalier	149
Figure (VI.59) : Structure adoptée pour le TankModel en Algérie	154

LISTE DES ABREVIATIONS

TK : Tank Model

FK : Filtre de Kalman

TK_FK : Tank model couplé au filtre de Kalman

GR : Génie Rural

GR1A : Génie Rural à pas de temps Annuel

GR2M : Génie Rural à pas de temps Mensuel à 2 paramètres

GR3J : Génie Rural à pas de temps Journalier à 3 paramètres

GR4J : Génie Rural à pas de temps Journalier à 4 paramètres

GR3H : Génie Rural à pas de temps Horaire à 3 paramètres

BV : Bassin Versant

RN : Réseaux de Neurones

SIF : Système d'Inférence Floue

RNF : Réseaux Neuro Flous

NF : Neuro Flou

ANFIS : Adaptative Network based Fuzzy Inference System.

LISTE DES SYMBOLES

Symboles utilisés dans les GR :

- Q_k : Débit simulé de l'étape k
- P_k : Pluie observée à l'étape k
- P_{k-1} : Pluie observée à l'étape k-1
- E_k : Evapotranspiration potentielle à l'étape k
- X : Paramètre à optimiser (modèle GR1A)
- X_1 , Capacité du réservoir de production (mm)
- X_2 , Coefficient d'échanges souterrains (mm)
- P : Pluie tombée en (mm). (Modèles GR)
- P_s : Partie de la pluie P reçu par le réservoir de production (mm)
- P_1 : Pluie en excès (mm)
- S_k : Contenu du réservoir de production à l'étape k
- S' : Contenu du réservoir de production actualisé (mm)
- E : Evapotranspiration potentielle (mm)
- E_s : Quantité de l'évapotranspiration prélevée du réservoir de production (mm)
- S'' : Contenu du réservoir après restitution de l'ETP
- P_2 : Percolation sortie à partir du réservoir de production et qui va rejoindre le réservoir routage (mm)
- S_{k+1} : Niveau dans le réservoir de production après départ de la percolation
- P_3 : Quantité d'eau entrant dans le réservoir de routage (mm)
- R_k : Niveau initial dans le réservoir de routage
- R' : Niveau dans le réservoir de routage après réception de P_3
- F : Fonction d'échange avec l'extérieur

- X_2 : Paramètre positif et adimensionnel reflétant l'échange avec l'extérieur
- R'' : Niveau dans le réservoir de routage après échange
- R_{k+1} : Contenu du réservoir actualisé
- X_3 : Capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- X_4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)
- P_n : Pluie nette (mm)
- E_n : Evaporation nette (mm)
- $Perc$: Percolation issue du réservoir de production(mm)
- P_r : Quantité d'eau qui atteint finalement la partie routage du modèle en (mm)
- $SH1$: Ordonnées de l'hydrogramme HU1,calculées à partir des courbes en S
- $SH2$: Ordonnées de l'hydrogramme HU2,calculées à partir des courbes en S
- t : Temps de ruissellement
- $Q_9(k)$: Première valeur de sortie de l'hydrogramme à l'étape k
- $Q_1(k)$: Deuxième valeur de sortie de l'hydrogramme à l'étape k
- Q_r : Débit de vidange du réservoir se routage en (mm)
- Q_d : Débit récupéré directement du ruissellement en (mm)

Symboles utilisés dans Tank Model :

- A_1, A_2, B_1, C_1, D_1 : Coefficients de débits des sections des ouvertures latérales du Tank de Sugawara
- A_0, B_0, C_0 : Coefficients de débits des sections des ouvertures de fond du Tank de Sugawara
- Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 : Débits latéraux sortants du Tank de Sugawara
- Y : Débit total sortant du Tank de Sugawara
- r : Taux descendant par jour
- k : Coefficient d'ajustement des coefficients de débits des sections dans le Tank de Sugawara
- k_1, k_2, k_3 : Coefficient d'ajustement des coefficients de la position des fonds

- A_0', B_0', C_0' : Coefficients de débits sections de fonds du Tank de Sugawara après ajustement
 - H_1, H_2, H_3, H_4 : Charges de l'eau dans les réservoirs du Tank model
 - Q_{ij} : Composante de ruissellement représentée par le débit sortant de l'orifice latéral j du réservoir i [L/T] dans le Tank model
 - A_{ij} : Coefficient de débit de l'orifice latéral j du réservoir i [L/T] dans le Tank model.
 - C_{ij} : Position en hauteur de l'orifice latéral j du réservoir i [L] dans le Tank model
 - B_i : Coefficient d'infiltration de l'orifice du réservoir i du Tank model [L/T]
 - I_i : Infiltration à partir du réservoir i vers le réservoir $i+1$ [L/T]
 - $Q_T(t)$: Débit total représentant le ruissellement total
 - $w(t)$: Bruit blanc accompagnant une observation
 - $Rain(t)$: Pluie tombée (Rainfall) en (mm)
 - $Evt(t)$: Evapotranspiration en (mm)
 - $u(t)$: Vecteur bruit blanc du système
- Symboles utilisés dans le Filtre de Kalman :
- $X(k)$: Vecteur d'état au temps k .
 - $\Phi(k|k-1)$: Matrice de transition d'état au temps $k-1$ à k de dimension $(n \times n)$
 - $X(k-1)$: Vecteur d'état au temps $k-1$
 - $\Gamma(k|k-1)$: Matrice de transition de bruit de système au temps $k-1$ à k de dimension $(n \times n)$ par lequel le bruit précédent (erreur) transite vers le bruit actuel
 - $w(k)$: Vecteur de bruit blanc Gaussien de système au temps k
 - $w(k-1)$: Vecteur de bruit blanc Gaussien de système au temps $k-1$
 - $Z(k)$: Vecteur de mesure (ou observation) au temps k
 - $H(k)$: Matrice de transition de mesure au temps k de dimension $(1 \times n)$
 - $v(k)$: Vecteur de bruit blanc Gaussien de mesure au temps k
 - $M(k)$: Covariance de bruit de processus
 - $R(k)$: Covariance de bruit de mesure

- $X(k-1|k-1)$: Estimation de l'état à l'étape k-1
- $P(k-1|k-1)$: Covariance estimant l'erreur d'état au temps k-1
- $\bar{X}(k|k-1)$: Valeur de la prédiction de l'état au temps k
- $\bar{P}(k|k-1)$: Prédiction de la covariance au temps k
- $K(k)$: Gain de Kalman
- $X(k|k)$: Valeur d'état mise à jour après correction au temps k
- h, f : Fonctions non linéaires de l'équation du filtre de Kalman étendu
- $\bar{Y}(k)$: Innovation (bruit de mesure)
- $S(k)$: Covariance de l'innovation
- h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 : Hauteurs d'eau à la sortie de chaque réservoir
- $\alpha(k)$: Vecteur constant connu dans l'équation du système
- $\beta(k)$: Vecteur constant connu dans l'équation de l'observation
- $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{17}]$: Vecteur d'état X
- $F(X)$: Fonction du vecteur état du système X
- $[f_1, f_2, \dots, f_{17}]$: Composantes vectorielle de la fonction $F(X)$
- X^* : Abscisse d'un point vecteur d'état
- J : Matrice jacobienne de la fonction vectorielle $F(X)$
- $B(X^*)$: Composante définie pour linéariser $F(X)$ - -
- $[u_1, u_2, \dots, u_{17}]$: composante du vecteur erreur u
- $\delta(x)$: Fonction de la dérivée
- $U(x), U_\varepsilon(x)$: Fonction unité utilisé dans le modèle du débit sortant du Tank model.
- ε : constante ayant une valeur qui tend vers 0.
- γ : Coefficient de puissance entre le débit et la charge dans le réservoir ($\gamma=1$), si l'approximation est linéaire
- Δt : Pas de temps
- I_u : Matrice identité

- $p(w(k))$, $p(v(k))$: Loi de distribution des erreurs
- $N(0, M(k))$, $N(0, R(k))$: Lois de probabilités normales des erreurs ou bruit blanc
- SDW: Ecart type du bruit d'observation
- SNPER : Pourcentage du bruit du système

Symboles utilisés dans les systèmes Neuro-Flous :

- A : Ensemble flou
- U : Univers de discours
- x : Elément x de l'univers de discours U
- $\mu_A(x)$: Indique le niveau d'appartenance de x à A
- Tx : Ensemble composé de sous-ensembles flous de U
- Ai : Sous-ensembles flous de U
- X, Y : Variables Floues
- k : Nombre d'entrées
- m: Nombre de fonctions d'appartenance
- M : Nombre de règles maximum flous

Symboles utilisés dans les fonctions de validation:

- Q_o : Valeurs des débits observés
- Q_s : Valeurs des débits simulés
- $Q_o.moy$: Valeur moyenne des débits observés
- $Q_s.moy$: Valeur moyenne des débits simulés
- R^2 : Coefficient de détermination
- b : Pente de la droite de régression
- a : Ordonnée à l'origine de la droite de régression
- NSE : Nash SUTCLIEFFE
- D: Indice d'agrément ou de satisfaction (index of agreement)
- E : Critère relatif d'erreur absolue
- $NSEm$: Nash SUTCLIEFFE modifié

- *MAE* : Erreur moyenne absolue (Mean absolute error)
- *MSE* : Erreur quadratique moyenne (Mean square error)
- *RMSE* : Racine de l'erreur quadratique moyenne (Root mean square error)
- *RSR* : Observations standard déviation ratio (rapport de l'écart type et le RMSE)
- *PBIAS* : Percent Bias
- Bilan ou B : Le bilan

INTRODUCTION GENERALE

De par sa rareté, l'eau en Algérie, comme dans la plupart des pays du monde, est un facteur limitant du développement et source de tensions sociales. La rareté est appréhendée en termes de stress hydrique et d'irrégularité de la ressource, deux facteurs susceptibles de s'accroître avec le changement climatique. Face au défi d'assurer la couverture des besoins sans cesse croissants en eau (villes, industries, agriculture), de nouveaux instruments de gestion sont nécessaires. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision qui permettront de mieux cerner le fonctionnement des hydro-systèmes naturels et le devenir de l'eau dans son environnement.

Cependant on ne peut bien gérer une ressource que quand elle est connue. Malheureusement, les dernières décennies ont vu une réduction considérable des capacités nationales du pays d'assurer le suivi hydrologique des cours d'eau et de produire une information de qualité adaptée aux besoins des utilisateurs. Ainsi la connaissance de la ressource en eau et de ses variations saisonnières au niveau d'un bassin versant, présente des faiblesses à cause des séries de données hydrologiques tronquées ou manquantes. Les chroniques de débit sont souvent lacunaires, discontinues, de courtes durées et en conséquence, sont difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable.

Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels (à l'image des bassins versants), ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques.

La transformation des pluies en débits à l'exutoire d'un bassin, représente le processus le plus complexe à modéliser.

On entend par modèles pluie-débit, l'ensemble des équations représentant le bilan hydrique, et les équations de transfert des flux hydriques, mis en jeu au cours du cycle hydrologique à l'échelle d'un bassin versant. Ce sont des modèles prédictifs des écoulements dans les cours d'eau, mais aussi des autres échanges sol-atmosphère, comme l'évapotranspiration, l'infiltration et la percolation. Ces modèles apparaissent essentiels dans l'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eaux, et en particulier l'analyse du risque hydrologique et la prévision des crues. D'autre part, ces modèles permettent de simuler l'impact du changement climatique sur les composantes du cycle hydrologique.

Toutefois, la performance des modèles pluie-débit dans la simulation des débits des cours d'eau et des autres flux du cycle hydrologique dépend du choix du modèle et certainement aussi de la qualité de l'estimation de leurs paramètres.

Deux types de modèles sont couramment utilisés pour conceptualiser cette relation pluie – débit : les modèles conceptuels et les modèles "boîtes noires". Les modèles

conceptuels (modèles à réservoirs et empiriques) ont longtemps été une référence opérationnelle pour les hydrologues pour transformer la pluie en débit, par le fait que ces modèles incorporent des hypothèses sur les mécanismes qui gouvernent le cycle hydrologique. Depuis le modèle de Stanford (Crawford & Linsley, 1966, Roche, 1971) à six réservoirs, plusieurs modèles sont apparus (CREC, Sim, Knapp, TOPMODEL, Amande) avec l'introduction d'un hydrogramme unitaire (modèle GR3j), simulant le transfert de la pluie nette en débit de ruissellement. Les modèles "boîtes noires" tentent de représenter la relation pluie – débit par une formulation mathématique, de type Auto-Régressif (modèle ARMAX Auto-Regressive Moving Average with eXogenous input). Ils n'ont pas abouti aux objectifs des hydrologues, sur les bassins versants de petite taille, à cause de la linéarité de la relation pluie – débit qu'ils présupposent.

Ces dernières années, avec l'apparition des algorithmes d'apprentissage par adaptation des poids et face à la non-linéarité de la relation pluie – débit, les recherches se sont approfondies vers de nouvelles approches non déterministes, comme l'illustrent les Réseaux de Neurones Artificiels. Ils ont ouvert la voie à une catégorie de modèles Pluie – Débit basée sur l'Intelligence Artificielle (French et al, 1992; Minns & Hall, 1996). La logique floue qui représente un langage naturel issu de la théorie des ensembles, a été l'objet de plusieurs travaux de recherches dans de nombreux domaines, par exemple, scientifique (Bardossy & Duckstein, 1995), industriel pour une commande de métro au Japon (Yasunobu & Myamoto, 1985, Hartani, 1995) et aérospatial pour l'atterrissage d'une navette spatiale (Berenji et al, 1995). Le principal avantage de la logique floue est la prise en compte des imprécisions sur les paramètres intervenant dans un processus physique naturel. Etant donné la complexité de la relation pluie – débit, le test d'un modèle flou nous paraît indispensable pour affronter les difficultés auxquelles se heurte le modélisateur en hydrologie.

En Algérie, les périodes de sécheresse qui ont sévi ces dernières années ont fait diminuer les réserves en eau, et l'introduction de méthodes d'optimisation de ces ressources s'est révélée utile et indispensable. Cela passe par la maîtrise de la modélisation de la relation pluie – débit. Mais la plupart des modèles pluie – débit existants sont conçus dans des pays généralement à climat humide, et compte tenu des différences hydro climatiques entre ces pays et l'Algérie, la transposition de ce type de modèles à un bassin versant algérien à climat semi-aride constitue pour nous la première difficulté.

Le travail de cette thèse a trait à la modélisation de la transformation de la pluie en débit, et de sa représentation à l'échelle du bassin versant, pour une meilleure gestion des ressources en eau. Celles-ci étant limitées, parfois même rares, l'équilibre entre les besoins et les ressources en eau est aujourd'hui fragilisé.

L'objectif principal est d'améliorer le fonctionnement d'un modèle de simulation des débits, au travers d'une approche comparative pour apprécier les forces et les faiblesses de différentes représentations mathématiques existantes de la transformation pluie-débit.

En effet, une nouvelle procédure de prévision, et de simulation basée d'une part, sur la force du Filtre de Kalman, et d'autre part du 'Tank Model' utilisé dans les pays Asiatiques

comme le Japon, la Corée du Sud, le Singapour ...etc, est proposée dans le but de modéliser la relation Pluie – Débit.

Le Filtre de Kalman reste dans tous les cas un algorithme mathématique et statistique qui doit être appliqué uniquement sur un modèle déjà élaboré.

L'utilisation du Filtre de Kalman dans la thèse est inspirée de la force de ce Filtre à résoudre de nombreux problèmes dans d'autres disciplines. En effet, La gestion des crues nécessite des prévisions en temps réel des débits des bassins versants. En 1960, R.E. Kalman a publié un article intitulé "A new Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". Ses recherches le mènent à y décrire un processus qui sera connu comme le Filtre de Kalman.

L'avantage de ce Filtre est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs (observations), mais aussi du modèle lui-même.

Pour appliquer un Filtre de Kalman, il faut avant tout modéliser le système pour lequel on veut estimer les paramètres, de manière linéaire (dans le Filtre Standard) et non linéaire (dans le Filtre Etendu ou Extended).

La force du Filtre de Kalman est d'intégrer un terme d'imprécision sur le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation (pour peu que les erreurs restent raisonnables). Donc, l'utilisation de ce Filtre est venue pour résoudre le problème de l'existence des erreurs dans les mesures pluviométriques et hydrométriques d'une part, et l'inexistence de modèles algériens adapté à la réalité climatique du pays, d'autre part.

Dans l'introduction générale, après avoir décrit l'importance de l'eau et précisé la place qu'occupe la modélisation pluie-débit au sein des sciences hydrologiques, on a clairement défini l'objectif de ce travail de recherche, et mis en exergue la problématique du thème étudié et la démarche à suivre pour rechercher les meilleurs modèles tenant compte du climat spécifique de la région étudiée.

Le manuscrit présenté est composé de six chapitres:

Un exposé de l'état d'avancement des travaux dans le domaine de la modélisation pluie-débit a été effectué au premier chapitre. Les trois chapitres suivants ont été consacrés à l'exposé des parties théoriques des modèles utilisés : GR, Systèmes Neuro-Flous et le Tank Model ainsi que la théorie du Filtre de Kalman.

Le cinquième chapitre a été consacré à la présentation des bassins versants étudiés et enfin, dans le dernier chapitre, les résultats trouvés pour chaque modèle avec une large discussion sur les résultats et une comparaison entre les trois modèles selon différents critères, ont été exposés.

La conclusion générale synthétise les principaux apports de la thèse : En effet, à la fin de ce travail, on a effectué une comparaison entre les résultats des différents modèles étudiés (GR, ANFIS, et couplage du Filtre de Kalman au Tank Model) appliqués à différents bassins

versants Algériens représentant différents climats (Isser, Zardezas, Bouchegouf et Cheffia), aux pas de temps Mensuel et Journalier, et recherché le meilleur modèle à retenir pour une zone semi-aride telle que l'Algérie.

Chapitre I- ETAT DE L'ART

I.1-Introduction :

I.1.1-Etude des processus hydrologiques:

L'eau qui intervient dans l'ensemble du fonctionnement du milieu naturel, représente un vecteur principal d'éléments transportés (en solution ou en suspension), et un milieu de vie pour de nombreux végétaux et animaux, est devenue un enjeu écologique et économique considérable.

La demande socio-économique sur la connaissance de la ressource en eau, sur l'influence des aménagements et de l'occupation des sols sur le régime et la qualité des eaux, sur l'effet des pratiques agricoles, sur le devenir des rejets ponctuels ainsi que sur la prévention des risques hydrométéorologiques, implique de comprendre les variabilités spatiales et temporelles des apports et des écoulements, et leurs couplages avec les mécanismes météorologiques,

climatologiques et géochimiques. C'est à ce propos, que l'importance de la tâche des hydrologues dans la résolution des questions environnementales actuelles et futures est considérée de plus en plus reconnue.

Le fonctionnement hydrologique des bassins versants reste encore assez mal connu, même si les études de terrain menées depuis une cinquantaine d'années sur de petits bassins de recherche ont permis d'apporter des réponses partielles à deux des questions fondamentales qui se posent à l'hydrologue (Ambroise, 1991) :

- Que devient l'eau de pluie ? (Penman, 1963);
- D'où provient l'eau des ruisseaux ? (Hewlett, 1961).
- Dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, il y a saturation de la couche supérieure du sol, l'eau en excès est évacuée rapidement par ruissellement en surface pour former l'écoulement rapide de crue.
- L'autre partie s'infiltré et contribue par un écoulement beaucoup plus lent à travers le sol et les formations superficielles à la recharge des nappes et au débit de base.

Cette théorie nous permet de distinguer quatre cheminements de l'eau des rivières :

- Précipitations directes à la surface libre des cours d'eau ;
- Ecoulement de surface, ou ruissellement de surface qui se décompose en ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (écoulement hortonien) et ruissellement par saturation du sol ;
- Ecoulement de subsurface, c'est un écoulement dû à un cheminement quasi-horizontal de l'eau dans les macropores du sol ;
- Ecoulement souterrain.

Par sa simplicité et son réalisme, cette théorie a connu un énorme succès en ingénierie hydrologique.

Cependant des études de terrain, notamment en milieu tempéré, ont montré que cette représentation correspondait en fait à un cas particulier extrême, puisque par exemple des crues sont fréquemment observées pour des intensités de pluies bien inférieures à l'infiltrabilité des sols (Ambroise, 1991). D'autre part, ce type de ruissellement est loin d'être généralisé à tout bassin versant, et il n'est actif que sur une partie limitée de ce bassin.

Une part de ruissellement de crue peut provenir essentiellement de l'écoulement hypodermique dans les sols, et aussi par une recharge des nappes peu profondes en aval.

Une des critiques qui a remis en cause cette théorie, concerne une part de ruissellement des crues provenant des écoulements par une recharge rapide des nappes. Cette conception d'une contribution souterraine, évoquée par certains auteurs (Hirsch, 1936), a mis beaucoup de temps à s'imposer. Les mécanismes permettant d'expliquer la rapidité des transferts des flux à travers le sol, et l'exfiltration de leur part, ont été difficiles à identifier.

Selon Hursh et Brater (1941), les débits sont générés dans la plupart des cas, par plusieurs processus simultanément ou successivement, dans des combinaisons très variables dans le temps et dans l'espace, et dépendant dans chaque cas de plusieurs facteurs contrôlant à la fois la présence ou l'absence de chaque processus et son intensité (Benkaci T, 2006).

I.1.2 Les facteurs de génération des débits

Dans chaque bassin les processus actifs et leurs interactions ne sont pas quelconques, mais dépendent de la combinaison d'un ensemble de facteurs contrôlant leur variabilité spatio-temporelle.

L'apport de précipitations constitue le premier facteur intervenant dans les débits. Durant une averse, le volume et la forme de l'hydrogramme des crues, dépendent à la fois de l'apport total des précipitations, mais aussi de son intensité et de sa durée. La battance peut jouer un rôle important dans la genèse des crues majeures des bassins versants agricoles.

De même, l'apport d'énergie (radiative ou advective) entre deux événements pluvieux, qui contrôle l'évapotranspiration peut influencer sur la redistribution de l'eau dans les sols.

Les conditions initiales jouent un rôle majeur sur l'intensité des crues. Pour un même apport d'eau et d'énergie, ne correspond pas forcément le même débit.

L'état initial hydrique et hydrologique du bassin influe fortement sur la réponse du bassin à l'exutoire.

La transformation de la pluie en débit dépend largement de l'état hydrique et hydrologique initial du bassin, contrôlé par les intensités, durées, fréquences et séquences des périodes pluvieuses et sèches précédentes.

Cette non-linéarité de la réponse en fonction des conditions initiales s'explique par des combinaisons et intensités de processus actifs différentes dans chaque cas.

La variabilité spatio-temporelle pédologique ainsi que la répartition et l'occupation de la végétation constitue un facteur prédominant de la réponse du bassin aux conditions

hydrologiques. Ces caractéristiques vont déterminer de façon directe les propriétés des bassins quant aux différents mécanismes intervenants directement dans les processus de génération des débits. La végétation qui par sa densité a une influence sur l'interception, tandis que la structure pédologique du sol, détermine les propriétés hydrodynamiques du sol, et donc sur l'infiltration et le ruissellement de l'eau des pluies vers l'exutoire.

Enfin les caractéristiques géométriques telles que la topographie et la morphométrie vont influencer fortement les conditions d'écoulement (vitesse de propagation des débits), et donc sur l'intensité et la dynamique des crues.

Les mécanismes de génération de l'écoulement n'agissent pas de façon isolée, mais forment un domaine continu de processus. Il s'ensuit que sur un même bassin versant, plusieurs processus concomitants peuvent intervenir durant un épisode pluvieux. De plus, il se peut que le type de processus change selon le type d'événements. Les crues générées durant l'été ou l'hiver ne font pas nécessairement appel aux mêmes processus. Ceci, reflète la difficulté de proposer une classification de l'ensemble des processus de génération des écoulements.

Cette description sommaire des différents facteurs d'écoulement, reflète le caractère dynamique et complexe du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.

Ainsi, la génération des débits au niveau d'un bassin, résulte d'un grand nombre de processus superficiels et souterrains qui interagissent d'une façon plus générale dans le cycle de l'eau à des échelles spatio-temporelles différentes (Benkaci T, 2006).

I.2.La modélisation pluie-débit en hydrologie

Nous avons évoqué la réalité complexe du fonctionnement hydrologique du bassin, et l'hétérogénéité à différentes échelles dans la génération des débits à son exutoire. Dans ce cas, le bassin est considéré comme un système dynamique, dont les divers processus hydrologiques sont assez mal connus.

A partir de cette problématique, plusieurs recherches ont été entamées sur le terrain, en vue d'une meilleure compréhension des processus de génération des débits, et les facteurs qui les contrôlent.

Pour expliquer la formation de l'écoulement à l'exutoire d'un bassin, certains hydrologues ont utilisé des méthodes pratiques, visant à décomposer l'hydrogramme du bassin en ses différentes composantes.

En ingénierie hydrologique, la méthode la plus utilisée est la décomposition graphique de l'hydrogramme de crue en écoulement rapide, écoulement retardé et écoulement de base.

La méthode de décomposition de l'hydrogramme, a été étudiée par différentes approches et n'a pas abouti aux objectifs des hydrologues, et a souvent donné des explications contradictoires.

La mesure directe des différents écoulements de l'hydrogramme qui nécessite un déploiement de matériel expérimental souvent lourd et coûteux n'a fait l'objet que d'essais dans certains bassins expérimentaux, et reste donc spécifiquement dans un cadre de recherche.

Le développement des études sur les systèmes complexes et particulièrement les milieux naturels, à l'image des bassins versants, associé au développement de l'informatique, ont provoqué ces dernières années une prolifération de modèles en hydrologie.

Selon, la modélisation est la troisième attitude de recherche scientifique après l'observation et l'expérimentation.

Un modèle est donc considéré par son concepteur comme un outil de représentation de l'ensemble des flux dans l'hydrosystème au niveau du bassin.

La mise en œuvre du modèle mathématique, a été motivée, par le degré de dangerosité du phénomène naturel en question et de ses aléas, et par la volonté de compréhension, et surtout du souhait d'anticipation des problèmes causés par ce phénomène (Benkaci T, 2006).

I.2.1-Définition d'un modèle mathématique

Un modèle est défini 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, reconstituer ce phénomène. Le choix des processus considérés comme élémentaires, et la combinaison qui en est faite, dépendent, d'une part des connaissances acquises antérieurement, et d'autre part, par des idées du modélisateur quant à l'origine des phénomènes.

Un modèle mathématique est constitué :

D'un ensemble de variables généralement mesurables choisies pour représenter l'objet étudié; Et d'un ensemble de relations mathématiques entre ces variables (de forçage), choisies pour représenter son fonctionnement. Ces relations font intervenir des paramètres, qui permettent de calculer à partir des variations spatio-temporelles imposées à certaines de ces variables, les variations correspondantes des autres variables.

Cependant, l'utilité d'un modèle est à juger en fonction de l'utilité de l'objectif poursuivi, le seul critère de validité est son adéquation à la réalité physique.

Le développement de la modélisation est motivé par un grand champ d'application, dont l'hydrologue voit le modèle comme un outil d'amélioration de connaissances, et dont les types d'application est résumé en trois critères :

- Le domaine d'application : un modèle peut être exploité dans l'aménagement intégré des bassins versants, des barrages, l'aménagement et l'entretien des cours d'eau, le contrôle et la réduction des rejets, dans l'assainissement etc....

- L'échelle de temps : la gestion des ressources en eau, requiert des solutions à des échelles très diverses. Les processus hydrologiques couvrent une large gamme spatiale et temporelle, cette même échelle peut varier selon le type de processus. Par exemple, lors d'une transformation d'une pluie en débit, plusieurs processus hydrologiques peuvent intervenir à des échelles temporelles différentes. L'écoulement rapide de crue se déroulera à une échelle

horaire, tandis que le ruissellement qui en résulte, va se provoquer à une échelle temporelle plus importante de l'ordre du jour.

- L'échelle spatiale : la grande hétérogénéité spatiale des bassins, explique en partie la variabilité spatiale des débits, et l'introduction de modèles ponctuels s'avère utile pour réduire cette complexité, ainsi l'exploitation d'informations dans des endroits non jaugés du bassin reste la préoccupation principale du modélisateur.

I.2.2-Pourquoi des modèles pluie-débit ?

Selon l'utilisateur, l'usage de la modélisation a des fonctions variées. Le modèle est destiné à aider à répondre à des questions, il est conçu en fonction de celles-ci, et ne peut être utilisé que dans ce champ particulier, son objectif principal est la réduction de la complexité naturelle. Les modèles pluie-débit servent en premier lieu à représenter dans le temps le cycle de l'eau, et permettent de transposer l'information climatique (figure (I.1)).

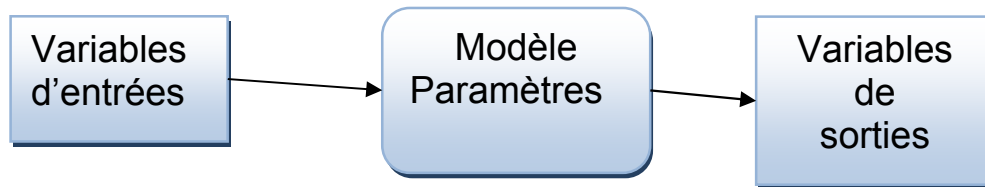


Figure (I.1)- Représentation simplifiée d'un modèle pluie-débit.

Cependant, force en nous est de constater que plusieurs modèles pluie-débit ont été conçus, et dont la majorité n'ont pas trouvé une application pratique en hydrologie.

On peut donc, conclure que la transposition d'un modèle, se mesure par les degrés de robustesse de ses résultats, et de sa représentativité des processus à modéliser.

On peut résumer les fonctions des modèles pluie-débit en :

➤ **Extrapolation des débits**

Le calcul d'un débit par le modèle est la tâche la plus courante pour ce dernier, dans ce cas, l'objectif reste la simulation et la génération synthétique des séries hydrométriques.

Cette estimation par l'extrapolation de débits peut cependant avoir des objectifs précis tels que :

- Le comblement des lacunes des séries hydrométriques tronquées.
- L'extension des séries courtes, ou des séries de certaines stations hors service.

Cette simulation quantitative trouve ses intérêts dans le dimensionnement des réseaux d'assainissement et de certains ouvrages hydrauliques.

- L'estimation (directe et/ou indirecte) de certains paramètres hydrologiques et hydrogéologiques. Certains modèles trouvent leur utilité dans la déduction des propriétés statistiques des flux de pollution par l'intermédiaire des modèles pluie débit, et des modèles pluie-débit-MES (Matières en suspension).

En combinant, une approche stochastique (modèle de génération de pluie), et des modèles pluie-débit et de matières en suspension, on peut obtenir une distribution de fréquence de la grandeur dérivée (flux MES) à l'exutoire d'un bassin.

A partir de certaines variables hydrologiques (pluie- ETP), le calage d'un modèle pluie-débit pour une période donnée, permet de calculer des débits, mais aussi de simuler les évolutions des niveaux aquifères d'une nappe en un point du bassin.

➤ *Prévision des débits*

Connaissant le temps de réponse des débits à l'exutoire, un modèle pluie débit peut être exploité dans la prévision des débits à court terme (quelques heures), et d'anticiper l'évolution des débits vers l'exutoire.

Cette prévision 'naïve', permet de relier les débits à un instant t , en fonction des pluies instantanées et des débits observés au pas de temps précédent.

En utilisant des outils de prévision des pluies (tels que les radars), et à partir d'un calage d'un modèle pluie-débit, l'évolution des débits pourrait être étudiée pour une période plus longue que la prévision 'naïve'.

En France, certains modèles pluie-débit sont couramment utilisés dans l'annonce des crues et l'évaluation des risques d'inondations par Météo-France.

➤ *Gestion des ressources en eau*

La gestion des ressources en eau est un problème délicat, du fait de la variabilité de ces ressources et de l'interaction des opérateurs.

La modélisation pluie-débit peut intervenir dans cette gestion à trois niveaux :

- D'abord, par l'évaluation des ressources en eau, et de la valorisation de tous les processus participants aux différents écoulements, c'est le cas par exemple de certains bassins non jaugés, dont les méthodes empiriques aboutissent souvent à des résultats aberrants.

- Un modèle peut caractériser l'impact des différents aménagements hydro-agricoles, et de prévoir certains changements des conditions météorologiques, ainsi que de délimiter les zones inondables.

- Un modèle pluie-débit qui représente les différents flux du système dynamique au niveau d'un barrage, pourra être exploité dans la gestion des ressources de ce barrage en fonction de

la demande des divers opérateurs intervenant sur le bassin. Il ne s'agit pas d'un système d'aide à la décision, mais plutôt d'un outil destiné à tester différents scénarios de développement.

➤ *Modèle comme outil de recherche*

La connaissance de certains mécanismes intervenant dans le cycle de l'eau, est très limitée, dans ce cas la modélisation est motivée dans un but de compréhension de certains phénomènes, qui peuvent aboutir à une meilleure maîtrise de ces mécanismes, tels que la partition entre infiltration et ruissellement, l'écoulement sub-superficiel.

Les modèles, sont dans ce cas exploités dans la recherche, par l'introduction de nouveaux concepts, et de nouveaux éléments pour étudier et comprendre l'interaction de tous les processus intervenant dans l'écoulement. L'établissement de lois d'érosion et de transport solide lors de la formation d'écoulements peut constituer un objectif du modèle.

I.2.3- Propriétés requises des modèles

La conception des modèles en hydrologie, se base sur des théories scientifiques, ou à partir de certaines expériences réalisées sur le terrain. De ce fait, plusieurs modèles ont été élaborés, dans un contexte théorique ou pratique. On ne peut donc comparer ces divers modèles, sans définir à priori certaines valeurs pertinentes, qui définissent une supériorité remarquable, et une validité suffisante pour un tel modèle.

L'établissement d'une assise de comparaison entre modèles, est défini par certaines qualités qu'on résume en :

Cohérence rationnelle : c'est la première étape de la modélisation, la rationalité scientifique est une exigence de toute recherche scientifique.

Précision du modèle : elle concerne le fonctionnement de ce dernier après ajustement aux données expérimentales., stipule pour qu'un modèle puisse être considéré comme un bon modèle, non parce qu'il fonctionne bien, mais surtout parce qu'il fonctionne bien pour de bonnes raisons.

Simplicité : qualité essentielle de tout modèle, la simplicité concerne l'économie de moyens utilisés, c'est à dire un nombre réduit de variables et de paramètres. Elle concerne de toute évidence la réduction de toute complexité de la structure interne du modèle.

Robustesse : c'est la capacité du modèle à garder une certaine précision, même dans les conditions extrêmes, cette qualité reflète le pouvoir de reproduire les différents cycles hydrologiques, et de simuler certaines valeurs caractéristiques.

Falsifiabilité : concerne la possibilité d'introduire des hypothèses dans un modèle, en le modifiant, et en l'adaptant à de nouvelles exigences, sans altérer sa cohérence hydrologique.

Accessibilité et fiabilité : l'acquisition des données calculées en temps réel, est parfois une nécessité pour l'étude d'un phénomène hydrologique. Dans ce cas, l'accessibilité des données mais aussi leur fiabilité, sont jugées comme critères de comparaison entre divers modèles.

Pouvoir de prévision : objectif principal du modélisateur. Le pouvoir de prévision est lié à l'extension du domaine de validité d'un modèle. Le modèle apparaît d'autant mieux justifié, que son champ d'applicabilité s'avère à posteriori plus large.

I.2.4-Des modèles en fonction des caractéristiques hydrologiques des bassins

La transformation de la pluie en débit à l'exutoire par un modèle, est généralement conditionnée par certaines caractéristiques hydro-climatiques, qui gouvernent les différents mécanismes du processus pluie-débit. De ce fait, une des caractéristiques mises en causes par les hydrologues concerne l'universalité d'un modèle.

Il est bien évident, qu'un modèle pluie-débit conçu dans un pays à régime méditerranéen, aura du mal à simuler certains phénomènes climatiques d'un pays à climat nival, et dont les pics d'écoulement sont observés au moins de printemps durant la fonte des neiges. De même qu'un modèle conçu dans les pays nordiques, sera confronté aux difficultés de simulation des formes d'étiage des pays semi arides.

Cette différenciation, est due non seulement, aux relations fonctionnelles du modèle, mais surtout au type de variables et de paramètres à introduire dans le modèle. Il n'existe donc pas de modèles universels, chaque modèle est adapté à certains types de climats ou de bassins versants (Benkaci T, 2006).

I.3-Classification des modèles hydrologiques :

Depuis la première conception de modèles pluie-débit, plusieurs modèles sont apparus, et vu les différents objectifs des modélisateurs, les modèles se sont diversifiés, et leur classification peut se baser sur les critères suivants de Higy (2000) :

- Système à modéliser : concerne l'unité fonctionnelle fondamentale étudiée, tel que le grand bassin versant, le sous-bassin, le fleuve, les barrages, l'interaction bassin topographique-nappe, etc.
- Degrés de causalité : implique la description des relations fonctionnelles des modèles.
- Discrétisation spatio-temporelle : aborde l'extrême imbrication des aspects physiques et hydrologiques, et leur grande variabilité spatiale et temporelle.

Il existe plusieurs classifications des modèles. La classification proposée est celle de Clarke en 1973 et Ambroise en 1998 :

- **Selon l'approche mathématique** : déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables et les relations entre elles,

- **Spatiale** : globaux, semi-distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, ou qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes, ou qu'il est finement discrétisé en mailles,
- **Selon le mécanisme** : empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit, et suivant la représentation du système à modéliser.

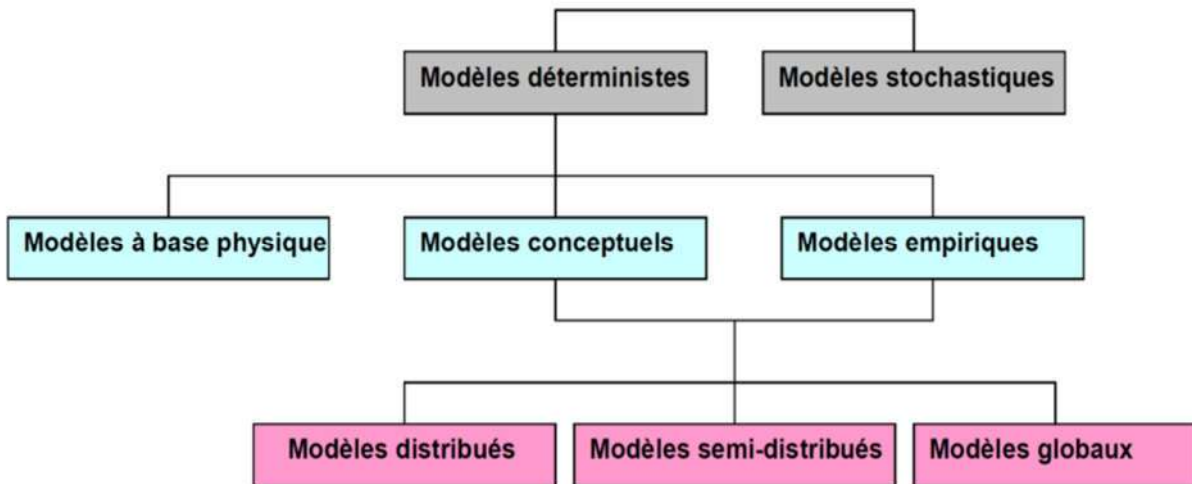


Figure (I.2)- Relation entre les modèles Pluie – Débit selon Berthier (2008)

I.3.1-Classification selon le mécanisme

Cette classification est basée sur la nature de l'algorithme utilisé pour la modélisation avec un degré d'abstraction plus ou moins important, ainsi que sur le degré d'utilisation des données. On peut les classer en 3 groupes principaux : modèles de type « boîte noire » ou empiriques, les modèles « à réservoir », appelés aussi « conceptuels » et les modèles dits « à base physique ».

I.3.1.1-Modèles empiriques

Ce sont des modèles qui visent à établir une relation purement mathématique basée sur les observations de la pluie et du débit d'un bassin versant. Celui-ci est traité comme une « boîte noire » sans faire d'hypothèses sur les processus internes qui contrôlent la transformation des précipitations en ruissellement. Cette catégorie regroupe les modèles régressifs, les méthodes fondées sur les fonctions de transfert comme l'hydrogramme unitaire, les réseaux de neurones, la programmation génétique, la logique floue ...etc. Relativement simple à mettre en œuvre, ce type de modèle peut être utilisé pour la prévision des crues. Cependant, ces modèles ne prévoient que le débit à l'exutoire du bassin versant. Ils nécessitent un grand nombre de données pour leur calage et leurs paramètres sont difficiles à relier aux caractéristiques physiques du bassin. Ils ne permettent donc pas de comprendre le comportement d'un bassin versant en leur offrant un pouvoir explicatif très faible.

I.3.1.2-Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels ou réservoirs sont basés sur une analogie qui considère le bassin versant comme étant une série de réservoirs interconnectés. Le processus hydrologique est expliqué par des formulations conceptuelles et décrit par des équations paramétrées. Chaque réservoir est caractérisé par plusieurs paramètres qui sont à déterminer par calibrage et validation . Les paramètres du modèle n'ont pas nécessairement un sens physique clair relié aux caractéristiques du bassin versant, cependant, l'idée de faire une analogie entre le processus hydrologique et le comportement des réservoirs offre à ce type de modèle un pouvoir explicatif plus important que celui des boîtes noires . Ce type de modèle souffre d'une subjectivité importante dans la partie d'élaboration, car premièrement, ce sont des modèles établis selon l'expérience propre de l'hydrologue . Deuxièmement, ils ne s'appliquent pas partout à cause des différences des paramètres hydrologiques d'un bassin versant à un autre et d'un climat à l'autre. Ceci les rend encore très difficiles à appliquer dans les bassins non jaugés même si des tentatives de régionalisation des paramètres des modèles avec les caractéristiques des bassins versants ont été proposées. Malgré les difficultés associées, les modèles conceptuels constituent la grande majorité des modèles utilisés dans des applications pratiques qui visent de reproduire le débit à l'exutoire du bassin versant .

Il existe plusieurs modèles de ce type : les modèles GR, les modèles réservoirs (Tank Model), HBV, etc.

I.3.1.3-Modèles physiques

Tel qu'expliqué par Beven, ces modèles s'appuient sur des lois de physiques validés indépendamment du modèle hydrologique dont les paramètres sont issus du terrain . Ce sont les lois de l'hydrodynamique telles que la conservation de masse, la conservation des quantités de mouvements, la conservation d'énergie, les équations de St. Venant pour les écoulements à surface libre, l'équation de Richards pour l'écoulement non-saturé, Penman-Monteith pour l'évapotranspiration, l'équation de Boussinesq pour l'écoulement souterrain..., etc. . Ces modèles nécessitent une discrétisation fine de l'espace permettant donc une représentation détaillée du bassin versant simulant les débits en tout point et tout instant. Ils se basent aussi sur l'utilisation de paramètres reliés directement à des caractéristiques mesurables dans le bassin versant dans l'espoir de l'élimination de l'étape de calibration et donc l'extension de leurs utilisation même dans les bassin versant non-jaugés . Cependant en pratique, ces modèles exigent un nombre très important de données rarement disponibles, et tombent dans le piège de surparamétrisation qui conduit à des calculs importants incompatibles avec la prévision des crues même avec l'avancement technologique actuel des machines de calculs. Pour cette raison, les modèles à base physiques ne sont pas utilisés dans la prévision des crues mais plutôt dans les problèmes du transport solide et la propagation de la pollution. Ils sont aussi très pratique dans l'étude des impacts environnementaux et l'évaluation de l'impact du réchauffement climatique .

La combinaison de ces types de modèles peut être effectuée dans le but de combler les lacunes de l'un par les avantages de l'autre dans ce qui est connu comme les modèles

hybrides. L'idée serait d'utiliser des observations (empiriques) pour accepter ou rejeter une structure hypothétique d'une structure de modèle. Il était démontré à travers la multitude de recherche que la combinaison de plusieurs approches de modélisation donne souvent de meilleurs résultats .

I.3.2-Classification selon l'approche mathématique

Les modèles pluie-débit peuvent être catégorisés selon les techniques introduites dans le processus de modélisation. Ils peuvent être déterministes ou stochastiques.

I.3.2.1-Modèles déterministes

Les modèles déterministes sont des modèles mathématiques dont le résultat est obtenu à travers des relations connus entre les événements et les états du modèle. Ils permettent donc une seule sortie de simulation avec le même ensemble d'inputs et de paramètres .

I.3.2.2-Modèles stochastiques

La majorité, voire tous les paramètres dans les modèles stochastiques sont représentés par une distribution statistiques ce qui permet d'avoir une gamme des outputs . Autrement dit, le modèle stochastique donne de l'incertitude aux variables de sortie du modèle en conséquence des incertitudes dans les variables d'entrée, les conditions aux limites ou les paramètres du modèle .

La majorité des modèles utilisés dans la modélisation pluie-débit suivent une approche déterministe, cependant un nombre considérable de modèles intègrent une fonction stochastique d'erreur aux prévisions déterministes des modèles hydrologiques, ou des distributions statistiques associées à leurs paramètres , Le modèle stochastiques offre deux avantages importants :

Sa structure simple permet une description de l'hétérogénéité associée à la limitation des détails spatiaux et temporels.

Ils donnent la possibilité aux décideurs d'évaluer le risque associé aux prévisions effectuées.

Bien que la majeure partie des modèles utilisés en pratique soient déterministes, la distinction entre les deux, reste floue. En règle générale, si les variables de sortie du modèle sont associées à une certaine variation de la dispersion prédictive, le modèle peut être considéré comme stochastique. Sinon, si les valeurs de sortie se présentent comme une seule valeur quel que soit le pas de temps, le modèle peut être considéré comme déterministe, indépendamment de la nature des calculs sous-jacents .

I.3.3-Classification spatiale

Il est possible de classer les modèles pluie-débit selon la distribution spatiale des variables et paramètres impliqués dans le comportement d'un bassin versant. On distingue alors les modèles globaux des modèles semi-distribués ou distribués .

I.3.3.1-Modèles globaux

Les modèles globaux traitent le bassin versant comme une entité unique représenté par des variables d'état moyennées sur sa surface . On applique à leurs entrés la pluie moyenne de surface, etc.

I.3.3.2-Modèles semi-distribués et distribués :

Ces modèles tiennent compte de la variabilité spatiale des processus hydrologiques modélisés, les variables d'entrée, les conditions aux limites et les caractéristiques du bassin. Pour les modèles semi-distribués, les quantités mentionnées ci-dessus sont partiellement autorisés à varier dans l'espace en divisant le bassin en petits sous-bassins qui à leur tour sont traités comme une seule unité . On peut aussi choisir de ne spatialiser que les facteurs dont la répartition spatiale est jugée cruciale dans la réponse hydrologique d'un bassin versant. Cela peut concerner à titre d'exemple la précipitation et l'état hydrique initial . Les modèles entièrement distribués en contrepartie, discrétisent l'espace d'étude à des cellules définies par le modélisateur et connue pour être la résolution du modèle. Ces types de modèles effectuent des prévisions distribuées dans l'espace avec des variables d'état moyennées sur le carré de quadrillage , L'approche de distribution donne une meilleure représentation de l'hétérogénéité pouvant exister sur un bassin, cependant, la spatialisation entraîne une complexification des modèles .

Plusieurs études comparatives ont été menées afin de répondre à la question de performance des modèles globaux et distribués, En général, lorsque le problème de modélisation pluie-débit est bien posé, les deux types des modèles simulent le débit à l'exutoire à un degré très proche . Toutefois, une variété d'autres études indique que chaque type de modèle donne des résultats recommandés à son domaine d'utilisation . Les modèles distribués, généralement associés aux modèles à base physique sont plus avantageux dans les études qui concernent l'effet du changement des conditions du terrain sur les processus hydrologiques, la modélisation de la qualité de l'eau, et la prévision sur les bassins versants non-jaugés. Une raison pour laquelle les modèles de paramètres distribués n'a pas vu une utilisation répandue est l'indisponibilité des bases de données détaillées. Les améliorations futures dans l'acquisition de données, y compris l'application des systèmes d'information géographique (SIG), vont probablement conduire à une utilisation plus large de modèles de paramètres distribués .

I.3.4-Classification temporelle

La classification temporelle différencie les modèles entre ceux qui sont utilisés pour modéliser le bassin versant en événements, et ceux qui le font en période continue modélisant même la phase inter-événementielle.

Les modèles événementiels simulent les événements de précipitations-ruissellement avec un accent sur l'infiltration et le ruissellement de surface alors que les modèles de processus continu représentent explicitement tous les composants de ruissellement tout en tenant compte de la redistribution de l'humidité du sol entre les averses .

Les modèles basés sur les événements permettent une calibration facile des paramètres en nécessitant moins de données à l'entrée en comparaison avec les modèles continus. Ces derniers par contre, sont très affaiblis par les risques de lacunes dans les séries historiques des données mais ne sont heureusement pas limités par la longueur de l'historique. Ces avantages et inconvénients donnent aux modèles événementiels un attrait pour la prévision des crues en temps réel. Il reste cependant à tenir en compte que pour les deux types de modèles il est important de faire très attention aux conditions de saturations et d'humidité initiales. Pour les modèles continus il faudrait considérer une période mise en route (warmup) à partir de laquelle le processus hydrologique devient indépendant de la condition initiale. D'autre part, pour les modèles à base d'événement, la saturation initiale des sols doit être fixée d'une façon externe au modèle .

I.4-Paramétrisation des modèles :

I.4.1-Calage des modèles :

Le calage consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle pluie-débit de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible. Ce jeu de paramètres doit être adéquat offrant la meilleure reconstitution des sorties en particulier les débits . Pour cela, on a recours à faire une confrontation des débits simulés à ceux observés par calage manuel, qui consiste à modifier les paramètres jusqu'à obtenir la meilleure adéquation entre les simulations et les observations sur la période d'étude (période d'apprentissage) . On utilise deux méthodes de calage pour obtenir le meilleur jeu de paramètres qui nous permettent d'ajuster au mieux le modèle aux valeurs observées : le calage manuel et le calage automatique.

I.4.1.1-Calage manuel

Pour cette méthode de calage, c'est l'utilisateur du modèle qui recherche par tâtonnement la valeur optimale des paramètres qu'il va utiliser pour faire tourner le modèle, qui est atteint lorsque l'erreur est minimisée entre les données simulées et observées. Cette pratique nous permet de comprendre le fonctionnement du modèle et quel est l'effet de chaque paramètre sur le comportement du modèle, mais en pratique, cette opération est longue et fastidieuse. Ce calage, fondé sur l'expertise de l'opérateur, est généralement basé sur le diagnostic visuel fait par l'opérateur des hydrogrammes des débits (observés et calculés) ainsi que sur l'appréciation de certains indices de performance du modèle.

I.4.1.2-Calage automatique

Les chercheurs ont bénéficié de l'essor de l'outil informatique lors de ces dernières décennies pour développer des outils de calage automatique qui peuvent remédier au défaut majeur du calage manuel . Dans ce cas, les données simulées sont ajustées aux données observées, au moyen d'un programme informatique qui opte pour minimiser une fonction objective qui représente l'erreur du modèle à travers un ajustement itératif représenté par un algorithme d'optimisation, cet algorithme est plus avantageux que le calage manuel :

- Il nécessite moins de temps de calcul,
- Il n'est pas tributaire de l'expertise de l'opérateur,
- Il est automatique, autrement, l'intervention de l'opérateur est minimisée.

Cependant, il présente l'inconvénient d'être influencé par certaines contraintes :

- Le choix de la fonction objective est subjectif, et les paramètres calibrés dépendent de ce choix.
- L'interdépendance des paramètres (auto-corrélation) : le changement de la valeur d'un paramètre peut être compensé par la modification d'autres paramètres, ce qui entraîne des solutions équivalentes en terme de valeur du critère d'optimisation;
- La sensibilité de la fonction objective.
- La présence d'optima locaux, et plusieurs zones de convergences.
- Les paramètres du modèle peuvent être calibrés à des valeurs qui n'ont pas un sens physique.

Ces inconvénients, nécessitent que la calibration automatique doit toujours être accompagnée par une appréciation manuelle de l'opérateur du modèle.

I.4.2-Validation des modèles

Avoir un bon ajustement entre les simulations du modèle et les observations du terrain sur la période de calibration est un test nécessaire pour tester l'applicabilité du modèle à un bassin versant ; cependant, cette étape seule, reste insuffisante parce qu'elle ne garantit en aucun cas que ce modèle va bien simuler le débit pour les périodes non calibrées . La validation, une période souvent confondue avec l'étape de calage, consiste à s'assurer que le modèle, une fois calibré, réagit correctement à des variations des données d'entrée et qu'il est apte à fonctionner en projection . On utilise pour cette étape des données qui n'ont pas servi au calage du modèle. Elle permet également de vérifier la sensibilité du système aux changements à analyser afin de s'assurer que les écarts entre résultats obtenus et observés sont raisonnables .

I.4.3-Difficultés

Il existe énormément de contraintes qui font face au modélisateur afin qu'il puisse assurer sa tâche de calibration et validation du modèle :

- Il faudrait s'assurer que les mesures de pluie, débit ou évapotranspiration sont de bonne qualité, sinon le comportement du modèle suivra une logique complètement erroné, ce qui conduit à des outputs erronés ou même à des difficultés liées à la calibration.

- Plus cette période représente une large gamme d'événements différents, plus le modèle sera représentatif du fonctionnement du bassin versant,
- La répartition de l'historique sur les périodes, mise en route, calibration et validation est cruciale, en particulier dans l'insuffisance de la longueur de la série historique,
- Les paramètres calibrés sont dépendants de la période choisie, n'offrant pas un jeu de paramètre unique représentatif des caractéristiques du bassin versant.
- Le choix du type de calage du modèle (manuel ou automatique).
- Le choix adéquat de la fonction objective qui résume l'information de l'erreur entre les simulations et les observations.

I.5-Synthèse bibliographique :

Dans cette deuxième partie du chapitre, nous présentons les différents modèles pluie-débit utilisés à différents pas de temps, à travers une chronologie de recherche effectuée par différents hydrologues, ainsi que les récents travaux inspirés de ceux existants dans la littérature hydrologique. Nous avons résumé les différents modèles pluie-débit en trois catégories, et cela en raison de l'immense diversité des modèles pluie-débit.

I.5.1-Les modèles ' boîte noire ' :

- L'hydrogramme unitaire :

La théorie de l'hydrogramme unitaire a été élaborée par L.K. Sherman (1932) (Roche, 1971, Singh, 1995). Elle stipule que le bassin versant est modélisé comme un système soumis à une entrée $E(t)$ (pluie) qui produit l'écoulement et délivrant une sortie $S(t)$ (débit). L'application de la théorie de l'hydrogramme unitaire, nécessite de résoudre le problème de déconvolution, et qui consiste justement à déterminer une fonction de transfert à partir d'un historique assez représentatif des entrées et des sorties.

La théorie de l'hydrogramme unitaire reste très limitée aux bassins de faible surface, pour des grandes étendues, cette théorie est impossible à appliquer pour plusieurs raisons, en particulier les pluies et les caractéristiques pédologiques ne sont pas homogènes.

- Le modèle DPFT (Différence Première de la Fonction de Transfert)

La méthode DPFT a été développée à l'EDF, et présentée pour la première fois par Duband (1978). Cette méthode est une extension de la méthode classique de l'hydrogramme unitaire, et par conséquent décompose le processus global pluie-débit en modèles distincts par leurs structures, un modèle de production transforme la pluie brute en pluie efficace ruisselée, et une fonction de transfert permettant le passage de la pluie efficace en débit de ruissellement à l'exutoire du bassin. (Chambaz, 1990, Dechemi & Chambaz, 1994).

Deux principes de base s'imposent à cette méthode :

- Le premier est que les débits sont exprimées en différences premières sur

un pas de temps reliant le présent et le futur ;

- Le deuxième est que les pluies efficaces sont considérées comme inconnues

du problème.

-Les modèles ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs

Les modèles ARMAX dérivent des modèles ARMA (Auto-Regressive Moving Average) initialement développés par Box et Jenkins (1976), ont été utilisés dès leur première conception pour la simulation des débits.

Les modèles ARMAX, ont été utilisés dans le contexte pluie-débit, à différents pas de temps, journalier (Weeks & Boughton, 1987), et horaire (Rodriguez, 1989) dans le cadre de la prévision des crues.

La forme générale de ces modèles est donnée par l'équation (1-1) (Young & Wallis 1985):

$$y(t) = a y(t+i) + b_j x(t+j) + c_k e(t+k) + e(t) \quad (1-1)$$

$i=1, j=1, k=1$

Où $y(t)$ représente le débit simulé, p, r, q sont les ordres du modèle, a, b, c sont les paramètres du modèle, $x(t-j)$ est une variable explicative (pluie), $e(t)$ est le bruit blanc, t est l'indice de temps. Cette approche est capable de modéliser mathématiquement la relation pluie- débit sans prendre en considération les processus physiques (Hsu et al., 1995).

- Les réseaux de neurones artificiels

Relevant du domaine de l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones sont une métaphore des structures cérébrales, des assemblages de constituants élémentaires appelés neurones fortement connectés construits par couches, qui réalisent chacun une fonction généralement non-linéaire, pour donnée une sortie unique à partir d'un mécanisme d'apprentissage effectué pendant le calage.

Les réseaux de neurones n'ont été appliqués qu'après des décennies de recherches, et sont pourvus actuellement de fondements mathématiques très sophistiqués ce qui explique leurs utilisations dans de nombreux domaines scientifiques.

L'étude de la relation pluie-débit par les réseaux de neurones a été traitée par plusieurs hydrologues (French et al. 1992, Hsu et al., 1995, Shamseldin 1996, Dimopoulos et al., 1996, Minns & Hall 1996, Coulibaly et al., 1999, Anctil et al., 2004).

- La logique floue

La logique floue introduite par Zadeh (1965), est un langage naturel issu de la théorie des ensembles, programmée afin de pallier aux insuffisances de la logique classique. Celle-ci n'utilisant que deux états logiques Vrai et Faux, en langage machine cela donnera les deux valeurs 0 et 1.

A partir des règles floues, le processus à modéliser est divisé en un ensemble de processus plus simples (sous ensembles flous), et en fonction des degrés d'appartenance (degrés de vérité), on engendre des surfaces d'inférences, les valeurs sont obtenues par la projection du centre de gravité de ces surfaces.

La logique floue, par son pouvoir d'extrapolation non-linéaire a été exploitée dans la modélisation pluie-débit (Özelkan & Duckstein, 2001, Dechemi et al., 2003, Benkaci & Dechemi, 2004), et s'est vue une utilisation renommée en hydrologie.

I.5.2-Les modèles conceptuels (à réservoirs):

En 1934, Zoch développa des équations reliant un modèle de transformation de pluie en débit, sous l'hypothèse de la variation du débit en fonction du niveau d'humidité du sol. Les travaux de Zoch, furent probablement, les premières études de représentation de la relation pluie-débit par un assemblage de réservoirs linéaires. Plus tard, Nash (1957), développa un modèle où la pluie est transformée selon une cascade de réservoirs linéaires, en introduisant des paramètres propres au fonctionnement à chaque réservoir. Ses motivations étaient de développer un programme pratique basé sur les paramètres d'hydrogramme unitaire, et les caractéristiques d'un bassin versant, introduisant ainsi le concept de réservoirs linéaires dans la réponse d'un bassin. Cette étude a ouvert la voix à une nouvelle catégorie de modèles, que sont les modèles pluie-débit conceptuels ou modèles à réservoirs.

L'approche des modèles à réservoirs est de modéliser le système hydrologique comme un réservoir, (ou un jeu de réservoirs), qui joue le rôle de tampons emmagasinant la pluie pour la redistribuer par la suite.

C'est au début des années soixante que Crawford et Linsley (1966), de l'université de Stanford ont utilisé un modèle de simulation pluie-débit, mais cette fois-ci fonctionnant à un pas de temps (continu) journalier. Les auteurs ont publié en 1966 les caractéristiques de ce modèle appelé, modèle de Stanford.

Le modèle comporte six réservoirs à 34 paramètres, et tient compte des stocks neigeux.

Le modèle de Stanford exprime différents mécanismes de tous les phénomènes intervenants dans les processus de vidange, d'évaporation, d'infiltration, et de ruissellement. Les fonctions de transfert sont assez élaborées, il représente ainsi un système complexe d'équations avec plusieurs paramètres.

A partir de ce modèle, la recherche en hydrologie a vu une émergence de toute une classe de modèles à réservoirs.

C'est le cas par exemple du modèle CREC (Cormary et al., 1967, v. Roche,1971), à deux réservoirs seulement, ce modèle est caractérisé par le fait que la partie ruisselée dans l'eau se fait par un opérateur (Π), et non par un réservoir.

Suivant que la pluie est supérieure ou inférieure à cet opérateur, on aura soit ruissellement, soit infiltration.

La modélisation pluie-débit à réservoirs, se diversifie, en introduisant certains mécanismes qui font l'originalité de certains modèles, c'est le cas par exemple du modèle SIMERO (Degallier, 1972), qui à partir de certains paramètres mesurés in Situ, tels que l'humidité du sol, ou les niveaux acquièrès, permet de simuler les débits, ou le modèle Knapp (1975), qui simule le fonctionnement du bassin et d'une nappe aquifère qui lui est associé (Roche, 1971, Benkaci, 2001).

La variabilité spatiale des paramètres hydrologiques devient une préoccupation des modélisateurs, et la modélisation distribuée devient une propriété de certains modèles. C'est en 1972 que les chercheurs de l'INRS-eau du Québec (Girard et al., 1972), ont développé le modèle Cequeau pour simuler les bassins canadiens.

C'est un modèle distribué, assez élaboré, il permet de représenter toute modification artificielle de l'écoulement dans les rivières et les barrages, et de voir l'évolution des écoulements dans des endroits non jaugés des bassins. Des tests sur des bassins semi-arides (Tunisie) ont été effectués par Ayadi et Bargaoui (1998).

Vers la fin des années soixante dix, Beven et Kirkby (1979) ont élaboré un nouveau modèle dans lequel, sont introduits des paramètres physiques tels que la conductivité hydraulique, la capacité au champ, l'indice de similarité hydrologique du bassin nommé indice topographique, déterminant ainsi l'organisation des états hydriques du sol dans la génération des écoulements (zones contributives variables). Ce modèle appelé TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979), a généré un concept nouveau dans la modélisation à réservoirs, puisque la base physique des relations fonctionnelles du modèle devient une nouvelle assise de comparaison dans la modélisation pluie-débit.

L'approche distribuée a suscité de nombreuses études pour mieux appréhender les processus à l'échelle de la maille choisie (Modèle IHDM, Beven et al., 1987, modèle Swatch, Morel-Seytout & Al hasoun, 1989).

Avec la vulgarisation des ordinateurs dans les années quatre vingt, les modèles à réservoirs se sont diversifiés, la modélisation a séduit de nombreux hydrologues, et la volonté de concevoir des modèles spécifiques était l'ambition de plusieurs Chercheurs.

C'est l'exemple des modèles Amande et Martine (Mazenc et al., 1984), qui exigent parfois des paramètres complexes, tels que la capacité de rétention rapide ou le nombre de jours de pluie par an.

Ces modèles présentent l'avantage d'étudier l'influence des paramètres physiographiques et morphologiques d'un bassin, sur l'estimation de certains débits caractéristiques. La particularité de chaque modèle, est déduite du type de climat et de ses caractéristiques. Ainsi le modèle de Tank (**Tank model**) de Sugawara (1984), a été conçu pour modéliser le régime humide au japon, ce modèle permet de simuler différents écoulements au niveau d'un bassin. Le dessèchement et la rehumectation du sol se fait selon une succession de dessèchement et de rehumectation des réservoirs superficiels puis souterrains (Singh, 1995). Le modèle Xianjiang (Zhao et al., 1980) a été conçu spécialement pour modéliser les différentes

caractéristiques du régime climatique continental de Chine, le modèle Modhydrolog (Chiew & Mc Mahon, 1994) pour affronter les spécificités hydrologiques de l'Australie, ainsi que les apports neigeux et le climat nival ont été représentés par le modèle HBV en Suède (Bergstrom & Forsman, 1973), ou encore le modèle Satt-I en Finlande (Vakkilainen & Karvonen, 1982).

La répartition spatiale des écoulements et sa variabilité, deviennent une préoccupation de certains hydrologues (Baudez et al., 1999) dans l'élaboration des modèles journaliers et même horaires. Le modèle ARNO (Todini, 1996), représente une nouvelle gamme des modèles, ce dernier est de type semi-distribué, dans ce cas, le bassin est divisé en sous-bassins, qui coïncident avec les limites et formes topographiques et hydrographiques du bassin versant.

Connaissant la contribution de la pluie nette dans l'écoulement, certains hydrologues ont pu introduire des fonctions de transfert, permettant de simuler le décalage de cette pluie et la propagation des débits jusqu'à l'exutoire. C'est le cas du modèle GR3j (Edijatno & Michel, 1989, Edijatno, 1991) développé au CEMAGREF et issu des modèles GR (Génie Rural), ce modèle à deux réservoirs et trois paramètres seulement intègre un hydrogramme unitaire capable de simuler le transfert de la pluie nette dans un bassin.

Néanmoins, tous ces modèles, avaient l'inconvénient de ne modéliser que des bassins versants, considérés comme un milieu clos. Certaines conditions hydrologiques tels que les sous-bassins, ou bassins intermittents étaient mal simulées, des lors la modélisation des échanges entre sous-bassins devient une propriété essentielle au bon fonctionnement des modèles. C'est l'exemple du modèle GR4J (Makhlouf, 1994, Nascimento, 1995,) à quatre paramètres, qui découle du modèle GR3J, ce modèle intègre un opérateur, qui modélise l'échange inter-bassins.

Le modèle GR3J a été spécifiquement étudié dans le cas de la prévision des crues; Yang (1993) a mis au point une méthode de prévision des crues en utilisant le modèle GR3J à un pas de temps horaire, et avec une mise à jour des paramètres. Dans le bassin de la Somme (France) (Amraoui et al., 2003), ont permis d'étudier la prévision des hautes eaux de l'hiver 2001-2002 par deux modèles pluie-débit .

Les modèles GR, ont démontré leur grande capacité de simulation, avec deux ou trois paramètres seulement, ces modèles étaient parmi les plus robustes, et cela contrairement aux autres modèles, dont le nombre de paramètres à estimer ou à caler était généralement supérieur à dix. Le concept de parcimonie des modèles pluie-débit était la priorité et l'objectif de certains chercheurs. Jakeman et al., (1990) ont pu concevoir un modèle basé sur l'hydrogramme unitaire, ce modèle comporte six paramètres et deux modules linéaires et non-linéaires pour simuler la pluie nette et déterminer les débits à l'exutoire.

Les modèles à réservoirs présentent un avantage de falsifiabilité important, et peuvent être adaptés aux différentes exigences climatiques et reformulations mathématiques. C'est le cas de certains modèles, tel que le modèle GR3J (Edijatno et al.,1999) ou le modèle IHACRES (Littlewood et al., 1997, Croke & Jakeman, 2004).

La transformation de la pluie en débit, par les modèles conceptuels, a été exploitée généralement au pas de temps journalier, et dans certaines études au pas de temps horaire. Au pas de temps mensuel, les recherches ont été souvent limitées, à cause de la forte non-linéarité du processus pluie-débit à cette échelle. L'échelle de temps devient donc une nouvelle assise de conception des modèles, ainsi on a pu voir au début des années quatre vingt certains modèles mensuels tels que le modèle ABCD, (Thomas, 1981), le modèle de Arnell (1992), le modèle de Vandewiele (Vandewiele et Xu, 1992), ou encore le modèle GR2M (Edijatno & Makhlouf, 1994) à deux paramètres. De même qu'un modèle fonctionnant au pas de temps annuel (Bouabdallah, 1997), développé à partir de GR2M, a été testé sur plus quatre vingt bassins français.

I.5.3- Les modèles physiquement fondés

C'est vers la fin des années soixante, que Freeze et Harlan (1969), ont imaginé un nouveau concept de modèles, basé sur des équations issues des théories physiques, et qui prend en considération les variabilités spatiales, des différents processus intervenant au niveau d'un bassin.

Deux ans plus tard, Freeze (1971) met en application ce modèle, qui avait pour originalité de calculer l'écoulement saturé et insaturé dans les trois directions de l'espace. Mais ce modèle avait l'inconvénient d'exiger un nombre de paramètres élevé.

Avec le développement de l'informatique, les modèles fondés physiquement réapparaissent vers le milieu des années quatre vingt. C'est ainsi qu'Abott et al.,(1986) développèrent un modèle entièrement basé sur des équations physiques, et qui reproduit finement le comportement d'un bassin réel; le modèle du système hydrologique européen (SHE).

Dans ce modèle, l'interception est calculée à partir du modèle de Rutter (1971), l'évapotranspiration est estimée par la formule de Penman, la zone non saturée est représentée analytiquement par l'équation de Darcy Richard, qui nécessite la connaissance des propriétés hydrodynamiques du sol.

L'écoulement en nappe libre est déduit des équations d'hydraulique telle que l'équation de saint venant. Une version améliorée du modèle (Shetran) a été reformulée par (Ewen et al., 1998), et testée par Higy (2000) pour les bassins versants suisses.

Le modèle MYDHAS (Moussa et al., 2002) représente un autre exemple d'un modèle physiquement fondé. S'appuyant sur des équations d'écoulement en milieu non saturé et saturé (telles que loi de Philip, ou la loi de Darcy), ce modèle est basé sur une segmentation du bassin en unités hydrologiques.

Les modèles à base physique diffèrent essentiellement par les hypothèses de fonctionnement hydrologique, par la procédure de segmentation du bassin versant, par le mode de représentation des liens entre les versants et le réseau hydrographique, par le mode de représentation des processus hydrologiques, et par les stratégies de paramétrisation, de calage et de validation (Chahinian, 2004).

I.5.4- Nouveaux outils de la modélisation pluie-débit : Apport de la télédétection

A travers des décennies, la modélisation pluie-débit a connu un effort considérable, quant à la conception et à l'utilisation des modèles. Les variables et paramètres hydrologiques ont toujours fait l'objet d'une grande importance dans leur estimation du fait qu'ils conditionnent d'une façon primordiale le comportement hydrologique du système étudié. De ce fait l'erreur d'estimation de ces variables ou paramètres pourraient avoir des conséquences négatives sur le fonctionnement, et donc sur la validation d'un tel modèle.

Les bassins versants montrent une grande variabilité spatiale et temporelle des paramètres tels que les propriétés physiques et hydrodynamiques des sols, la végétation, le taux d'humidité et l'occupation du sol, etc. Ainsi, la non-disponibilité de ces données, constitue le premier obstacle pour le modélisateur.

Pour résoudre le problème d'estimation de ces variables en des lieux non-mesurés, on fait appel à la distribution d'informations spatiales et/ou temporelles, par des procédés analytiques (déterministes) ou probabilistes (stochastiques).

Ces méthodes d'interpolation plus ou moins fiables, présentent l'inconvénient d'être exigeantes en nombre de données, ceci impliquerait la mise en place d'un système de mesure très fastidieux.

Les méthodes basées sur la télédétection et les systèmes d'informations géographiques peuvent constituer une solution à ce type de problème, en ce sens qu'elles permettent de caractériser instantanément des zones spatialement étendues. Dans ce cas, l'objectif est d'étudier l'apport d'une prise en compte des paramètres hydrologiques sur la fiabilité des phénomènes étudiés (telles que les crues) simulés par un modèle. Connaissant le rôle de l'indice hydrique du bassin dans la génération de l'écoulement, des études ont été menées (Chkir, 1994, Loumagne et al., 1996) en vue d'intégrer dans des modèles hydrologiques (tels que les modèles GR) un ou plusieurs indicateurs de l'état hydrique du sol contrôlables par des mesures externes (télédétection), afin d'améliorer le fonctionnement d'un tel modèle hydrologique. Quesney (1999) a testé l'assimilation de l'état hydrique du sol dans le modèle GRhum, sur le bassin de l'Orgeval (France).

I.6-Défis de la modélisation :

I.6.1-Disponibilité et exactitude des données d'entrée

L'un des défis de la modélisation, qui renvoie aux bassins non jauges, est l'amélioration de la disponibilité et de l'exactitude des données. Cela comprend les séries chronologiques de données d'entrée, telles que la pluie ou l'évaporation, les séries chronologiques servant à étalonner ou à valider les résultats, comme le débit, le niveau de la nappe ou la qualité de l'eau, et l'information utilisée pour estimer les valeurs des paramètres. Les modèles hydrologiques ne deviendront de véritables outils opérationnels de gestion des ressources en eau que si l'on dispose de l'information nécessaire pour les appliquer avec profit.

Le recours à l'imagerie satellitaire traitée dans le cadre des projets de recherche sur la modélisation est effectif depuis plusieurs années, et il existe d'ores et déjà des exemples d'emploi à des fins opérationnelles. L'utilisation de ces techniques par les organismes de gestion des ressources en eau pourrait être beaucoup plus étendue, surtout dans les pays en développement où les observations au sol sont insuffisantes.

De plus en plus de jeux de données mondiaux ou quasi mondiaux issus de l'imagerie satellitaire sont disponibles et accessibles. Ils portent sur une large gamme de paramètres relativement stables, comme la topographie ou la couverture végétale (D'Herbes et Valentin, 1997), mais incluent aussi des séries chronologiques de paramètres variables tels que la température (Xiang et Smith, 1997), l'évapotranspiration (Kiet et Doggers, 2000), l'humidité du sol (Valentin et al., 2005) et les précipitations (OMM/PMRC, 1986). Une grande partie de ces informations pourraient combler certaines lacunes et être introduites dans les modèles d'estimation des ressources en eau. Plusieurs aspects pratiques doivent toutefois être examinés si l'on veut utiliser de tels produits avec succès et en toute confiance:

- a) Des modèles hydrologiques, ajustés au moyen d'observations historiques, peuvent déjà être utilisés;
- b) Les relevés de données satellitaires sont d'une durée relativement courte;
- c) On devrait, en principe, utiliser conjointement des données satellitaires et des données d'observation; les rapports entre ces deux sources doivent être compris et quantifiés;
- d) Les gestionnaires des ressources en eau des pays en développement devraient pouvoir accéder aux données;
- e) Les techniques permettant d'exploiter pleinement les données ne devraient pas être trop complexes ou trop difficiles à maîtriser, car les pays en développement disposent rarement de ressources importantes pour l'analyse et le traitement.

L'un des grands défis de la modélisation hydrologique sera d'élargir l'emploi opérationnel de ces techniques. Il faut donc s'assurer que les résultats sont aussi exacts et représentatifs que possible. À tout le moins, il est essentiel de comprendre les limites et les marges d'erreur des résultats des modèles, de telle sorte que les décisions concernant la mise en valeur des ressources en eau reposent sur une information adéquate. La section qui suit renvoie à l'un des objectifs de l'initiative de l'Association internationale des sciences hydrologiques intitulée «*Décennie sur les prévisions en bassins non jaugeés: réduire l'incertitude prédictive* ». Lorsque les modèles sont utilisés en conditions d'exploitation, il est important de réduire les incertitudes, mais aussi de quantifier celles-ci grâce à une solide connaissance de l'exactitude des données d'entrée (WMO, 2009) -World Meteorological Organisation- .

I.6.2- Bassins non jaugés

Le jaugeage des bassins versants est inexistant ou inadéquat dans de nombreuses régions, situation aggravée par la disparition de réseaux d'observation. Parallèlement, les ressources en eau sont menacées par la poussée démographique et la hausse constante de la consommation par habitant. Alors que la production de données diminue, le besoin de données augmente. Les spécialistes de l'hydrologie et des ressources en eau font face à un immense défi: parvenir à évaluer et gérer les ressources sans disposer de toutes les données nécessaires.

On perçoit depuis longtemps l'importance d'avoir des techniques applicables aux bassins non jaugés.

La formule rationnelle du XIXe siècle, fondée sur le concept de coefficient de ruissellement, annonçait dans un certain sens la régionalisation. L'extrapolation depuis les sites jaugés vers les sites non jaugés a été une pratique courante. Les hydrogrammes unitaires synthétiques et les hydrogrammes unitaires géomorpho-climatiques permettent de tracer un hydrogramme concernant des régions pour lesquelles on dispose de peu ou pas de données sur la pluie et le débit. Les éléments de géostatistique permettent d'estimer la valeur d'une variable en un lieu non jaugé grâce aux valeurs relevées ailleurs.

Le Flood Estimation Hand book publiée en 1999, qui a remplacé le Flood Studios Report et ses suppléments, décrit la régionalisation menée à l'échelle nationale au Royaume-Uni. Le manuel expose les principes de la régionalisation des paramètres de modèles et de l'extrapolation des bassins jaugés vers les bassins non jaugés. Il y est recommandé d'estimer les fréquences de crue par une analyse statistique des débits de pointe, des maximums annuels ou des dépassements de seuil, ou par la relation pluie-débit si on dispose de séries chronologiques suffisamment longues. Bien que les données de crue établies sur le site même soient de loin préférables, elles peuvent provenir d'un site voisin, d'un bassin donneur, d'un bassin semblable ou d'un bassin analogue s'il n'existe pas de bassin donneur à proximité.

L'estimation de la crue indicatrice - crue annuelle médiane - en l'absence de données sur les pointes de crue peut se faire à partir de descripteurs du bassin. Des analyses groupées sont parfois nécessaires pour estimer la courbe d'accroissement, suivant la longueur des relèves de jaugeage ou la période visée (crue centennale ou décennale, par exemple). La dernière possibilité consiste à estimer les paramètres d'un modèle pluie-débit à partir des seuls descripteurs du bassin.

L'Association internationale des sciences hydrologiques, qui a lancé la Décennie sur les prévisions en bassins non jaugés (2003-2012), s'efforce de renforcer la capacité d'établir des prévisions pour les bassins non jaugés (Siva palan et al., 2003). Il faut espérer que la Décennie permettra de réduire l'incertitude des prévisions et d'élaborer de nouvelles théories fondées sur la mise à l'échelle et à plusieurs échelles, l'approche des systèmes complexes, la dynamique non linéaire et les relations éco-hydrologiques.

Cela ne sera possible que si l'on élargit la plage et l'échelle des observations qui servent à

estimer les variables hydrologiques. L'initiative présente un intérêt considérable pour l'hydrologie opérationnelle et on espère que, d'ici son terme, elle fera sensiblement progresser les techniques applicables aux bassins non jaugés (WMO , 2009) -World Meteorological Organisation- .

I.6.3- Couplage de modèles

Le souci grandissant de gérer les ressources en eau de façon intégrée rend souvent nécessaire l'emploi de plusieurs modèles pour résoudre certains problèmes pratiques. Citons l'utilisation conjointe de modèles de quantité et de qualité des eaux avec des modèles de systèmes et des modèles d'incidence économique. Un autre exemple est le recours à des modèles climatiques pour obtenir les données météorologiques qui sont introduites dans les modèles hydrologiques de bassins. Autrefois, on modélisait séparément et séquentiellement les différents processus, les sorties d'un modèle devenant les entrées du suivant. Cette façon de faire risque de négliger les nombreuses rétroactions en jeu dans les systèmes naturels complexes. Il est préférable d'exécuter les modèles en parallèle, en couplant les liens entre les processus à chaque pas de temps et en intégrant des mécanismes de rétroaction. Si l'on suit les méthodes classiques, il faut combiner tous les algorithmes des différents modèles dans un modèle unique, ce qui représente une tâche énorme et empêche de choisir des approches de modélisation adaptées à chaque application. Le couplage peut être facilité en créant des cadres de modélisation qui regroupent la gestion des données, les outils de visualisation des systèmes d'information géographique et les liaisons entre modèles dans un progiciel unique englobant plusieurs modèles. Il existe plusieurs systèmes de ce type dans le monde, tous mis au point à des fins particulières. On en trouvera des exemples dans Hughes (2004b).

Une innovation récente, l'Interface de modélisation ouverte (Open MI, voir le site <http://www.harmonit.org>), tente de lier, sur une base spatiale et temporelle, les modèles de différents processus hydrologiques et, par conséquent, de simuler les interactions des processus. L'objectif est de simplifier la liaison des modèles qui tournent en parallèle et fonctionnent selon des échelles spatiales et temporelles différentes, grâce à un transfert direct des données entre eux. Il est probable qu'un grand nombre de modèles actuels seront d'ici peu compatibles avec l'Open MI (WMO , 2009).

I.7-Modélisation pluie-débit : travaux les bassins versants algériens :

- La relation pluie-débit est indéniablement utile dans le domaine de l'hydrologie et des projets hydrauliques. La conception des structures et la gestion des barrages ne peuvent se faire sans l'utilisation des paramètres de pluie et de ruissellement. Les modèles conceptuels ont largement contribué à modéliser cette relation.

-La plupart des modèles pluie-débit existants sont généralement conçus dans les pays à climat humide, la transposition de ce type de modèle dans un bassin versant algérien semi-aride doit passer par une étape laborieuse de validation. (T.Benkaci et N.Dechmi 2004), notent l'incapacité des deux modèles conceptuels (GR3J et CREC) -testés dans les bassins algériens

à reproduire les débits de pointe, ce qui montre une baisse des performances au cours de la transition vers la phase de validation et limite leur pouvoir prédictif. Les résultats médiocres du modèle ARMAX obtenu reflètent la difficulté des modèles linéaires «boîte noire» pour faire face au changement climatique. Le modèle neuro-flou (T.Benkaci et N.Dechemi 2004) avec une entrée permet une meilleure reproduction des débits maximaux et simule les débits tout à fait correctement, même lors de la phase de validation, mais représente un modèle complexe (plus de 100 règles floues).

- La majorité des études de modélisation pluie-débit des bassins versants algériens ont été élaborées par les modèles conceptuels globaux du Cemagref GR (génie rural): (GR1A, GR2M, GR3J, GR4J) (1). Les premiers utilisateurs ont été Kabouya et M. Michel (1990 et 1991) qui ont appliqué les modèles de pas de temps annuels et mensuels (GR1A et GR2M). Ces modèles donnent de bons résultats, mais ils sont incapables de reproduire les pics d'écoulement maximum (T.Benkaci et N.Dechemi 2004).

- Laborde et al (2010) ont établi un modèle mensuel avec des réservoirs dérivés du GR2M, c'est le modèle: LOIEAU. Il dispose de deux réservoirs, dont l'un est superficiel avec une hauteur H limitée à 250 mm. L'état de ce réservoir est principalement utilisé pour vérifier l'évapotranspiration réelle E et le ruissellement. Le deuxième réservoir avec une hauteur S est utilisé pour retarder l'écoulement dans le temps.

- Les modèles semi-distribués intégrés au logiciel ATHYS ont été testés par I.Abdi et M. Medi (2015) sur deux bassins versants algériens avec un pas de temps horaire. Le modèle combine la fonction de production SCS et la fonction de transfert d'onde cinématique simple pour donner de meilleurs résultats.

- Le modèle de réservoir de (Sugawara ,1961), (Sugawara ,1974), (Sugawara, 1979) n'a jamais été testé en Algérie, malgré son succès dans de nombreuses zones humides. Notre étude nous a permis d'adapter la structure classique de ce modèle au cas algérien.

Chapitre II-Les modèles GR

II.1 Les modèles du Génie Rural (GR) :

II.1.1 Introduction

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

II.1.1.1 Objectifs de développement

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (Perrin et al., 2007).

II.1.1.2 Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- représentation globale du bassin versant,
- approche empirique de développement sans recours à priori à la physique des écoulements,
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (Andréassian et al., 2006),
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures du modèle (Perrin et al., 2007).

II.1.1.3 Principales caractéristiques

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

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité;
- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur journalière de Pluie, par E (mm) l'Evapotranspiration Potentielle Journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin, calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment). E n'est pas nécessairement une donnée datée mais peut être issue d'une courbe de régime d'ETP moyenne interannuelle. Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm (Perrin et al., 2007).

II.1.2 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A :

II.1.2.1 Introduction

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation Pluie - Débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006a).

II.1.2.2 Description mathématique

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

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0,7P_k + 0,3P_{k-1}}{X.E_k} \right)^2 \right]^{0,5}} \right\} \quad (2-1)$$

Où :

- Q_k est le débit simulé de l'année k .
- P_k est la pluie observée de l'année k .
- P_{k-1} est la pluie observée de l'année $k-1$.
- E_k est l'évapotranspiration potentielle de l'année k .
- X est le paramètre du modèle à optimiser.

Où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP (Perrin et al., 2007).

II.1.2.3 Paramètres

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

II.1.3 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M:

II.1.3.1 Introduction :

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie débit global à deux paramètres optimisables. Le modèle est à pas de temps mensuel. Il fonctionne autour de deux réservoirs, un de production (ou réservoir sol) et un de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées. Le modèle utilise en entrées la pluie moyenne et l'ETP, et fournit en sortie le débit. 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, qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de 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.

La version présentée ici est celle de Mouelhi et al. (2006b) qui paraît la plus performante.

II.1.3.2 Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure (II.1). P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

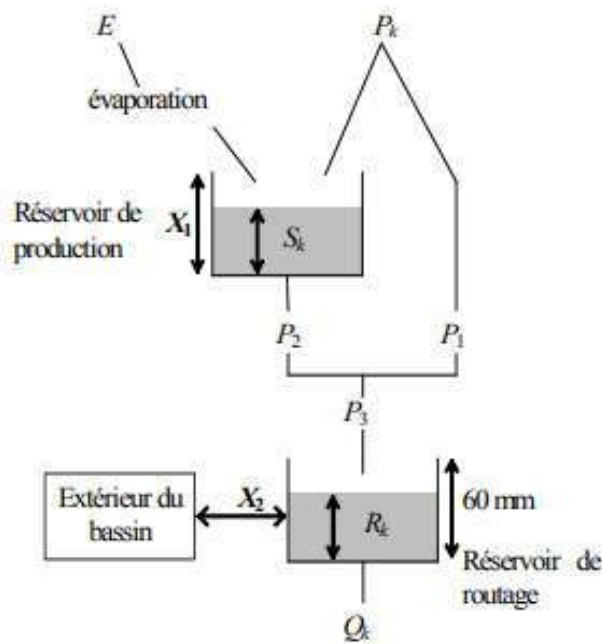


Figure (II.1) : Schéma de la structure du modèle GR2M

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 :

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{x_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{x_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{x_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{x_1}\right)} \quad (2-2)$$

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

$$P_1 = P - P_s \quad (2-3)$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad (2-4)$$

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

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad (2-5)$$

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

$$S'' = S' - E_s \quad (2-6)$$

- **Percolation :**

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 qui va rejoindre le réservoir routage par la suite:

$$P_2 = S'' \left[1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-\frac{1}{3}} \right] \quad (2-7)$$

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

$$S_k = S'' - P_2 \quad (2-8)$$

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

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

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (2-9)$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad (2-10)$$

- **L'échange en eau souterrain F**

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 :

$$F = (X_2 - 1)R \quad (2-11)$$

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

$$R'' = X_2 \cdot R' \quad (2-12)$$

- **Le réservoir routage**

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad (2-13)$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \quad (2-14)$$

Le R_{k+1} obtenu, sera le niveau du réservoir au début du mois $K+1$.

II.1.3.3-Paramètres:

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau suivant :

Tableau II.1: Valeurs des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140 - 2640
X_2 (-)	0,92	0,21 - 1,31

II.1.4- Description du modèle pluie-débit journalier GR4J :

II.1.4.1- Introduction :

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Le modèle utilise en entrée la hauteur de pluie moyenne sur le bassin versant P (mm) et l'évapotranspiration potentielle E (mm). Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de

gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin et al. (2003) qui est présentée ici.

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

Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel (Perrin et al., 2007).

II.1.4.2- Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure (II.2). P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

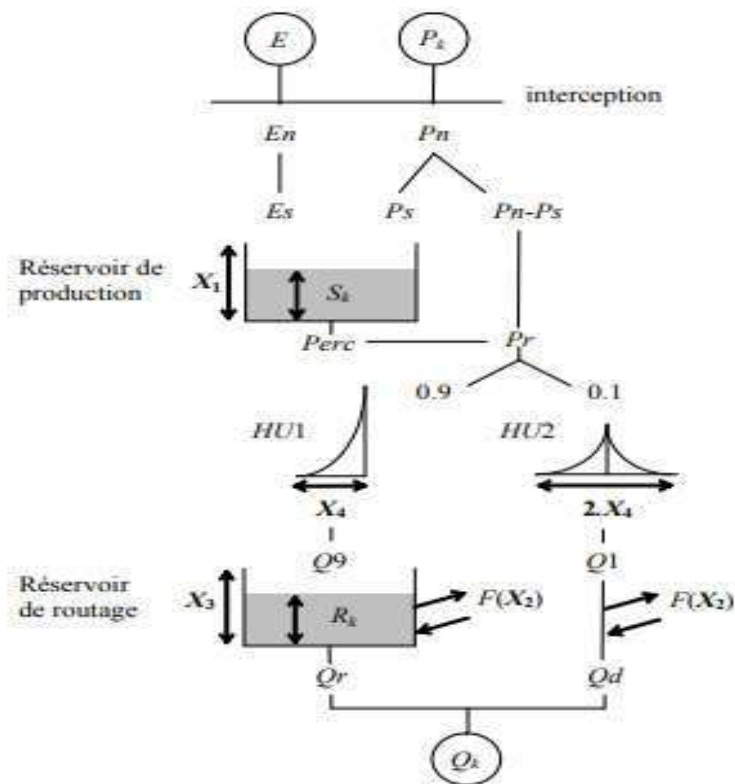


Figure (II.2): Structure du modèle GR4J

➤ **Fonction production**

• **Neutralisation :**

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

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ alors } P_n = P_k - E \text{ et } E_n = 0 \quad (2-15)$$

$$\text{Si } P_k < E, \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P_k \quad (2-16)$$

• **Fonction rendement :**

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par :

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

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

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

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

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_k - E_s \quad (2-19)$$

• **Percolation :**

Une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$Perc = S' \left[1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{S'}{X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right] \quad (2-20)$$

suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad (2-21)$$

Et la quantité d'eau P_r qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (2-22)$$

➤ **Fonction transfert**

• **Hydrogrammes unitaires :**

P_r est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de HU1 exprimé en jours.

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

$$\text{Pour } t \leq 0 \quad SH1(t) = 0 \quad (2-23)$$

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

$$\text{Pour } t \geq X_4, \quad SH1(t) = 1 \quad (2-25)$$

SH2 est définie de façon similaire par:

$$\text{Pour } t \leq 0 \quad SH2(t) = 0 \quad (2-26)$$

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

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

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

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par:

$$\begin{cases} UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \\ UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \end{cases} \quad (2-30)$$

Où : j est un entier.

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

$$Q9(k) = 0,9. \sum_{j=1}^l UH1(j). Pr(k - j + 1) \quad (2-31)$$

$$Q1(k) = 0,1. \sum_{j=1}^m UH2(j). Pr(k - j + 1) \quad (2-32)$$

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

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

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2. \left(\frac{R_k}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (2-33)$$

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

- **Réservoir de routage :**

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R' = \max(0 ; R_k + Q9(k) + F) \quad (2-34)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Qr = R' \left[1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{-1}{4}} \right] \quad (2-35)$$

Le niveau dans le réservoir devient:

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad (2-36)$$

- **Écoulement total :**

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

$$Qd = \max(0 ; Q1(k) + F) \quad (2-37)$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Q_k = Qr + Qd \quad (2-38)$$

II.1.4.3-Paramètres:

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler:

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (mm)

X_3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire $HU1$ (j)

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

Tableau II.2: Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X_1 (mm)	350	100 à 1200
X_2 (mm)	0	-5 à 3
X_3 (mm)	90	20 à 300
X_4 (mm)	1,7	1,1 à 2,9

II.2-Applications des modèles "GR"

Les domaines d'applications des modèles "GR" se résument en:

- la reconstitution ou l'extension de séries de débit : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;

- la prédétermination : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;

- la prévision à court terme (quelques heures à quelques jours): elle est particulièrement utile pour les événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions;

- la prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois): elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie;

- *la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant* : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant;

- *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 de mieux gérer l'ouvrage.

II.3- Conclusion

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction simplifiée, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètres à caler). Cette simplicité, si elle n'est pas un objectif en soi, s'est imposée au cours de leur développement parce que de nombreuses hypothèses de fonctionnement, empruntées à l'arsenal des modèles conceptuels, étaient rejetées par des données observées lorsque de nombreux bassins étaient pris en compte et que le test en calage-contrôle était appliqué avec rigueur. C'est ainsi par exemple que les sous modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales.

Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps.

Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, etc.). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Comme tous les modèles hydrologiques actuels, ces modèles restent perfectibles, malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Chapitre III-Le Tank

Model couplé au Filtre de Kalman

III.1. Introduction à la modélisation conceptuelle

Les modèles conceptuels journaliers sont nombreux et très utilisés en hydrologie. Ils ont été développés dans les années 60 pour estimer les débits des cours d'eau dans les moyens et petits bassins versants. Cependant, ces modèles présentent des particularités liées aux caractéristiques hydro-climatiques des pays où ils ont été conçus, ils sont basés sur le concept du bilan hydrologique, et visent à déterminer l'évolution du cheminement de l'eau à travers le bassin versant par un système d'équations représentant l'état interne du bassin versant en fonction du temps.

Les approches adoptées pour ces modèles s'appuient sur les éléments suivants :

- Le bassin versant est vu comme une entité globale;
- L'approche adoptée est empirique (pas d'usage à priori d'équations physiques);
- Les structures de ces modèles sont développées à partir des structures les plus simples, progressivement complexifiées;
- La complexité du modèle est conditionnée par la capacité du modèle à reproduire la transformation pluie-débit;
- La recherche de structures, les plus générales possibles;
- Le test en calage-validation, sur de grands échantillons de bassins, est le mode d'évaluation standard des modèles;

Pour notre cas d'étude, on s'intéressera au modèle à réservoirs « Tank Model » au pas de temps journalier et mensuel.

III.1.1. Présentation générale du Tank Model

Les Tanks Models ont été développés par Sugawara (1979, 1995). Ils sont populaires au Japon, Corée du Sud, et plusieurs autres pays de l'Asie, ils sont utilisés pour les prévisions des crues, la modélisation des bassins hydrographiques, etc.

III.1.1.1. Tank Model simple :

Le Tank Model est très simple, composé de quatre réservoirs posés verticalement en série, comme le montre la figure (III.1).

Les précipitations entrent dans le réservoir supérieur et l'évaporation est soustraite de ce dernier. S'il n'y a pas d'eau dans le réservoir supérieur, l'évaporation est soustraite du deuxième réservoir; s'il n'y a pas d'eau dans l'ensemble du premier et du deuxième, l'évaporation est soustraite du troisième réservoir; etc. (Sugawara, 1979).

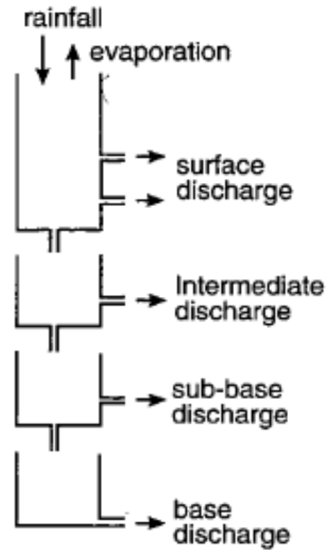


Figure (III.1) : Représentation générale du Tank Model simple

Les sorties latérales sont les débits calculés. La sortie du réservoir supérieur est considérée comme l'écoulement ou le débit de surface et sous surface (sub-surface), la sortie du deuxième réservoir en tant qu'écoulement intermédiaire, du troisième réservoir en tant que ruissellement sous basique (sub-base) et la sortie du quatrième réservoir en tant que écoulement de base (baseflow), comme il est indiqué dans la Figure (III.2).

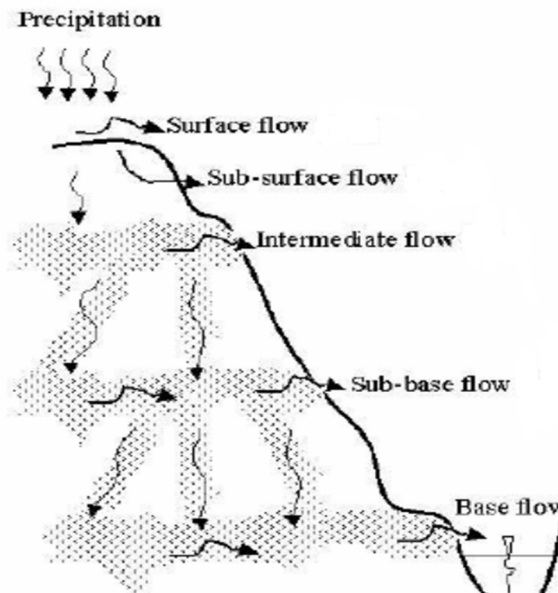


Figure (III.2) : Schéma représentant les types d'écoulement dans le modèle à réservoirs selon Setiawan et al. en 2013

Malgré ses simples perspectives, le comportement du Tank Model n'est pas tellement simple. S'il n'y a pas de précipitations pour une longue durée, le premier et le deuxième réservoir

seront vides et le Tank Model ressemblera à la Figure (III.3a) ou (III.3b). En dessous de ces conditions, le débit est stable. Dans le cas de la Figure (III.3a) la décharge diminuera très lentement, et dans le cas de la Figure (III.3b) la décharge sera presque constante.

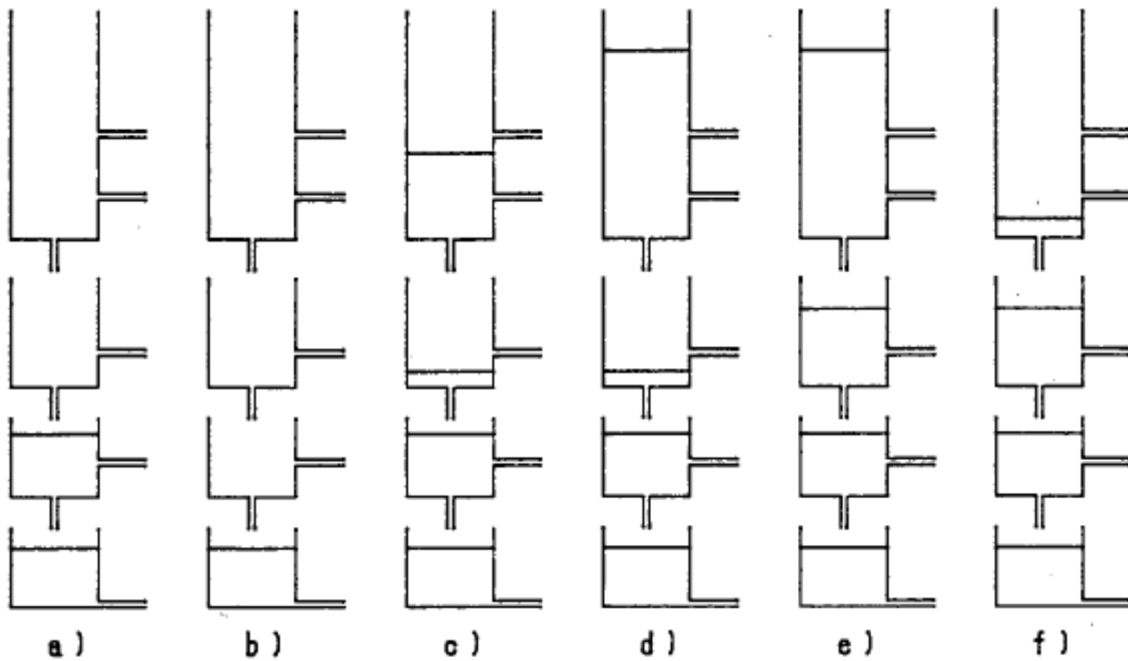


Figure (III-3) : Différents cas du Tank Model(Sugawara, 1979)

S'il y a une pluie relativement forte de courte durée sous ces conditions, le Tank Model prendra la forme de l'un des cas représentés sur les Figures (III.3c) et (III.3d). Dans ces cas, une décharge élevée de courte durée se produira avant que le modèle revienne à l'état stable comme précédemment. Dans ces cas, la plupart des décharges sont l'écoulement de surface du réservoir supérieur et il y a peu ou pas de ruissellement du deuxième réservoir.

Si les fortes précipitations se produisent sur une période plus longue, à ce moment-là, le Tank Model sera représenté par la Figure (III.3e). Lorsque la pluie s'arrête, l'eau du réservoir supérieur se déplace rapidement et le Tank Model prendra la forme de la Figure (III.3f). Ensuite, le débit de sortie du deuxième réservoir diminuera lentement, formant la typique pente descendante de l'hydrogramme suivant une grande décharge (Sugawara, 1979).

Le Tank Model peut représenter de nombreux types d'hydrogramme en raison de sa structure non linéaire causée par le réglage des sorties latérales un peu au-dessus du fond de chaque réservoir (à l'exception du réservoir le plus bas).

Le Tank Model décrit ci-dessus est appliqué pour analyser les décharges journalières à partir des précipitations journalières et d'évaporation. Le concept de la perte initiale de précipitation n'est pas nécessaire, car son effet est inclus dans la structure non-linéaire du Tank Model.

Pour l'analyse des crues, le Tank Model indiqué à la Figure (III.4) est appliqué, où les entrées sont habituellement des précipitations horaires et les sorties sont des décharges horaires.

Ce modèle ne contient que deux réservoirs; le troisième et le quatrième réservoir sont remplacés par une décharge constante car les écoulements des réservoirs inférieurs forment une partie négligeable de la grande décharge de crue.

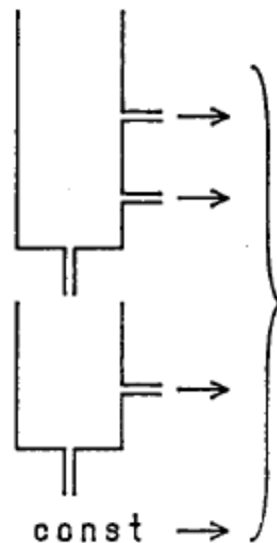


Figure (III.4) : Le Tank Model pour l'étude des crues (Sugawara, 1979)

III.1.2. Calibration du Tank Model

Il existe deux méthodes pour calibrer le Tank Model, la première manuelle, et se fait par la méthode Trial & Error (Essai et erreur), et la deuxième automatique par un programme numérique.

1.2.1. Calibration manuelle (Trial and Error)

Le Tank Model est non linéaire et les mathématiques sont presque inutiles pour les problèmes non linéaires. Par conséquent, l'hydrologue ne pouvait pas utiliser les mathématiques pour la calibration du Tank Model, et la seule solution était d'utiliser la méthode Trial & Error du calcul numérique. En 1951, lorsque le premier hydrologue a d'abord appliqué le Tank Model simple pour l'analyse du débit, il n'y avait que quelques ordinateurs au Japon et il ne pouvait pas les utiliser. Sans les solutions mathématiques et sans ordinateur, les calculs numériques nécessitaient un travail long et dur.

Cependant, l'esprit humain est toujours curieux, et les calculs numériques laborieux sont devenus moins ennuyeux mais plutôt intéressants comme expérience et les jugements ont été construits dans le cerveau des auteurs.

Progressivement, la calibration du Tank Model est devenue plutôt simple. Habituellement le premier, le deuxième et même le troisième essai ne donneront pas de bons résultats et donc on peut apporter des modifications audacieuses et importantes aux paramètres du modèle. Après plusieurs essais, le résultat devrait devenir assez bon et l'ajustement fin des paramètres peut commencer. Après dix essais, le résultat devient généralement très bon.

Cependant, une autre difficulté est apparue. L'hydrologue a trouvé des difficultés en décrivant et expliquant son Tank Model aux autres. En effet, Si deux personnes ont des connaissances et expériences communes sur quelque chose, elles peuvent parler et discuter sur le sujet. Mais, si une personne ne sait rien sur le sujet, alors c'est difficile ou impossible de discuter sur le sujet car il n'y a pas de vocabulaire commun.

Plus tard, comme le Tank Model est devenu plus connu en raison de ses bons résultats, alors l'hydrologue devait trouver des moyens pour décrire et expliquer sa méthode de travail et sa façon de penser. Certaines de ces méthodes sont :

Le modèle initial

Pour le premier essai, un Tank Model initial peut être supposé; un exemple de tel modèle initial est montré à la Figure (III.5a). On peut dériver un modèle initial pour s'adapter au bassin en traçant l'hydrogramme en échelle logarithmique, en trouvant les pics de l'hydrogramme et mesurant des débits décroissants après les pics. Si le taux de décroissance est « r par jour », alors les coefficients du Tank Model indiqués dans la Figure (III.5b) peuvent être déterminés comme :

$$A0 = A1 = A2 = (1 - r) / 3 \quad (3-1)$$

$$B0 = B1 = A0 / 5 \quad (3-2)$$

$$C0 = C1 = B0 / 5 \quad (3-3)$$

$$D1 = 0.001 \quad (3-4)$$

Il est préférable de garder ces coefficients comme des nombres simples, par exemple si $A0 = 0.266\dots$, il est préférable de prendre 0.25 ou 0.3.

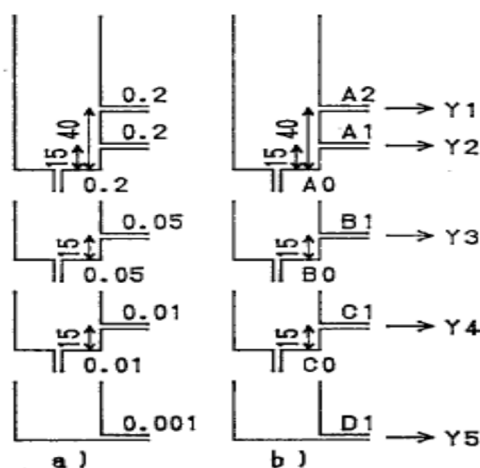


Figure (III.5) : Tank Model initial

Trouvez le plus mauvais point du modèle et ajustez les valeurs des paramètres

L'hydrogramme de sortie du modèle en cours doit être tracé cinq fois comme : Y_5 , $Y_4 + Y_5$, $Y_3 + Y_4 + Y_5$, $Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5$ et $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5$ (voir figure (III.5b)). En comparant les cinq composants de l'hydrogramme calculé avec l'hydrogramme observé, on peut juger quel composant est le plus mauvais. Dans les premiers essais, il peut y avoir beaucoup de mauvais points et on doit sélectionner le plus mauvais.

Comment rendre certains composants plus grands ou plus petits

Si le plus mauvais point est le débit du réservoir supérieur qui est trop petit, il y aura peut-être deux façons de le corriger. Une façon de faire est de prendre A_1 et A_2 plus grands, et l'autre est de considérer A_0 plus petit. Cependant, la meilleure façon de faire est de prendre A_1 et A_2 plus grands, et A_0 plus petit, c'est-à-dire multiplier A_1 et A_2 par k ($k > 1$) et diviser A_0 par k . Si $0 < k < 1$, la sortie du réservoir supérieur deviendra plus petite. La sortie du deuxième réservoir ou du troisième réservoir peut être ajustée de la même manière.

Dans le cas où le jugement montre que la décharge de base est trop faible, la méthode décrite ci-dessus ne peut pas fonctionner car le quatrième réservoir n'a pas de sortie basse. Par conséquent, on doit augmenter l'alimentation en eau vers le quatrième réservoir en mettant le C_0 plus grand. Cependant, cela diminuerait le débit du troisième réservoir et il est donc préférable de fournir plus d'eau au troisième réservoir à partir du deuxième réservoir.

Dans ce cas, l'ajustement pour rendre le débit de base plus grand se fait en augmentant C_0 , B_0 et A_0 comme suit :

$$C_0' = k_1 C_0, \quad B_0' = k_2 B_0, \quad A_0' = k_3 A_0 \quad (3-5)$$

Où $k_1 > k_2 > k_3 > 1$, par exemple :

$$k_1 = 1 + k, \quad k_2 = 1 + k/2, \quad k_3 = 1 + k/4$$

$$\text{Ou } k_1 = k, \quad k_2 = k^{1/2}, \quad k_3 = k^{1/4} \quad (3-6)$$

Comment ajuster la forme de l'hydrogramme

L'ajustement décrit ci-dessus va changer le volume de chaque composant de débit. Mais la forme de l'hydrogramme peut aussi être un problème. Par exemple, le pic de l'hydrogramme calculé peut être trop raide ou trop lisse par rapport à l'observé. Si le pic est trop raide, on doit prendre A_0 , A_1 , A_2 plus petits, en les multipliant par une constante k ($0 < k < 1$). De telle sorte à pouvoir ajuster la forme de l'hydrogramme de chaque composant de débit (Sugawara, 1979).

Comment déterminer les positions (hauteurs) des sorties latérales

Au Japon, l'expérience montre que s'il pleut moins de 15 mm après environ 15 jours secs, il n'y aura pas de changement dans la décharge de l'eau. La position de la sortie latérale basse du réservoir supérieur, $H_1 = 15$, est déterminée à partir de cette expérience.

On sait aussi que quand il pleut plus de 50 mm environ, la décharge augmentera considérablement. La position de la sortie latérale haute du réservoir supérieur, $H_2 = 40$, est déterminée de cette manière, compte tenu également de la perte d'eau à partir du réservoir supérieur par infiltration et ruissellement pendant les précipitations.

Dans le Tank Model de la Figure (III.6), les hauteurs des sorties latérales du deuxième et du troisième réservoir sont fixées à $H_2 = H_3 = 15$. Celles-ci sont déterminées comme étant similaires à $H_1 = 15$, mais sans un bon raisonnement, car H_2 et H_3 ne sont pas aussi efficace comme H_1 . L'effet de H_2 ou H_3 apparaît lorsque le composant du débit du deuxième ou du troisième réservoir disparaît sous une condition sèche (Sugawara, 1979).

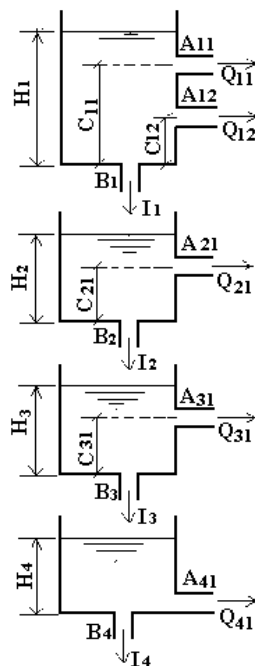


Figure (III.6) : Structure du Tank Model

III.1.2.2. Calibration automatique

L'étalonnage automatique est effectué par la méthode de Trial & Error, exécutée automatiquement par un programme numérique. Le processus de réaction se fait en comparant des critères obtenus de l'hydrogramme observé et l'hydrogramme de sortie calculé du Tank Model fonctionnel. Les deux critères sont le volume du débit et la forme de l'hydrogramme. Les réactions de ces deux critères correspondent à la réaction de déplacement et la réaction de vitesse au réglage automatique. La sortie du Tank Model fonctionnel est composée de constituants (composants), les résultats de la sortie de chacun des réservoirs. Egalement toute

la durée est divisée en sous-périodes, pendant lesquelles chacun de ses composants joue le rôle principal.

On calcule les critères de volume et de la forme en chaque sous-période et on les utilise pour l'ajustement des réservoirs respectifs. Le processus de réaction commence d'un modèle initial, et il converge très vite après plusieurs itérations (en général moins de 15), et le résultat obtenu est très bon (Sugawara. 1979).

III.2-Formulation mathématique du Tank Model(TK):

Depuis son introduction en début des années 1950 par Sugawara (Sugawara, 1979), le modèle réservoir connu sous le nom de Tank Model, a trouvé de plus en plus de larges applications dans le domaine de l'hydrologie, y compris le contrôle des inondations et la modélisation des eaux souterraines. La Figure (III.6) présente la structure générale d'un Tank Model à quatre étages largement appliquée dans la caractérisation du bassin versant. Le Tank Model est un modèle pluie-débit conceptuel caractérisé par plusieurs unités de stockage interconnectés, appelés réservoirs, pour tenir compte des composantes du ruissellement : de surface, intermédiaire, et souterrain. Le premier réservoir est généralement constitué de deux sorties latérales et d'une sortie d'infiltration, tandis que les réservoirs des zones intermédiaires et le réservoir du bas sont munis respectivement, d'une sortie latérale et d'une sortie d'infiltration.

Les composants de ruissellement des orifices latéraux sont généralement exprimés en une fonction linéaire de la charge d'eau dans un réservoir. Chaque fois qu'une relation linéaire ne génère pas des résultats satisfaisants, une relation simple carrée peut également être utilisée (Prasad, 1967) et (Jermar, 1987), (Merabtene, 1999).

Le débit sortant de l'orifice latéral, composante du ruissellement est défini par (Merabtene, 1999) :

$$Q_{ij}(t) = A_{ij}(H_i(t) - C_{ij})^\gamma U(H_i(t) - C_{ij}) \quad (3-7)$$

Où $\gamma=1$, si l'approximation est linéaire, Q_{ij} la composante de ruissellement représentée par le débit sortant de l'orifice latéral j du réservoir i [L/T], A_{ij} coefficient de débit de l'orifice latéral j du réservoir i [L/T], et C_{ij} est la position en hauteur de l'orifice latéral j du réservoir i [L]. Ainsi sur le réservoir le plus bas, la valeur de C_{ij} (i.e., C_{41}) est souvent égale à 0, tandis que le débit traversant l'orifice du bas représente l'écoulement de base (baseflow).

Dans l'équation (3.7) $U(x)=U(H_i - C_{ij})$ est définie par :

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 & \text{si} & & X > 0 \\ U(x) &= 0 & \text{si} & & X \leq 0 \end{aligned} \quad (3-8)$$

L'infiltration au bas du réservoir, ou la percolation en profondeur est exprimée par :

$$I_i = B_i H_i \quad (3-9)$$

Où I_i est l'infiltration à partir du réservoir i vers le réservoir $i+1$ [L/T], et B_i le coefficient d'infiltration.

Le débit total représentant le ruissellement total $QT(t)$, affecté du bruit $w(t)$ accompagnant une observation, pour chaque temps t est donné par :

$$QT(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{J_i} Q_{ij} + w(t) \quad (3-10)$$

Dans la théorie du contrôle, l'équation (3) est appelée équation d'observation, où i est l'indice du réservoir ($i = 1, \dots, n = 4$), et j l'indice de la sortie latérale dans le réservoir ($j = 1, \dots, J_i$). Selon la structure schématique, du modèle à quatre réservoirs, indiquée à la figure 1, $J_i = 2$ si $i = 1$, $J_i = 1$ pour ($i = 2, 3$ et 4).

Le système d'équations du modèle est formulé par le système d'équations représentant le changement du niveau d'eau dans chaque réservoir en tenant compte d'un bruit blanc $u(t)$:

$$\frac{dH_1}{dt} = (Rain(t) - Evt(t) - Q_{11}(t) - Q_{12}(t) - I_1(t)) + u_1(t)$$

Pour $i=1; j=1$.

$$\frac{dH_i}{dt} = (I_{i-1}(t) - Q_{ij}(t) - I_i(t) + u_i(t))$$

Pour $i=2,3$ ou $4, j=1$.(3-11)

Où $Rain(t)$ et $Evt(t)$ sont respectivement : la précipitation et l'évapotranspiration en [L/T]. Les paramètres A_{ij} , B_i , C_{ij} , et la charge d'eau H_i sont les variables inconnues du Tank Model à calibrer. La méthodologie développée intègre la technique du filtre de Kalman pour optimiser les paramètres du modèle en mode adaptatif, comme on le verra plus loin.

III.3-Applications des modèles conceptuels

Les domaines d'applications des modèles conceptuels se résument (Perrin et al., 2007):

- **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 courtes, 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 observées 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 télégénérateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observées) ;

- **La prévision à court terme (quelques heures à quelques jours)** : elle est particulièrement utile pour les événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions.
- **La prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois)**: elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;
- **La détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant**: l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002; Andréassian *et al.*, 2003) ;
- **La gestion ou le dimensionnement d'ouvrages** : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre de mieux gérer l'ouvrage (Yang *et al.*, 1991).

III.4-Applications du Tank Model :

Le Tank Model est un modèle de construction simple malgré ses nombreux paramètres à caler. En effet, cette simplicité a contribué énormément au développement de nombreux modèles conceptuels pour différentes régions.

Ce modèle qui a été développé par Sugawara (1979, 1995) contient quatre réservoirs, et il prend en considération les échanges atmosphériques vers l'extérieur.

Notons également que le Tank Model a été testé sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en Asie (Japon, Indonésie, Corée du sud, Singapour, etc.), mais aussi dans d'autres pays d'Afrique (Congo et la république centrafricaine) (Lisika *et al.*, 2016). Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km².

Ce modèle n'a jamais été appliqué en Algérie si ce n'était dans le cadre de ce travail, donc le choix de ce modèle a été pris pour voir le comportement du Tank Model sur les bassins versants algériens (humides et semi arides).

III.5-Introduction du Filtre de Kalman :

La gestion des crues nécessite des prévisions en temps réel des débits des bassins versants. En 1960, R.E. Kalman a publié un article intitulé "A new Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". Ses recherches le mènent à y décrire un processus qui sera connu comme le Filtre de Kalman. Celui-ci est l'un des outils statistiques utilisés dans le domaine de la transformation pluie-débit depuis 1980.

La modélisation de la réponse d'un bassin versant aux forçages atmosphériques, ou modélisation pluie-débit, en raison de la complexité des processus transformant la pluie en débit, introduit beaucoup d'incertitudes dans les sorties. Nash & Sutcliffe en 1970 ont déjà affirmé que la prévision opérationnelle des crues exige, en plus du modèle pluie-débit, une méthode pour la correction continue de la prévision à partir de l'erreur observée des premières prévisions (feedback). Ainsi la performance de la prévision des modèles pluie-débit peut être améliorée avec l'aide de cette information provenant de ce feedback. Les procédures de mise à jour actualisent une ou plusieurs des variables suivantes : variables d'entrée, variables d'état, paramètres, ou variables de sortie.

Parmi les techniques permettant de réduire ces incertitudes figurent les procédures de mise à jour qu'on peut combiner avec le modèle pluie-débit. Ces procédures peuvent être représentées soit par des méthodes automatisées (Filtre de Kalman), soit par des méthodes manuellement interactives (Trial & Error).

Le Filtre de Kalman est un ensemble d'équations mathématiques qui permettent une meilleure estimation de l'état actuel du système et par conséquent, facilite l'amélioration de l'état futur.

Ce Filtre est utilisé pour l'estimation de l'état du système à partir de :

- L'équation d'état ou d'évolution, et la loi de comportement pour les sorties en fonction des variables d'état;
- Les hypothèses sur les caractéristiques des erreurs de modélisation, et de mesure;
- Les informations sur les conditions initiales.

On parle de filtrage lorsque l'instant auquel l'estimation est réalisée correspond à celui où les observations sont obtenues.

Dans cette partie, nous allons présenter le Filtre de Kalman en vue de la mise à jour des variables d'état du Tank Model.

III.6-Présentation du Filtre de Kalman

- *Paternité*

Le Filtre de Kalman doit son nom au mathématicien et informaticien américain d'origine hongroise Rudolf Kalman bien que Thorvald Nicolai Thiele (1838) et Peter Swerling aient développé un algorithme similaire avant lui. La paternité du Filtre fait l'objet d'une petite controverse dans la communauté scientifique. Ce dernier a été décrit dans diverses publications par Swerling en 1958, Kalman en 1960 et Kalman-Bucy en 1961.

Stanley Schmidt (1966) est reconnu comme ayant réalisé la première mise en œuvre du Filtre. C'était lors d'une visite de Rudolf Kalman au « NASA's Ames Research Center » qu'il vit le potentiel de son Filtre pour l'estimation de la trajectoire du programme Apollo. Ce qui a conduit à l'utilisation du Filtre dans l'ordinateur de navigation.

Une grande variété de Filtres de Kalman a été, depuis, développée à partir de la formulation originale dite Filtre de Kalman simple. Schmidt développa le Filtre de Kalman Étendu, Bierman (1974), Thornton et bien d'autres développèrent toute une gamme de Filtres racine carrée.

Le Filtre le plus utilisé est vraisemblablement la phase-lockedloop, largement répandue dans les radios, ordinateurs, équipement de communication, etc.

- *Principe*

Pour comprendre un peu mieux le fonctionnement du Filtre de Kalman et surtout son utilité, nous allons prendre un exemple de la vie quotidienne où on l'utilise sans se rendre compte (Enzo C and al.,2010) :

On Suppose que nous sommes sur un bateau sur lequel nous ramons. Pour savoir dans combien de temps nous atteindrons le port, nous disposons d'un certain nombre d'informations, plus ou moins précises :

- Un GPS, pour nous indiquer notre position,
- Nos yeux nous donnent une autre estimation de notre distance au port, ainsi que des obstacles à contourner,
- Notre connaissance approximative de notre vitesse de déplacement sur le début du parcours.

Notre cerveau réalise (sans le savoir, comme souvent) un Filtre de Kalman pour obtenir la meilleure approximation du temps qu'il nous faudra pour arriver. D'après ces données, il établit un "modèle mathématique" de la réalité en approximant le lien entre la vitesse et la position. Il fait ensuite une approximation de la position et de la vitesse actuelles en donnant plus d'importance au capteur dans lequel il a le plus confiance. Ainsi, entre nos yeux et le GPS, il y a tout à parier que l'on préférera suivre la distance donnée par l'appareil électronique. Dans un deuxième temps, nous adapterons notre estimation suivant nos

nouvelles mesures. Par exemple, en nous fatigant, nous allons moins vite et donc nous savons que nous repoussons notre arrivée d'autant.

C'est exactement ainsi que fonctionne le Filtre de Kalman dans le centre de calcul d'un bateau ou d'une fusée. Il est comme un modèle mathématique, le plus proche de la réalité possible, et des mesures provenant de ses différents capteurs, il a donc besoin de les comparer intelligemment pour connaître sa position et arriver à bon port. Comme toujours pour un ordinateur, "intelligemment" signifie "grâce à des équations mathématiques avancées", ce sont donc ces équations que nous allons présenter par la suite.

- ***Points forts***

La force de ce Filtre est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même.

En effet, pour appliquer un Filtre de Kalman, il faut avant tout modéliser le système pour lequel on veut estimer les paramètres, de manière linéaire. (Des variantes du Filtre de Kalman existent pour la prise en compte de modèles non linéaires).

Dans une méthode d'estimation classique (méthode des moindres carrés), une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur au niveau de l'estimation. La force du Filtre de Kalman est d'intégrer un terme d'imprécision sur le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation (pour peu que les erreurs restent raisonnables).

Un autre point fort du Filtre de Kalman (mais que l'on retrouve aussi dans la méthode des moindres carrés) est sa capacité à déterminer l'erreur moyenne de son estimation. En effet, l'outil Kalman fournit un vecteur contenant les paramètres estimés, mais aussi une matrice de covariance de l'erreur. Cette matrice nous renseigne donc sur la précision de l'estimation, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications. (Ferdinand P et al, 2012).

Un autre atout du Filtre de Kalman est que la convergence de cette erreur est garantie.

- ***Limites***

Le Filtre de Kalman est donc une méthode d'estimation et de prédiction puissante prenant en compte les modélisations du système. Néanmoins, ce filtre n'est pas forcément l'outil à appliquer dans tous les cas. En effet, comme nous l'avons vu, le développeur a besoin de modéliser le système assez précisément afin de désigner un filtre efficace. Le problème est que certains systèmes sont difficilement modélisables et, encore moins linéairement.

Dans le cas où la modélisation est trop approximative, le filtre n'est pas assez performant et l'erreur des estimations ne convergera pas assez rapidement, elle restera grande. Pour pallier à ce problème de modélisation linéaire du système, un Filtre de Kalman Étendu (Extended) a été développé et permet de prendre en compte une modélisation non linéaire. Néanmoins, cette technique a quelques défauts. En premier lieu, la covariance de l'erreur (la précision des

estimations) ne converge pas obligatoirement. Le second défaut est son coût calculatoire plus important. En effet, de nouvelles matrices coûteuses rentrent en jeu (les matrices des dérivés partielles des équations d'états et de mesures modélisant le système), ce qui peut être une limite à son utilisation, surtout dans des systèmes embarqués très restreint au niveau de la puissance de calcul.

Le Filtre de Kalman est une méthode visant à estimer des paramètres d'un système évoluant dans le temps à partir de mesures bruitées. Cependant, une autre limite importante d'une telle méthode est que ce filtre permet de prendre en compte uniquement un modèle de bruit Gaussien. Le bruit peut en général être modélisé de façon Gaussienne, mais dans certains cas, un autre type de bruit est requis (notamment en traitement d'images où l'on utilise fréquemment des bruits de Poisson). Cette restriction limite donc l'utilisation du Filtre de Kalman.

Le Filtre de Kalman est donc une méthode d'estimation intéressante, mais qui n'est utilisable que lorsque l'on peut décrire assez précisément notre système. S'il est impossible de trouver une modélisation correcte du système, il est alors préférable de se tourner vers d'autres méthodes (comme la méthode de Monte-Carlo, qui est une méthode statistique, mais qui requiert une importante puissance de calcul). (Ferdinand P and al, 2012).

III.7-Fonctionnement du Filtre de Kalman

L'algorithme du Filtre de Kalman est constitué par trois composants : le modèle de système (System Model), le modèle de mesure (Measurement Model), la procédure du Filtre de Kalman (Lee Y. H et Singh V. P, 1999).

III.7.1.Modèle de Système

Le modèle de système à temps discret peut être obtenu dans les termes de matrice comme le suivant (Lee Y. H et Singh V. P, 1999) :

$$X(k) = \Phi(k|k-1) \cdot X(k-1) + \Gamma(k|k-1) \cdot w(k-1) \quad (3-12)$$

Avec :

$X(k) \in \mathfrak{R}^n$: Vecteur d'état au temps k ;

$\Phi(k|k-1)$: Matrice de transition d'état au temps k-1 à k de dimension $(n \times n)$;

$X(k-1) \in \mathfrak{R}^n$: Vecteur d'état au temps k-1 ;

$\Gamma(k|k-1)$: Matrice de transition de bruit de système au temps k-1 à k de dimension $(n \times n)$ par lequel le bruit précédent (erreur) transite vers le bruit actuel ;

$w(k-1) \in \mathfrak{R}^n$: Vecteur de bruit blanc Gaussien de système au temps k-1.

III.7.2.Modèle de Mesure

Le vecteur d'état $X(k)$ du système est observé à travers un système de mesure qui contient en soi une erreur (bruit). Donc le vecteur de mesure $Z(k)$ peut être décrit comme une combinaison linéaire d'un vecteur d'état $X(k)$ et d'un vecteur d'erreur de mesure $v(k)$:

$$Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k) \quad (3-13)$$

Avec :

$Z(k) \in \mathfrak{R}^n$: Vecteur de mesure au temps k ;

$H(k)$: Matrice de transition de mesure au temps k de dimension $(1 \times n)$;

$v(k) \in \mathfrak{R}^n$: Vecteur de bruit blanc Gaussien de mesure au temps k .

Les variables aléatoires $w(k)$ et $v(k)$ représentent le processus et le bruit de mesure. Ils sont supposés être des bruits blancs Gaussiens indépendants avec distribution de probabilité normale :

$$p(w(k)) \sim N(0, M(k)), \quad p(v(k)) \sim N(0, R(k))$$

$M(k)$ et $R(k)$ sont la covariance de bruit de processus et la covariance de bruit de mesure, respectivement (Liu J and al, 2010).

III.7.3.Procédure de Filtre de Kalman Standard

Le fonctionnement du Filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes(Ferdinand P and al, 2012):

- Une première étape de **prédiction** de l'estimation selon le modèle du système. Pour ce faire, le Filtre de Kalman reprend l'estimation précédente des paramètres et de l'erreur et prédit les nouveaux paramètres et la nouvelle erreur en fonction de la modélisation du système.
- La seconde étape va faire la **mise à jour** de cette prédiction grâce aux nouvelles mesures. Ces mesures (par définition bruitées) vont permettre d'obtenir une estimation des paramètres et de l'erreur à partir de la prédiction faite. Si jamais le modèle comporte des erreurs, cette étape de mise à jour permettra de les rectifier.

III.7.3.1.Prédiction

Supposant que l'estimation d'état $X(k-1|k-1)$ et la covariance $P(k-1|k-1)$ de l'estimation d'erreur d'état ont été données au temps $k-1$, et ensuite, la valeur de la prédiction d'état $\bar{X}(k|k-1)$ est donnée comme suit(LIU J and al, 2010) :

$$\bar{X}(k|k-1) = \Phi(k|k-1) \cdot X(k-1|k-1) \quad (3-14)$$

Et la prédiction de la covariance $\bar{P}(k|k-1)$ est donnée comme suit (LIU J and al, 2010):

$$\bar{P}(k|k-1) = \Phi(k|k-1) \cdot P(k-1|k-1) \cdot \Phi(k|k-1)^T + M(k-1) \quad (3-15)$$

III.7.3.2.Mise à jour (Update)

En connaissant la valeur de prédiction de l'état $\bar{X}(k|k-1)$ et le vecteur de mesure (observation) $Z(k)$ du modèle, la valeur d'estimation d'état $X(k|k)$ est obtenue en filtrant l'erreur de mesure avec l'utilisation du gain de Kalman $K(k)$ comme suit :

$$X(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + K(k) \cdot \bar{Y}(k) \quad (3-16)$$

Où $\bar{Y}(k)$ c'est l'innovation (bruit de mesure) (Ouachani R and al.,2007), tel que :

$$\bar{Y}(k) = Z(k) - H(k) \cdot \bar{X}(k|k-1) \quad (3-17)$$

$K(k)$ est le gain de Kalman optimal, qui sert à innover la prédiction d'état, tel que :

$$K(k) = \bar{P}(k|k-1) \cdot H(k)^T \cdot S(k)^{-1} \quad (3-18)$$

Où $S(k)$ c'est la covariance de l'innovation, tel que :

$$S(k) = H(k) \cdot \bar{P}(k|k-1) \cdot H(k)^T + R(k) \quad (3-19)$$

La covariance du bruit d'état au temps k est donnée comme suit:

$$P(k|k) = (I - K(k) \cdot H(k)) \cdot \bar{P}(k|k-1) \quad (3-20)$$

Avec :

I : matrice identité aux dimensions adéquates.

La prochaine étape du temps $k+1$, l'estimation d'état $X(k|k)$ et la covariance du bruit de système $P(k|k)$ sont considérés comme des données d'entrée initiales et la procédure est répétée comme mentionné ci-dessus.

III.7.4.Etapes du Filtre de Kalman

Pour obtenir l'état optimal du système, on doit combiner les observations avec l'information fournie par le modèle.

L'algorithme suivant indique les différentes étapes qui permettent d'obtenir un état estimé à chaque instant (Figure (III.7)).

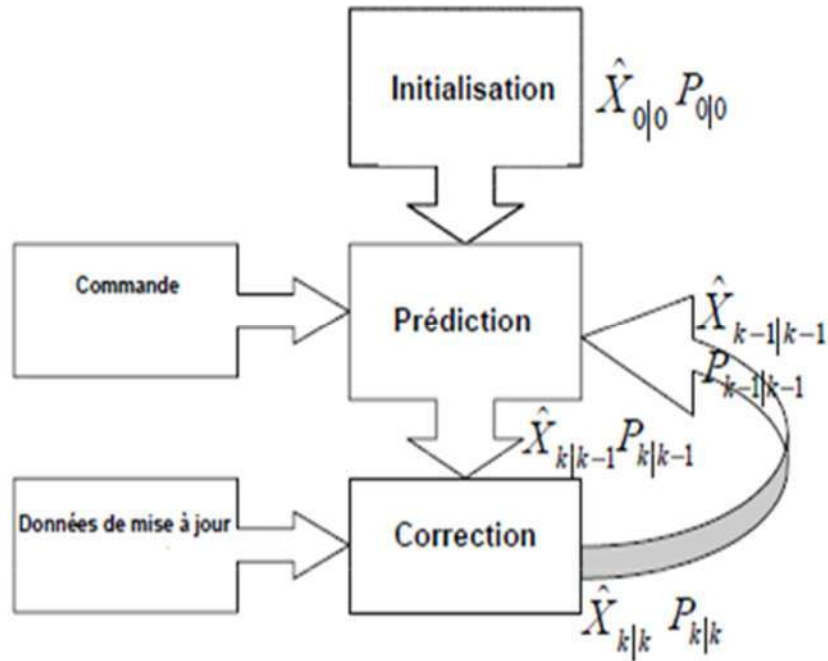


Figure (III.7) : Etapes du Filtre de Kalman (NDJENG N,2009)

III.8-Formulation du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Standard

Cette section décrit comment le Tank Model est couplé au Filtre de Kalman. Dans ce couplage, on utilise une approche de la mise à jour des paramètres, où le vecteur d'état du Filtre de Kalman est défini comme le jeu de paramètres du Tank Model. Cette configuration permet au Filtre de Kalman de mettre à jour le jeu de paramètres du Tank Model pour chaque pas de temps, et donc, permet de modifier le comportement du modèle.

III.8.1.Modèle de Système

Le vecteur d'état du modèle de système est composé par les paramètres du Tank Model. Par conséquent, le vecteur d'état $X(k) : (14 \times 1)$ est donné comme suit (Lee Y. H et Singh, 1999):

$$X(k) = [A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{31}, A_{41}, B_1, B_2, B_3, B_4, C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{31}, C_{41}]^T \quad (3-21)$$

La matrice de transition d'état $\Phi(k) : (14 \times 14)$, et la matrice de transition de bruit de système $\Gamma(k|k-1) : (14 \times 14)$ sont supposées comme matrices d'identités I , ensuite le modèle du système s'écrit :

$$X(k) = X(k-1) + w(k); \quad w(k) \sim N(0, M(k)) \quad (3-22)$$

III.8.2. Modèle de Mesure

La variable d'observation appliquée au Tank Model est le débit Q. Pour cela, le modèle de mesure peut être écrit comme suit (Lee Y. H et Singh V. P , 1999) :

$$Q(k) = Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k); v(k) \sim N(0, R(k)) \quad (3-23)$$

Où $\mathbf{H}(k)$: (1×14) est la matrice de transition de mesure (observation) définie par :

$$H(k) = [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (3-24)$$

Où h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 sont les hauteurs d'eau à la sortie de chaque réservoir, respectivement.

Ces hauteurs sont définies par :

$$\begin{aligned} h_1 &= H_1 - C_{11}, & h_2 &= H_1 - C_{12}, & h_3 &= H_2 - C_{21}, \\ h_4 &= H_3 - C_{31}, & h_5 &= H_4 - C_{41}. \end{aligned} \quad (3-25)$$

III.8.3. Algorithme récursif du couplage

Pour coupler le Tank Model au Filtre de Kalman, on doit utiliser les équations définies ci-dessus;

Tout d'abord, en premier lieu, on calcule la prédiction d'état $\bar{\mathbf{X}}(k|k-1)$ et la prédiction de la covariance $\bar{\mathbf{P}}(k|k-1)$. En deuxième lieu, on calcule le gain de Kalman ; ensuite, on trouve l'estimation d'état $\mathbf{X}(k|k)$ et la covariance du bruit de système $\mathbf{P}(k|k)$.

Finalement, comme tous les paramètres sont mis à jour, les débits latéraux de ruissellement et les débits d'infiltration sont calculés.

Après la mise à jour de tous ces paramètres, le processus continu pour le prochain pas de temps.

L'organigramme de l'algorithme de couplage du Tank Model au Filtre de Kalman est donné par la Figure (III.8) :

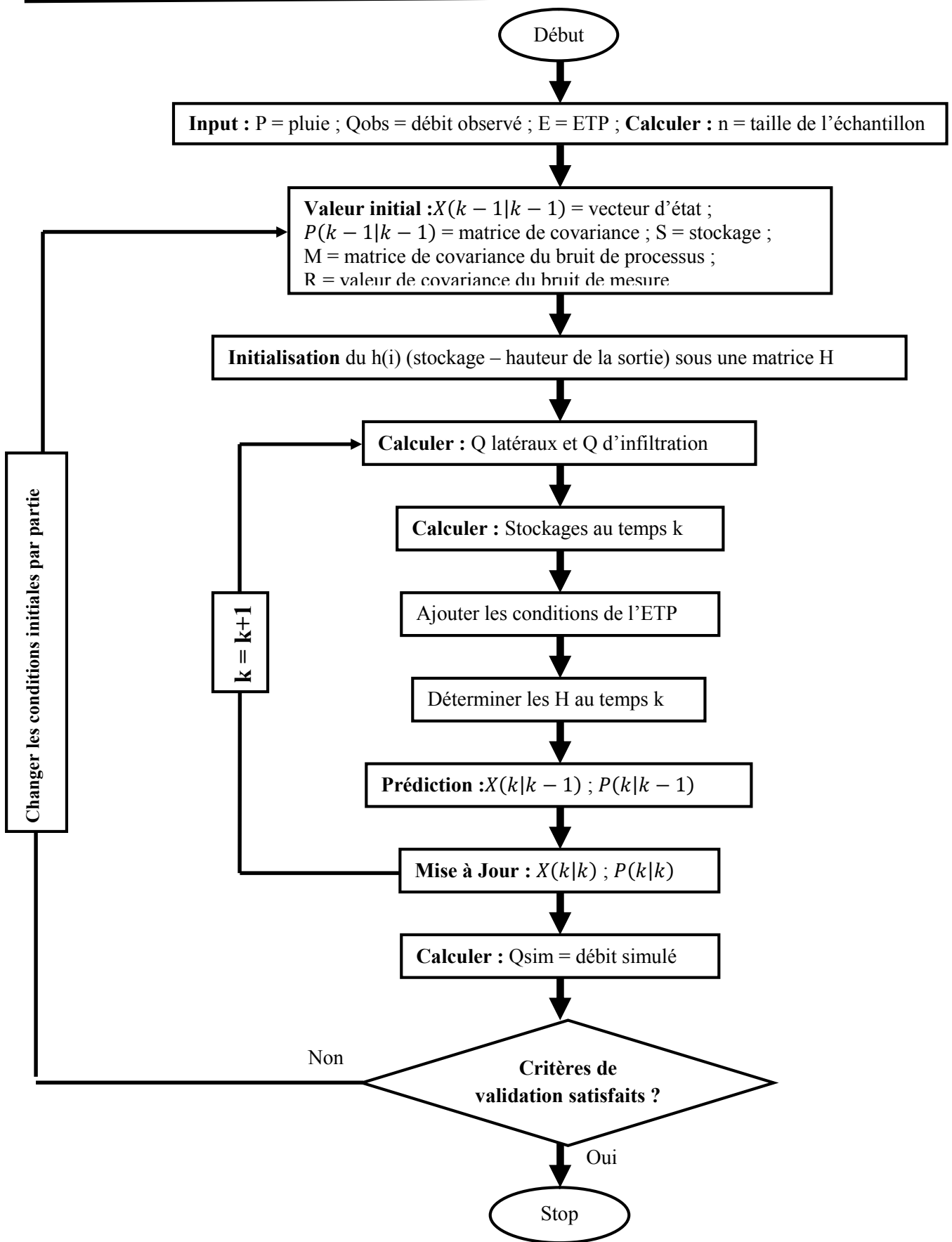


Figure (III.8) : Organigramme du Couplage Tank Model - FK standard

III.9-Filtre de Kalman Étendu (Extended) pour les systèmes non linéaires

Lorsqu'on souhaite appliquer un Filtre de Kalman pour estimer des paramètres d'un système, la première chose à faire est de modéliser notre problème. Il se trouve que dans certain cas, les équations qui permettent de modéliser le problème ne sont pas linéaires. De ce fait, le Filtre de Kalman n'est plus applicable tel quel. Heureusement, il est tout de même possible d'estimer les paramètres du système à l'aide d'un Filtre de Kalman dit Étendu. Celui-ci permet en effet, de linéariser localement le problème, et donc d'appliquer les équations du Filtre de Kalman classique (Ferdinand P and al, 2011).

- **Fonctionnement**

Le principe d'un Filtre de Kalman Étendu est très simple. Tout d'abord, les équations d'état et les équations liant l'état précédent à l'instant suivant qui étaient linéaires dans le cas du Filtre de Kalman classique sont maintenant non linéaires. Il est donc impossible de l'écrire sous forme matricielle.

On remplace donc les équations (Enzo C and al.,2010) :

$$\begin{cases} X(k) = \Phi(k/k-1) \cdot X(k-1) + w(k-1) \\ Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k) \end{cases} \quad \text{Par}$$

$$\begin{cases} X(k) = f(X(k-1)) + w(k-1) \\ Z(k) = h(X(k)) + v(k) \end{cases} \quad (3-26)$$

On est donc obligé d'appliquer ces équations non linéaires pour le calcul de la prédiction et la mise à jour du vecteur d'état. Les équations de Kalman deviennent donc (Ferdinand P and al, 2011) :

Prédiction

$$\bar{X}(k|k-1) = f(X(k-1|k-1)) \quad (3-26)$$

$$\bar{P}(k|k-1) = \Phi(k|k-1) \cdot P(k-1|k-1) \cdot \Phi(k|k-1)^T + M(k-1) \quad (3-27)$$

Après avoir obtenu la valeur des sorties du système, nous pouvons calculer la valeur du gain de Kalman $K(k)$, puis la nouvelle valeur de l'état estimé, pour finalement actualiser la valeur de la matrice de covariance (Enzo C and al.,2010). Pour ce faire, nous utilisons les équations suivantes, appelées équations d'actualisation (mise à jour) :

Mise à jour

$$X(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + K(k) \cdot \left(Z(k) - h(\bar{X}(k|k-1)) \right) \quad (3-28)$$

$$K(k) = \bar{P}(k|k-1) \cdot H(k)^T \cdot (H(k) \cdot \bar{P}(k|k-1) \cdot H(k)^T + R(k))^{-1} \quad (3-29)$$

$$P(k|k) = (I - K(k) \cdot H(k)) \cdot \bar{P}(k|k-1) \quad (3-30)$$

Il reste un problème en ce qui concerne le calcul de la covariance de l'erreur et du gain de Kalman. En effet, on utilise toujours les matrices d'observation et de transition \mathbf{H} et Φ . Pour pouvoir utiliser ces formules, il faut donc que l'on linéarise localement les fonctions \mathbf{h} et \mathbf{f} . On obtient donc les matrices d'observation et de transition en prenant les matrices des dérivées partielles des équations non linéaires (appelé aussi Jacobiennes).

$$H(k) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\bar{x}(k|k-1)} \quad (3-31)$$

$$\Phi(k|k-1) = \left. \frac{\partial f}{\partial X} \right|_{\bar{x}(k-1|k-1)}$$

Avec ces Jacobiennes, il est donc possible d'appliquer le Filtre de Kalman tel que défini ci-dessus. Il suffit de recalculer les matrices aux dérivées partielles à chaque nouvel échantillon à traiter et d'utiliser ces matrices dans les équations.

Par contre, on se rend bien compte que l'on linéarise localement les équations afin d'appliquer le Filtre de Kalman. Cette linéarisation est locale, ce qui entraîne donc une convergence locale du Filtre de Kalman Etendu. Ce dernier ne garantit donc pas une convergence globale (à l'inverse du Filtre de Kalman classique). La stabilité d'un EKF est donc plus difficile à garantir et dépend souvent de sa bonne initialisation (Ferdinand P and al, 2011).

III-10-Formulation mathématique du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu :

Les équations d'état et d'observation du système du Filtre de Kalman sont exprimées sous forme discrète comme suit :

Equation d'état du système: $X(k+1) = \Phi(k)X(k) + \alpha(k) + u(k) \quad (3-32)$

Equation d'observation : $Z(k) = H(k)X(k) + \beta(k) + w(k) \quad (3-33)$

Ou à chaque pas de temps k , $X(k)$ est le vecteur qui sera estimé, $H(k)$ et $\Phi(k)$ sont les matrices de transition connues, $\alpha(k)$ un vecteur constant connu, $u(k)$ le système du vecteur Gaussien : bruit blanc.

$Z(k)$ le vecteur observé, $\beta(k)$ vecteur constant connu, et $w(k)$ le vecteur bruit blanc Gaussien de l'observation, (Kitanadis et Bras (1980), Bras et Rodriguez-Iturbe (1985)).

Pour l'application du Filtre de Kalman au Tank Model, les équations d'état du système et d'observation ((3-32) et (3-33)) sont données par les équations (3-9) et (3-10). Le vecteur d'état du système : X pour les quatre étages du Tank Model (Figure (III.6)) est donné par (Merabtene, 1999) :

$$\begin{aligned} X &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{17}]^T \\ &= [H_1 H_2 \ H_3 H_4 A_{11} A_{12} A_{21} \ A_{31} A_{41} B_1 B_2 B_3 B_4 C_{11} C_{12} C_{31} C_{41}]^T \end{aligned} \quad (3-34)$$

Si on définit par $F(X)$ la fonction du vecteur état du système X donnée par :

$$F = [f_1, f_2, \dots, f_{17}]^T \quad (3-35)$$

L'équation de transition $\frac{dX}{dt}$ représentant la dynamique du système de X et sera exprimée par :

$$\frac{dX}{dt} = F(X) \quad (3-36)$$

Comme spécification de l'équation (3-10) sur chaque étage du Tank Model, on obtient la forme discrète de l'équation (3-32) comme suit :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(X) = Rain(t) - Evt(t) - x_5(x_1 - x_{14})U(x_1 - x_{14}) - x_6(x_1 - x_{15})U(x_1 - x_{15}) - x_{10}x_1 + u_1(t) \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_2(X) = x_{10}x_1 - x_7(x_2 - x_{16})U(x_2 - x_{16}) - x_{11}x_2 + u_2(t) \\ \frac{dx_3}{dt} &= f_2(X) = x_{11}x_2 - x_8(x_3 - x_{17})U(x_3 - x_{17}) - x_{12}x_3 + u_3(t) \\ \frac{dx_4}{dt} &= f_4(X) = x_{12}x_3 - x_9x_4 - x_{13}x_4 + u_4(t) \\ \frac{dx_i}{dt} &= f_i(X) = 0 \quad (i=5, 6, \dots, 17) \end{aligned} \right. \quad (3-37)$$

L'expansion en série de Taylor de la fonction vectorielle $F(X)$ autour d'un point d'abscisse $X = X^*$, en négligeant les termes d'exposant supérieurs, est donnée par:

$$F(X) = J(X^*)(X) + B(X^*) + u \quad (3-38)$$

Où :

J est la matrice Jacobienne de la fonction vectorielle $F(X)$,

$$B(X^*) = F(X^*) - J(X^*)(X^*) \quad (3-39)$$

Et

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_{17}]^T \quad (3-40)$$

En utilisant la transformation ci-dessus, l'équation de transition (3-36) s'écrira :

$$\frac{dX}{dt} = J(X^*)X + B(X^*) + u \quad (3-41)$$

La matrice Jacobienne J est fonction de la dérivée $\delta(x)$ de la fonction unité $U(x)$ et définie par :

$$\delta(x) = \frac{dU(x)}{dx}$$

Ainsi, selon l'équation (3-42) :

$$U_\varepsilon(x) = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{x}{\varepsilon} \right) + \frac{\pi}{2} \right\} \quad (3-42)$$

Si ε est très petit (tend vers 0), $U_\varepsilon(x)$ représente la fonction $U(x)$ tel qu'elle a été définie précédemment en (3-8). La fonction dérivée de $U_\varepsilon(x)$ peut alors s'écrire :

$$\frac{dU_\varepsilon(x)}{dx} = \delta_\varepsilon(x) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 - x^2} \right) \quad (3-43)$$

En utilisant la linéarisation ci-dessus pour les fonctions vectorielles non linéaires avec un pas de temps discret Δt , l'équation (3.32) peut être finalement réduite à :

$$X(k+1) = \phi(X^*)X(k) + \Gamma(X^*)B(X^*) + \Gamma(X^*)u \quad (3.44)$$

Où

$$\phi(X^*) = \exp(J\Delta t) = I_u + J\Delta t + \dots + \left(\frac{J\Delta t}{m!} \right)^m \quad (3.45)$$

$$\Gamma(X^*) = [\exp(J\Delta t) - I_u] - J^{-1} = \Delta t \left[I_u + \frac{J\Delta t}{2!} + \dots + \frac{(J\Delta t)^{m-1}}{m!} + \dots \right] \quad (3.46)$$

En comparant l'équation (3.44) à (3.32) on aura :

$$\Phi(k) = \phi(X^*) \quad (3.47)$$

$$\alpha(k) = \Gamma(X^*)B(X^*) \quad (3.48)$$

$$u(k) = \Gamma(X^*)u \quad (3.49)$$

L'application du même développement à l'équation d'observation(3.33) aboutit à :

$$\beta(k) = g(X^*) - J_g(X^*)X^*(k) \quad (3.50)$$

$$H(k) = J_g(X^*) \quad (3.51)$$

Où J_g est la matrice Jacobienne de la fonction vectorielle g (c'est-à-dire, g est le débit total représentant le ruissellement et est donné par l'équation (3.9)), (Merabtene,1999).

Une fois tous les paramètres précédents fixés, il suffit d'appliquer l'algorithme de Prédiction - correction tel que montré dans les équations de (3-26) à (3-30).

Dans le programme de calcul que nous avons élaboré nous avons pris :

SDW : est l'écart type du bruit d'observation, c'est à dire $w(k) = (SDW)^2$.

Pour le bruit du système : $u(k) = P(k/k)$. SNPER, avec : SNPER : Pourcentage du bruit du système.

III.11. Approches Updating et Not updating :

L'approche 'Updating' : Dans ce cas tous les paramètres (x_1, x_2, \dots, x_{17}) du 'Tank Model' seront actualisés en chaque pas de temps.

L'approche 'Not-updating': Dans cette approche les paramètres structurels du tank sont fixes, seuls les paramètres dynamiques changent, dans notre cas les niveaux d'eau dans les réservoirs (H1, H2, H3, H4).

III.12. Les applications du Filtre de Kalman

III.12.1 Dans les divers domaines

Les applications du Filtre de Kalman sont nombreuses dans les métiers de l'ingénieur. Ce dernier permet de donner un estimé de l'état de système à partir d'une information a priori sur l'évolution de cet état (modèle) et de mesures réelles, il est utilisé dans les **Systèmes de localisation dynamique, Centrale inertielle, Pilote automatique, Cartographie et localisation simultanées (SLAM), Système de positionnement par satellites (KALMAN R. E, 1960).**

Il sera utilisé aussi pour estimer des conditions initiales inconnues (**balistique**), prédire des trajectoires de mobiles (**trajectographie**), localiser un engin (**navigation, radar,...**) et également pour implanter des lois de commande fondées sur un estimateur de l'état et un retour d'état (**Commande Linéaire Quadratique Gaussienne**). Les bases de traitement de signal sur lesquelles repose le Filtre de Kalman seront également utiles à tout ingénieur confronté à des problèmes de définition de protocoles d'essais, de dépouillements d'essais et également d'**identification paramétrique**, c'est-à-dire la détermination expérimentale de certains paramètres du modèle (Alazard D ,2006).

III.12.2 En hydrologie

Les techniques d'assimilation des données sont couramment employées dans des domaines aussi différents que l'hydrologie, la médecine ou la physique spatiale, notamment pour l'estimation des trajectoires lorsque les moyens de mesure sont multiples. Le Filtre de Kalman est adapté au filtrage linéaire récursif de données discrètes. Le filtre fournit une estimation du vecteur d'état et de sa matrice de covariance des erreurs qui contient les informations concernant la précision des variables (Ouarchani R and al ,2007).

Pour les systèmes linéaires, c'est le Filtre de Kalman Standard qui est appliqué. Cependant, pour les systèmes non-linéaires, une variante du filtre, qui est le Filtre de Kalman Etendu, et dans laquelle le modèle est linéarisé pourrait être envisagée. Plusieurs nouvelles variantes du Filtre de Kalman sous-optimal ont été développées durant les dernières années, tels que le Filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) et le Filtre de rang réduit. Ces variantes ont été principalement appliquées en météorologie et en océanographie par Hoteit en 2001, mais jusqu'ici leur emploi en modélisation hydrologique est limité.

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses études utilisant le Filtre de Kalman dans la modélisation pluie-débit ont été présentées dans la littérature par exemple Bálint en 2002. Un grand nombre de ces études a utilisé des modèles très simples de prévision du débit, tel que les modèles Auto-Regressive à Moyenne Mobile (ARMA) et les modèles à réservoir linéaire. Peu d'études ont été réalisées sur le Filtre de Kalman en combinaison avec des approches plus avancées de modèle conceptuel pluie-débit. Quelques exemples importants et représentatifs des Filtres de Kalman en combinaison avec des modèles pluie-débit sont les contributions de Wood & Szöllösi-Nagy en 1978 et Kitanidis & Bras en 1980. Un Filtre Kalman Etendu a été intégré dans le Système de Prévision de Rivière du Service National Météo (NWSRFS) des Etats Unis qui est basé sur le modèle conceptuel non-linéaire Sacramento d'humidité du sol. L'état du système y est représenté par le contenu en eau dans les différents réservoirs constituant le modèle et les sorties sont les débits. Wood & O'Connell en 1985 ont intégré dans le NWSRFS un Filtre de Kalman Standard. Ils ont testé différentes méthodes pour l'estimation simultanée des variables d'état et des paramètres. Les concepts de l'hydrogramme unitaire et de la précipitation antérieure ont été utilisés par Husain en 1985 avec un Filtre de Kalman Standard pour simuler divers événements de crue. Georgakakos en 1986 a développé un modèle hydrométéorologique conceptuel qui consiste en un modèle de la précipitation, un modèle d'humidité du sol (une modification du modèle Sacramento d'humidité du sol) et un modèle d'acheminement de l'écoulement. Le modèle stochastique a été traduit en une forme d'état spatial et a été utilisé en combinaison avec un Filtre de Kalman Etendu, donnant une bonne performance comparativement à d'autres méthodes de prévision. Le même modèle conceptuel a été utilisé par Puente & Bras en 1987 pour tester plusieurs variantes du Filtre de Kalman non-linéaire. Georgakakos & Smith aussi en 1990 ont utilisé le même modèle d'humidité du sol et un modèle d'écoulement en combinaison avec un Filtre de Kalman Etendu. Ils rapportent une prévision généralement améliorée et concluent que cette approche est faisable dans un environnement opérationnel pour la prévision en temps réel (OUACHANI R and al.,2007). Lee & Singh ont intégré un Filtre de Kalman Standard avec le modèle de la cascade de réservoirs linéaires de Nash et un modèle à réservoir (LEE Y. H et

SINGH V. P , 1999). Ils ont trouvé que la précision des deux modèles a augmenté, son incertitude ayant été réduite. Un Filtre de Kalman Standard a été intégré avec succès dans le modèle conceptuel pluie-débit IHACRES par Schreider et al. en 2001. Quesney et al. en 2000 ont utilisé un Filtre de Kalman Etendu pour l'assimilation de mesures d'humidité de surface (par télédétection Radar ERS/SAR) dans un modèle hydrologique conceptuel global. Un modèle dynamique linéaire spatio-temporel a été développé par Amisigo & van de Giesen en 2005 pour combler les lacunes dans des séries de débit journalier. Ils utilisent à cet effet un Filtre de Kalman pour l'estimation des variables d'état (OUACHANI R and al ,2007).

Il y a peu d'exemples qui illustrent la capacité d'un Filtre de Kalman d'ensemble en modélisation pluie-débit. Cependant un des exemples en hydrologie est présenté par Hartnack & Madsen en 2001 où un Filtre de Kalman d'ensemble a été utilisé pour améliorer la performance de la partie hydraulique du modèle MIKE 11. Les tests qui ont été exécutés admettent l'existence d'erreurs dans la condition aux limites du débit du modèle MIKE 11 et proposent de les rectifier en utilisant le niveau d'eau et les mesures de débit. Les auteurs concluent que la performance totale du filtre était très satisfaisante dans tous les tests réalisés. Un autre exemple tout récent est présenté par Moradkhani et al., 2005, qui utilisent une approche d'estimation paramètre-état basée sur le Filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) pour l'estimation séquentielle à la fois des paramètres et des variables d'états d'un modèle hydrologique conceptuel. Troch et al. en 2003, dans un essai sur les méthodes d'assimilation dans la modélisation hydrologique, affirment que l'accent devrait être mis dans les études futures sur l'intégration à l'échelle du bassin versant du Filtre de Kalman à travers la modélisation pluie-débit (OUACHANI R and al ,2007).

III.13-Conclusion

Le Filtre de Kalman est donc un ensemble des équations très efficace pour obtenir la solution optimale d'un problème dont on n'a qu'une connaissance partielle. Son efficacité vient de son adaptabilité suivant le nombre de capteurs traités, la qualité des informations recueillies ou la modélisation du système.

Ce type de Filtre a été utilisé déjà en hydrologie par plusieurs chercheurs (Lee & Singh), et en général il a été couplé au Tank Model. Par contre, cette approche est appliquée pour la première fois en Algérie dans le domaine de l'hydrologie. En effet, notre programme a traité le couplage de Tank Model au Filtre de Kalman Standard avec le langage MATLAB, et le FK Etendu par un programme en langage Fortran.

Le Filtre de Kalman est un filtre très puissant, Cependant, il contient quelques défauts comme la divergence, car lorsque les conditions initiales sont mal définies par le calage manuel (trial & error), le système ne converge pas, et des fois, il ne donne même pas de résultats. Donc, on peut comprendre que le choix des conditions initiales est une étape très importante dans le fonctionnement du programme, cette étape est devenue initiale dans ce que nous appellerons par la suite calage du modèle.

Chapitre IV- Les systèmes Neuro-Flous

IV.1-Introduction

Le travail rapporté à ce chapitre traite du développement d'un système de prédiction capable de reproduire les informations sur les écoulements

L'idée d'utiliser les réseaux de neurones pour la prédiction date de 1964 : Hu a utilisé le réseau adaptatif de WIDROW afin de réaliser des prédictions climatologiques. Le manque d'algorithmes d'apprentissage limita la poursuite de ce type d'études. La recherche dans ce domaine ne s'est relancée que dans les années 80 (VASILE, 2008).

L'évolution des RN (réseaux aux neurones) vers les systèmes hybrides a suivi les étapes suivantes:

Phase 1 : Les réseaux non bouclés : Lapedis et Farber construisirent un RN permettant d'approximer un signal chaotique (Zhang et al., 1998). Les RN non bouclés associés à l'algorithme de rétro-propagation se montrèrent plus performants que les modèles classiques d'auto régression pour la prédiction de séries temporelles non linéaires (Yam et al., 2001).

Phase 2 : Amélioration de l'apprentissage et du paramétrage des RN : Depuis les années 90, des améliorations de la précision des prédictions réalisées par les RN ont été menées, tout en diminuant la complexité des modèles et du temps de calcul. Ces travaux visent la recherche de « guides » pour l'optimisation des architectures des RN et des algorithmes d'apprentissage (Hippert et al., 2001).

Phase 3 : Les réseaux récurrents : Développés pour prendre en compte le temps de manière explicite. Comparé aux autres techniques de prédiction de séries temporelles non linéaires, ces RN présentent de meilleures performances que les méthodes classiques (Wang W.Q. et al., 2004).

Phase 4 : Vers les systèmes neuro-flous : Les RN sont des boîtes noires et il n'est pas possible d'explicitement les relations entre entrées et sorties. Pour pallier cette faiblesse tout en préservant la capacité d'apprentissage des RN, on a opté à la combinaison de l'aspect connexionniste des RN à des techniques de raisonnement (logique floue).

IV.2-Systèmes Neuro-Flous

Une définition des systèmes neuro-flous est donnée dans (Nauck et al, 1997), reprise dans (Racoceanu, 2006) et (Vasile, 2008) selon laquelle :

« Les systèmes neuro-flous sont des systèmes flous formés par un algorithme d'apprentissage inspiré de la théorie des réseaux de neurones. La technique d'apprentissage opère en fonction de l'information locale et produit uniquement des changements locaux dans le système flou d'origine ».

L'utilisation conjointe des deux méthodes, RN et logique floue, tire avantage des deux méthodes : capacité d'apprentissage des RN et lisibilité de la SIF (système d'inférence floue).

Tableau IV.1: Avantages et inconvénients des RNA et de la logique floue

RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	LOGIQUE FLOUE
AVANTAGES	
<ul style="list-style-type: none"> - Modèle à base de données - Pas de règles linguistiques - Algorithme d'apprentissage 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de modèle mathématiques - Interprétabilité
INCONVENIENTS	
<ul style="list-style-type: none"> - Modèle boîte noire 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustement par tâtonnement - Pas d'apprentissage - Nécessite de posséder les règles

IV.2.1. Les sous-ensembles flous

La notion d'ensemble flou a été proposée par Zadeh (Zadeh, 1965) en introduisant un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné.

Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U, est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle [0,1] et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A. $\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance.

- En logique booléenne, le degré d'appartenance μ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1).
- En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle intermédiaire comprise entre 0 et 1 inclus (O. Guenounou, 2009).

IV.2.2. Les fonctions d'appartenance

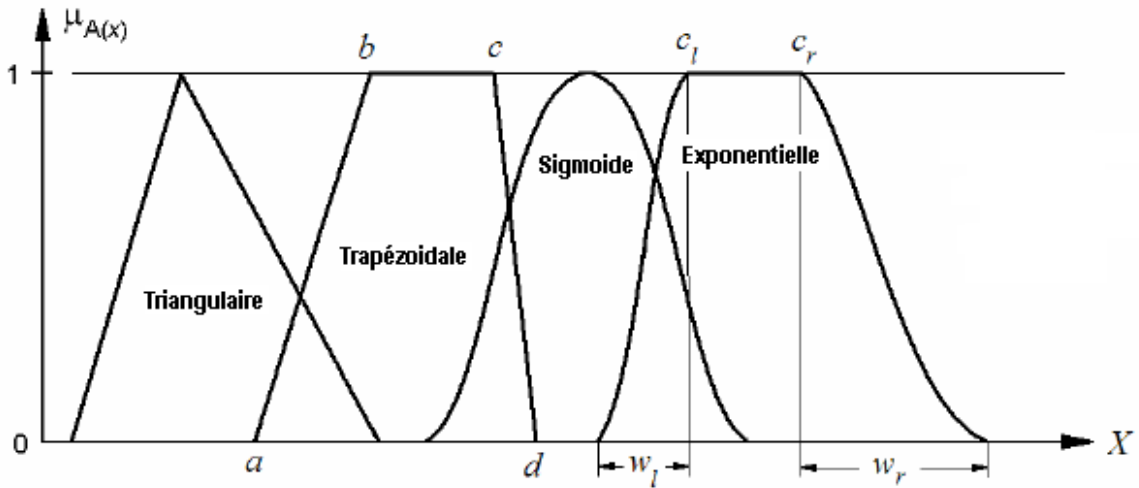


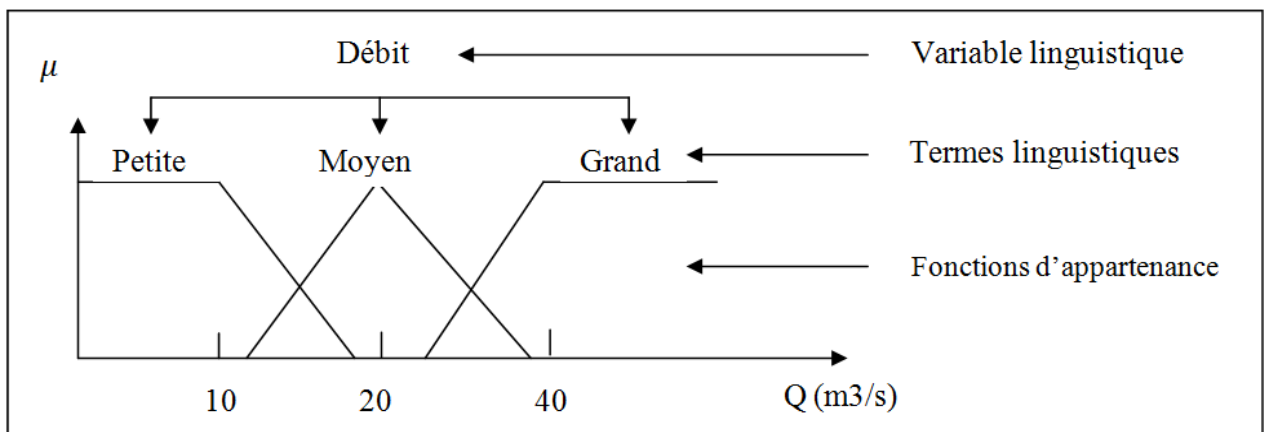
Figure (IV.1): Différents types de fonctions d'appartenance

L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée. La figure (IV.1), illustre les différentes formes de fonctions d'appartenance les plus utilisées.

Cependant, dans certaines applications où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on choisira plutôt des fonctions en S (sigmoïde) ou des fonctions de type gaussiennes, continument dérivables sur leur support (O. GUENOUNOU, 2009).

IV.2.3. Variables linguistiques

Une variable linguistique peut être définie à partir du triplet (x, U, T_x) où x est une variable définie sur l'univers de discours U et $T_x = (A_1, A_2, \dots)$ est un ensemble composé de sous-ensembles flous de U qui caractérise x . On associe souvent à chaque sous ensemble flou de T_x une valeur ou un terme linguistique (étiquette). La figure(IV.2) illustre la variable linguistique 'débit' avec trois termes linguistiques: faible, moyen et fort (O. Guenounou, 2009).



Figure(IV.2): Variables linguistiques.

Il est généralement imposé que les ensembles flous A_i doivent satisfaire la condition suivante:

$$\forall x, \exists i, \mu_{A_i}(x) \neq 0$$

Cette condition qu'on appelle dans la littérature, propriété d'assurance (coverage property) (Pedrycz et Zadeh, 1995), exige que chaque élément soit affecté à au moins à un ensemble flou avec un degré d'appartenance non nul. A cette condition, on ajoute souvent une propriété supplémentaire qui est le respect de la sémantique : les sous-ensembles doivent interpréter réellement les termes linguistiques qui leur sont associés (O. Guenounou, 2009).

IV.2.4. Les opérateurs flous

Les opérateurs flous sont utilisés dans le cas où on a plusieurs variables d'entrées (X_i). Ils représentent le moyen de combinaison des entrées.

Comme pour la théorie des ensembles, on définit : la réunion, l'intersection, et le complément d'ensembles flous (Lescieux, 2013).

- *Opérateur (T-conorme) réunion* : Soit les deux sous-ensembles flous A_1 (Pluie forte) et A_2 (Pluie moyenne) . L'ensemble (A_1 OU A_2) est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \cup A_2}(x) = \max(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) , \quad \forall x \in U$$

- *L'opérateur T-norme (intersection)* : Soit les deux sous-ensembles flous A_1 et A_2 . L'ensemble (A_1 ET A_2) est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \cap A_2}(x) = \min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) , \quad \forall x \in U$$

- *Le complément* : Soit le sous-ensemble flou A (Pluie forte). L'ensemble ($NON A$) est un ensemble flou de fonction d'appartenance :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) , \quad \forall x \in U$$

Dénomination	Intersection ET (T-norme)	Réunion OU (T- conorme)	Complément NON
Opérateurs de Zadeh MIN/MAX	$\mu_{A_1 \cap A_2}(x)$ $= \min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x))$	$\mu_{A_1 \cup A_2}(x) = \max(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x))$	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) ,$
Probabiliste PROD/ PROBOR	$\mu_{A_1 \cap A_2}(x)$ $= \mu_{A_1}(x) \times \mu_{A_2}(x)$	$\mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) - \mu_{A_1}(x) \times \mu_{A_2}(x)$	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) ,$

Tableau IV-2: Opérateurs logiques floues les plus utilisés

IV.2.5. La fuzzyfication

La fuzzyfication représente l'étape qui consiste en la quantification floue des valeurs réelles d'une variable (Lescieux, 2013). Elle détermine le degré d'appartenance de chaque variable aux différents sous-ensembles existants. Il faut fuzzyfier les entrées ET les sorties du processus flou.

Le processus de fuzzyfication se fait en :

- Fixant l'univers de discours (plage de variation de l'entrée considérée),

- La partition en classes floues de cet univers,
- Détermination des fonctions d'appartenances de chacune des classes.

La fuzzyfication des variables est une phase délicate du processus mis en œuvre par la logique floue. Elle est souvent réalisée de manière itérative et requiert de l'expérience (Lescieux, 2013).

IV.2.6.L'inférence floue

Représente l'opération par laquelle on admet une proposition en vertu de sa liaison avec d'autres propositions tenues pour vraies. En logique floue, on a :

Si (X est A) Alors (Y est B)

- La variable floue X appartient à la classe floue A1 avec un degré de validité $\mu(x_0)$,
- La variable floue Y appartient à la classe floue A2 à un degré qui dépend du degré de validité $\mu(x_0)$ de la prémisse.

Plus la condition sur les entrées est vraie, plus l'action préconisée pour les sorties doit être respectée. La conclusion d'une règle floue est l'appartenance d'une variable floue de sortie à une classe floue. Cette appartenance dépend de :

- La classe floue de sortie considérée,
- Du degré de validité de la prémisse $\mu_{prémises}(x_0)$,
- De la méthode d'implication choisie (méthode de Mamdani, méthode de Takagi-Sugeno).

IV.2.6.1.Méthodes d'implication

IV.2.6.1.1.Modèles linguistiques (Mamdani)

C'est des modèles où les quantités floues sont décrites par des termes linguistiques. Leurs avantages sont :

- Les prémisses et les conclusions des règles sont de nature linguistique ce qui les rend facilement compréhensibles et interprétables.
- Modèle Sugeno (Takagi-Sugeno-Kang) : à conséquences fonctionnelles.

IV.2.7.La Défuzzyfication

Représente l'étape d'agrégation des règles pour fournir une appartenance de la variable floue de sortie à une classe floue consolidée en transformant la partie floue issue de l'inférence en une valeur numérique. Le but de la défuzzyfication est de trouver une sortie précise qui correspond au mieux à la caractérisation floue.

Il existe deux principales méthodes de défuzzyfication (Lescieux,2013) :

- *Méthode du centre de gravité (COG)*: La sortie représente l'abscisse du centre de gravité de la surface sous la courbe de résultat:

$$Y = \frac{\int_U y \cdot \mu(y) \cdot dy}{\int_U \mu(y) \cdot dy}$$

Où: U: Univers de discours,

C'est la méthode de défuzzyfication la plus utilisée, parce qu'elle prend en compte l'influence de l'ensemble des valeurs proposées par la solution floue.

- *Méthode de la moyenne des maximums (MM)*: La sortie représente la moyenne des valeurs de sorties les plus vraisemblables:

$$Y = \frac{\int_S y \cdot dy}{\int_S dy}$$

Où: $S = \{y_0 \in U / \mu(y_0) = SUP(\mu(y))\}$

Cette méthode de défuzzyfication est plutôt utilisée lorsqu'il s'agit de discriminer une valeur de sortie.

IV.2.8.Fonctionnement des réseaux neuro-flous (VASILE, 2008):

Les SIF exploitent les règles linguistiques du type SI-ALORS traduisant une connaissance sur la dynamique d'un système. Cependant, un SIF n'est pas à même d'apprendre : les règles doivent être formulées ce qui est parfois difficile. Ainsi, une solution consiste à utiliser les propriétés des RN afin « d'apprendre » la structure floue et d'en adapter les paramètres en conséquences.

Les RNF (réseaux neuro-flous) remplacent les couches cachés des RN par des règles floues (linguistiques). Ils utilisent ensuite des algorithmes d'apprentissage pour définir et optimiser ces paramètres.

Les RN étant déjà un outil performant, les NF permettent de plus la détermination automatique des paramètres du système.

IV.2.9.Les architectures neuro-flous (VASILE, 2008)

Plusieurs architectures ont été développées depuis 1988.

IV.2.9.1.FALCON et GARIC

Modèles à 5 couches, utilisant l'interprétation de la technique de Mamdani qui consiste à la fuzzyfication en entrée et la défuzzyfication en sortie. Ces modèles sont rarement utilisés vu la lenteur d'exécution du système dû à la précision des résultats.

IV.2.9.2.NEFCLASS

Modèle à 3 couches, utilisé généralement en classification :une couche d'entrée avec les fonctions d'appartenance, une couche cachée représentée par des règles, et une couche de

sortie définissant les classes (Nauck et al., 1997). Facile à mettre en application en évitant l'étape de défuzzyfication tout en étant précis dans le résultat final.

IV.2.9.3.NEFCON

Modèle à 3 couches : une couche d'entrée incluant les nœuds d'entrée avec les sous-ensembles flous antécédents, une couche de sortie avec un nœud de sortie et les sous-ensembles conséquents, et une couche cachée formée par des règles dont l'architecture est similaire à celle du NEFCLASS avec une différence en sortie. Son processus d'apprentissage est divisé en deux phases : Trouver les règles de base initiales, puis leur optimisation par modification des sous-ensembles flous. Cette architecture est généralement utilisée en approximation de fonctions et en contrôle flou.

IV.2.9.4.NEFPROX (NEuro Fuzzy function apPROXimator)

Obtenu par association des deux architectures : NEFCLASS qui utilise un algorithme supervisé pour définir les règles floues, et NEFCON qui utilise un algorithme non supervisé avec le calcul de l'erreur de sortie. Il emploie la rétro propagation afin de définir les sous-ensembles flous. NEFPROX est le premier système interprétable dédié à l'approximation de fonction, néanmoins, ses résultats en classification restent moins bons que ceux donné par NEFCLASS.

IV.2.9.5.ANFIS (Adaptative Network based Fuzzy Inference System)

Modèle à 6 couches, utilisant la procédure d'apprentissage hybride. Son architecture affine les règles floues obtenues par des experts humains pour décrire le comportement d'entrée-sortie d'un système complexe. Ce modèle donne de très bons résultats en poursuite de trajectoire, approximation non linéaire, commande dynamique et traitement de signal. Et comparé au modèle NEFPROX, ANFIS donne de meilleurs résultats en approximation.

IV.2.9.6.ANFIS

Développé récemment par (Lee et al., 2000), et basé sur la fonction floue de base. On identifie trois types de ce réseaux, où les entrées sont les mêmes avec des sorties différentes, utilisées selon le type d'applications.

Type I : (Modèle de Mamdani), utilisant les ensembles flous dans les antécédents et les conséquents des règles floues. Il est plus approprié à la commande et aux systèmes experts.

Type II : version simplifiée du premier, réduisant le nombre de paramètres et évitant la défuzzyfication. Il est utilisé en classification.

Type III : réduisant encore le nombre de règles floues pour modéliser les systèmes évolués. Utilisé dans les fonctions d'approximation non linéaires, la commande dynamique et le traitement de signal.

On s'intéressera plus particulièrement dans notre étude à ANFIS pour la poursuite de l'évolution du phénomène de génération des débits dans le temps.

IV.2.10.Présentation de l'architecture ANFIS et son fonctionnement

Le système ANFIS est un approximateur universel, tel qu'il est vu comme un réseau de neurones non bouclé pour le quel chaque couche est un composant d'un système neuro-flou.

Le réseau possède deux (2) entrées et une sortie. C'est un système à 5 couches, où chaque couche peut prendre différents nœuds.

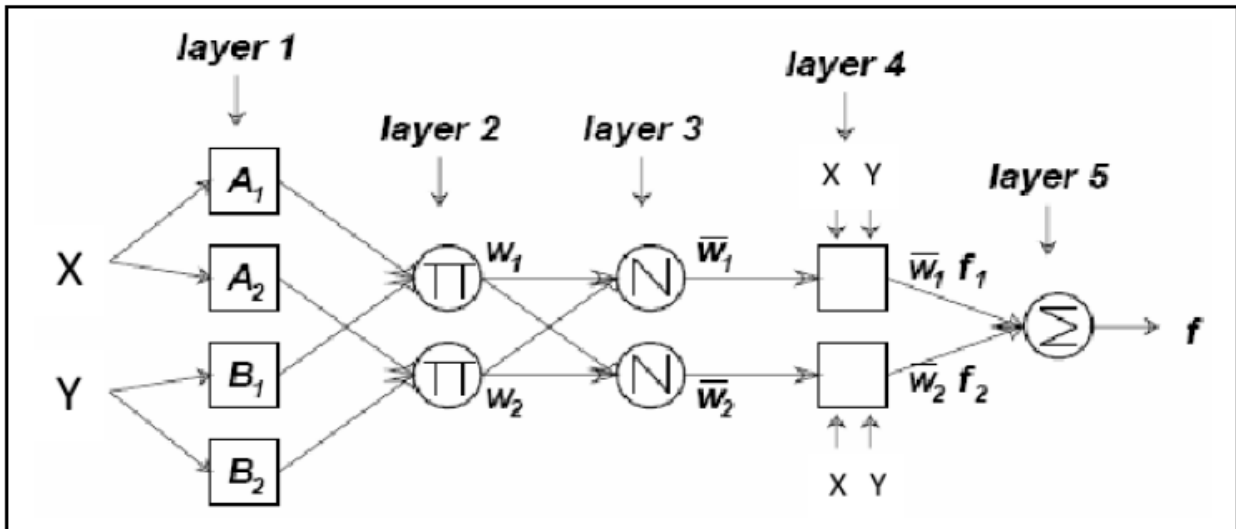


Figure (IV.3):-Architecture de l'ANFIS (JANG et al., 1997)

Notons avec : $X(1,k)$, 1 : indice de la couche, et k : indice de nœud.

Couche 1 : Fuzzyfication des variables d'entrées X et Y : la sortie du nœud k de la couche 1

$(X_{1,k})$ désigne la fonction d'appartenance du nœud. Avec :

$$\begin{cases} x_{1,k} = \mu_{A_k}(x) \text{ pour } k = 1,2 \\ x_{1,k} = \mu_{B_{k-2}}(x) \text{ pour } k = 3,4 \end{cases}$$

Les paramètres utilisés dans la fonction d'activation sont appelés « paramètres prémisses ». La valeur obtenue $\mu_{A_1}(x)$ représente le degré d'appartenance de la valeur X à l'ensemble A1, et à valeur dans l'intervalle [0,1] .

Couche 2 : Reçoit la sortie des nœuds de Fuzzyfication, et calcule sa valeur de sortie grâce à l'opérateur T-norme (T-norme est équivalent au « ET booléen »), qui est généralement l'opérateur produit (mais il en existe d'autres : max, min...).

$$x_{2,k} = \prod_{(1,j) \in Ant(2,k)} x_{1,j}$$

Couche 3 : Cette couche normalise les résultats fournis par la couche précédente. Les résultats obtenus représentent le degré d'implication de la valeur dans le résultat final.

$$x_{3,k} = \frac{x_{2,k}}{\sum_{(2,j) \in Ant(3,k)} x_{2,j}}$$

Couche 4 : Le résultat de cette couche est calculé en fonction de son entrée et d'une combinaison linéaire du premier ordre des entrées initiales (Approche de TAKAGI-SUGENO).

$$x_{4,k} = x_{3,k}[m_{k0} + m_{k1}X + m_{k2}Y]$$

Les paramètres $\{m_{k0}, m_{k1}, m_{k2}\}$ sont appelés paramètres « conséquents ».

Couche 5 : Représente la couche de sortie et constitué d'un seul neurone. Où n est le nombre de règles floues.

$$x_{5,k} = \sum_{i=1}^n x_{4,i}$$

Pour les ensembles flous, on a N paramètres à optimiser, avec $N=n_1+n_2$ (n_1 paramètres inhérents aux fonctions gaussiennes (prémises), et n_2 à la linéarisation des sorties des règles (conséquents)). Cette optimisation se fait par apprentissage, qui consiste en la correction des N paramètres afin de généraliser une fonction de transfert entre les entrées et la sortie du réseau, et elle est constituée d'un ensemble de couples « entrées/sortie » connus (relevé de données observées). Pour cela, il est important que le nombre de points des données d'apprentissage soit largement plus grand que le nombre de paramètres à estimer. Le déploiement des algorithmes d'apprentissage sur cette base de données permet de construire une fonction d'approximation (de prédiction) de la sortie Q (désirées/observées) à partir des nouveaux vecteurs d'entrées.

Cette optimisation se fait généralement par les algorithmes hybrides, qui représentent la combinaison de l'algorithme de descente du gradient et de l'algorithme LSE (least square estimate-estimation des moindres carrés) qui permet de réduire la complexité de l'apprentissage et d'en améliorer l'efficacité (Li et al., 2007), (Wang W. Q. et al., 2004).

Les points forts de l'ANFIS consistent dans le mécanisme d'inférence distributif et l'algorithme d'apprentissage adaptatif. Par contre, les règles sont non interprétables et l'apprentissage se fait hors ligne (VASILE, 2008).

IV.2.10.1. Structure du réseau

Concernant le réseau neuro-flou ANFIS, définir une architecture consiste à choisir le nombre de fonctions d'appartenance, leur type (gaussienne, sigmoïde...) et le nombre de règles floues utilisées. Pour « k » entrées et « m » fonctions d'appartenance pour chacune, le nombre de règles maximum est $M=m^k$.

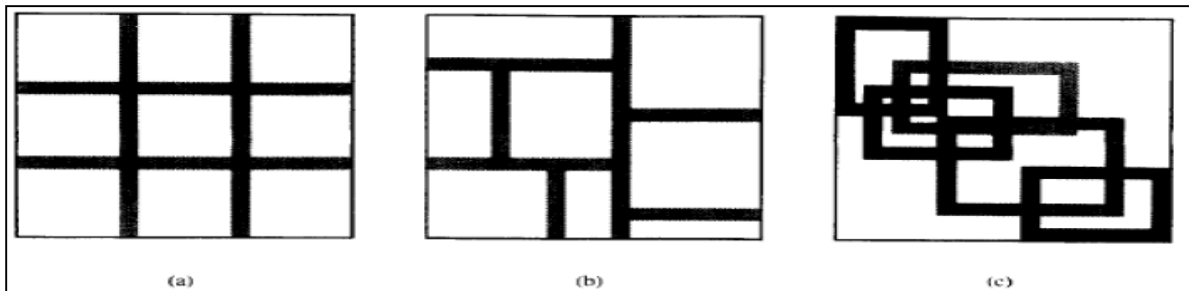
IV.2.10.2. Partitionnement de l'espace des entrées

L'efficacité du mode de partitionnement de l'espace des entrées dépend du nombre de paramètres à optimiser.

Nombre total de paramètres à optimiser est égal à : (Nombre d'entrées+1)xNombre de règles.

Il existe 3 modes de partitionnement, à savoir :

- Grid partitioning (a) : Cette stratégie a besoin d'un nombre restreint de fonctions d'appartenance (MF) pour chaque entrée. Cependant, elle rencontre le problème de dimensionnalité (nombre de règles de type Si-Alors prohibitivement grand) quand nous avons un nombre modérément grand d'entrées.
- Tree partition (b): Dont laquelle chaque région peut être univoquement indiquée par un arbre de décision. Cette partition soulage le problème de dimensionnalité.
- Scatter partition (c): En couvrant un sous-ensemble de l'espace d'entrée qui caractérise une région de l'occurrence possible de l'entrée.



Figure(IV.4): Les trois types de partitionnement de l'espace d'entrée (VASILE, 2008)

IV.3-Formulation adoptée :

Dans notre étude nous avons choisi comme données d'entrée : la pluie et l'ETP et comme sortie le débit de ruissellement. Bien que d'autres variantes peuvent exister et peuvent être meilleures, c'est dans le souci d'une comparaison complète avec les autres méthodes que cette formulation a été choisie.

Nous avons utilisé la fonction ANFIS intégrée dans le toolbox de Matlab ainsi que le modèle Sugeno.

IV.4-Conclusion

Les systèmes hybrides Neuro-floues sont utilisés principalement lorsque le modèle mathématique du système physique est difficile à élaborer, ils exploitent des règles floues tirées d'une expertise humaine pour modéliser le comportement dynamique du système. La commande à base de neuro-floue permet de définir une loi de commande numérique à partir des capacités d'apprentissage du réseau de neurone et de la lisibilité et la souplesse de la logique floue.

Nous avons présentés dans ce chapitre une description générale de la théorie floue et Neuro-floue et nous nous sommes intéressés principalement aux systèmes qui intègrent des règles floues dans des réseaux.

Chapitre V-Présentation de la zone d'étude

V.1-Introduction:

Dans ce travail, nous avons choisi quatre bassins versants algériens afin d'appliquer les différentes techniques de modélisation que nous avons déjà citées.

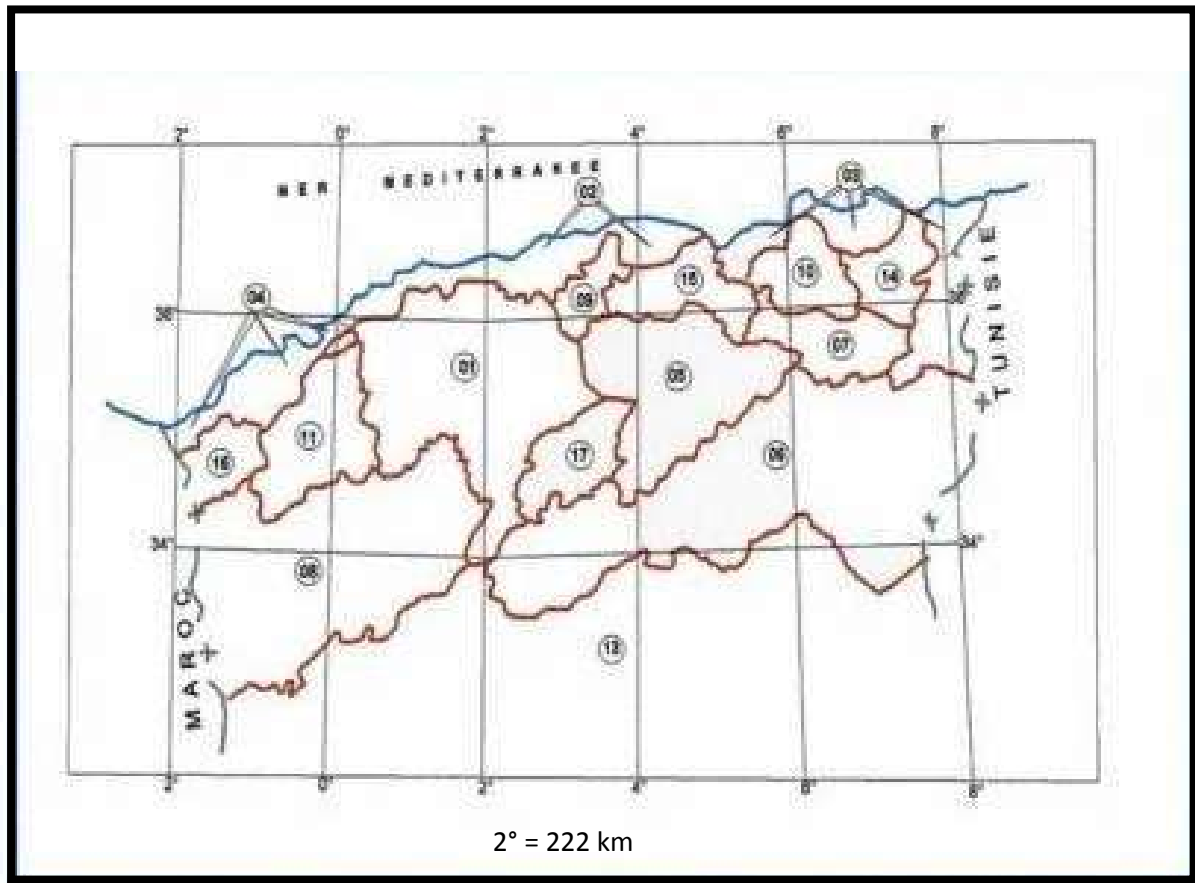
Il s'agit des bassins de : Isser, Zardezas, Cheffia et Bouchegouf.

Dans ce qui suit nous présenterons chacun de ces bassins avant d'entamer la modélisation. Il est toujours utile de connaître les caractéristiques physiographiques, hydrographiques ainsi que les caractéristiques de sol du bassin étudié.

V.2-Les bassins versants en Algérie :

Le réseau hydrologique algérien est divisé en 6 bassins hydrographiques et 17 bassins versants (Figure(V.1)).

Le régime d'écoulement des cours d'eau algériens est généralement permanent, cependant les affluents secondaires et tertiaires présentent un écoulement faible et temporaire.



BV 01 : Cheliff	BV 05 : Chott Hodna	BV 09 : Isser	BV 13 : Sahara
BV 02 : Côtier algérois	BV 06 : Chott Melhr	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 (V.1) - Carte des bassins versants en Algérie (ANRH).

V.3-Présentation du bassin versant des Isser :

Pour nos besoins de modélisation de la relation pluie-débit, nous avons choisi le bassin versant de l'Oued Isser. Les données nécessaires pour ce type d'étude sont les chroniques concomitantes de pluie, d'ETP et de débits liquides au mêmes pas de temps.

Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées ont été recueillies au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

V.3.1Description du bassin versant :

Le bassin versant de l'ISSER codé (09) par l'ANRH, est situé au Nord de l'Algérie. Sa superficie totale est de 4170 Km² de Ain BOUCIF jusqu'à l'embouchure du bassin. Une partie du bassin est drainée par l'Oued Mellah et l'Oued Hammam, ces deux (2) oueds forment l'ISSER qui se ramifie en plusieurs affluents (BENKACI, 2006). Le bassin de l'ISSER est limité au Nord par la mer et le bassin versant du Côtier Algérois, au Sud-Ouest par le bassin du Cheliff, au Sud Est par le bassin de Chott HODNA, et à l'Est par le bassin de la SOUMMAM (Figure (V.1)). **La partie concernée par notre étude est le sous-bassin : (09-04) de superficie 1044 km².**

Le bassin versant de l'ISSER présente une forme allongée sur l'axe Sud-Ouest (Ain Boucif/Beni Slimane) à Nord-Est (mer Méditerranée). Il est de type montagneux et se trouve à une altitude moyenne de 750 m et on note une côte maximale de 1810 m à Djebel Dira.

V.3.1.1.Climat

Le climat du bassin est méditerranéen, froid et humide en hiver, chaud et sec en été. La pluviométrie moyenne varie entre 600 et 800 mm par an. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de l'ordre de 1300 mm calculée d'après la formule de l'ANRH. L'apport moyen interannuel qui arrive à la station de LAKHDARIA est de 338,7 Hm³ (Carnet de l'ABH, Mai 2002).

V.3.1.2.Caractéristiques géomorphologique du bassin versant

Le bassin de l'Isser est formé en majeure partie de roches tendres (marnes et argiles), situées en pente, et qui sont facilement érodables. La nature tendre des matériaux et le régime hydrique irrégulier ont contribué à la formation d'un réseau hydrographique dense de type arborescent. Les oueds sont en crue durant les périodes de pluies, mais deviennent inactifs dès que s'annonce la saison sèche. Au regard de la forte densité de drainage du BV obtenues au niveau des stations (Pont de Latraille, Lakhdaria et à l'embouchure), le bassin versant est vulnérable aux fortes crues.

Il se caractérise par un couvert végétal peu dense localisé au centre et présente 20% de la superficie totale. Le reste de la surface, soit 80%, est occupée par des cultures essentiellement céréalières et fourragères.

V.3.2.Données utilisées

V.3.2.1.Données hydrométriques

L'oued Isser est principalement contrôlé par deux stations hydrométriques: Pont de Latraille à l'amont et Lakhdaria à l'aval.

La station hydrométrique utilisée est celle de LAKHDARIA codée (09 05 01) par l'ANRH. Elle se situe à une altitude de 90m et se situe à l'aval du sous-bassin que nous étudions (09-04) s'étendant sur une superficie de 1044 km². Les données hydrométriques ont été recueillies auprès de l'ANRH. La période d'observations s'étend de Septembre 1971/1981, Mai 1982/Aout 2002 et de Septembre 2004/Aout 2010.

Les séries utilisées dans notre travail ont été choisies de sorte à éviter les lacunes pour le pas de temps journalier : de 1992 à 1994 et pour le pas de temps mensuel: de 1980 à 1996.

Les données obtenues ont été transformées en lames journalières (mm), puis mensuelles.

Tableau V.1: Caractéristiques du BV de l'Isser, Station hydrométrique Lakhdaria (ANRH)

Mise en service	01/01/1969
X	579,10
Y	368,75
Surface drainée (Km ²)	3615,00
Périphérie (Km)	270,00
Longueur du cours d'eau principal (Km)	200,00
Altitude moyenne (m)	750,00
Altitude minimale (m)	90,00
Indice de pente	0,11

V.3.2.2.Données pluviométriques

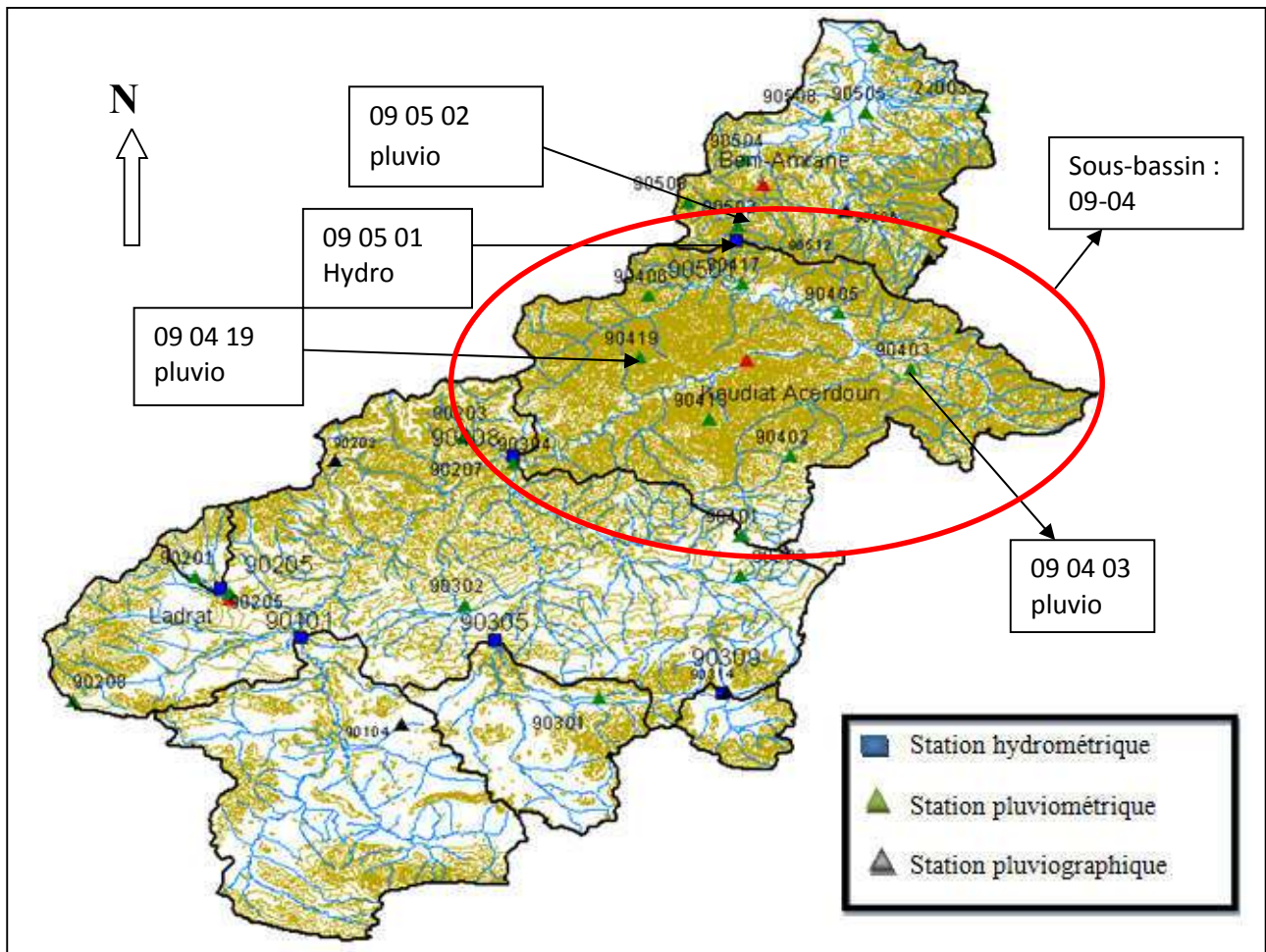
Afin de balayer toute (ou au moins en partie) la pluviométrie générant le débit qui arrive à la station de Lakhdaria, nous avons utilisé la méthode des polygones de Thiessen pour déterminer les précipitations moyennes du bassin versant aux deux pas de temps mensuel et journalier.

Le choix des stations s'est fait de telle sorte à ne prendre en compte que la pluviométrie qui contribue à la génération du débit à Lakhdaria, et ce en occultant la partie allant au barrage de Koudiet Acerdoune, afin que les résultats d'une éventuelle prévision dans le futur concordent

avec l'état réel des lieux, cette situation résulte de la mise en service de ce barrage en 2008. L'influence de la construction de ce barrage sur les débits de la station de Lakhdaria existe à partir de l'année 2008. Ainsi, on peut procéder à l'extension de la série des débits sur la période de Septembre 2002 à Aout 2004.

On dispose de trois stations pluviométriques :

- La station de DJEBAHIA (09 04 03) qui dispose une série de mesure de 1980/1990 et 1991/2011.
- La station de BSIBSA (09 04 19) qui dispose d'une série de mesure de 1980 à 2011.
- La station de LAKHDARIA GORGES (09 05 02), dont on ne dispose que des données mensuelles sur la période 1968 à 2008, et de 1990 à 1998 de données journalières.

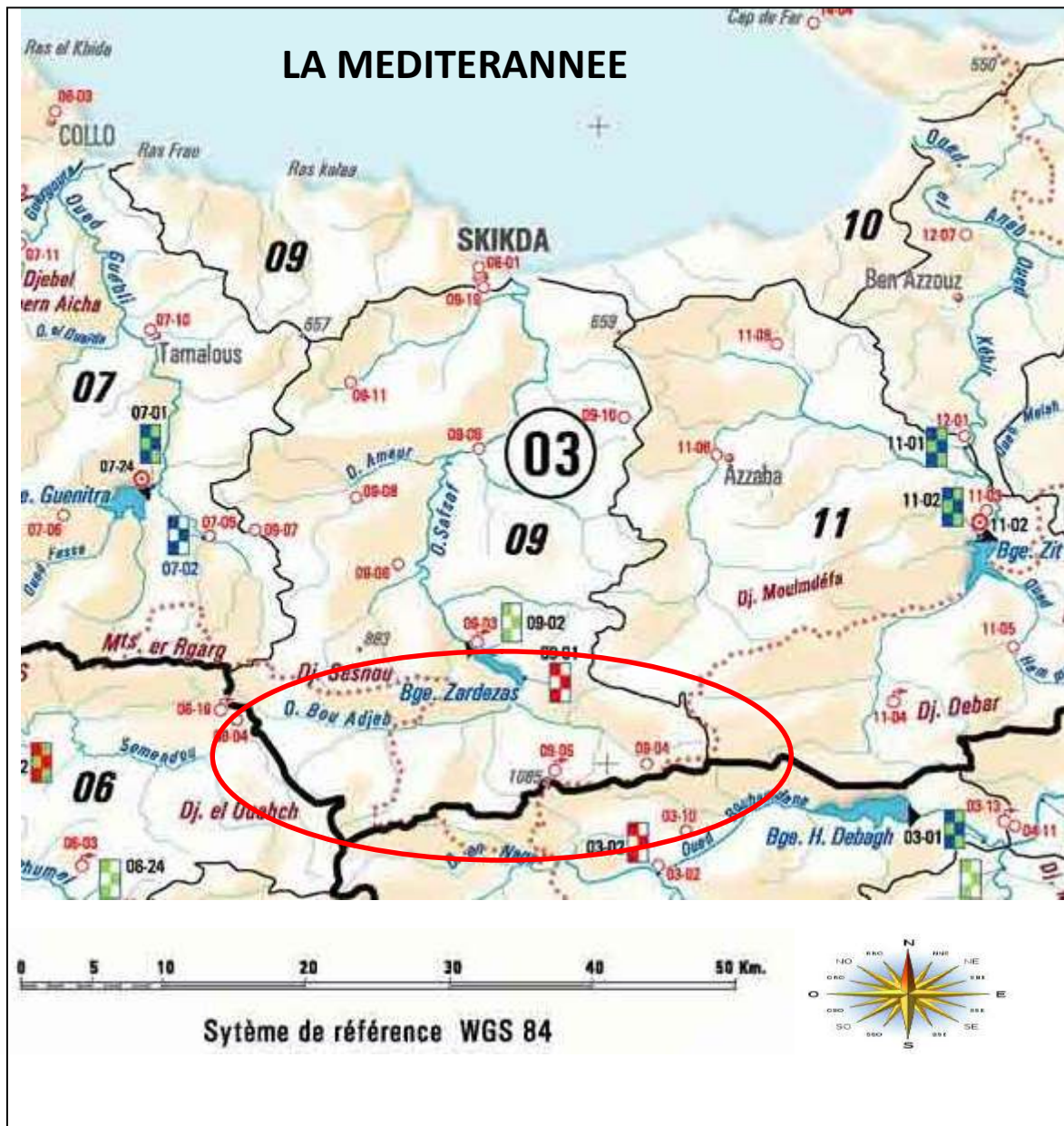


Figure(V.2): Carte des situations des stations hydro-climatologique du bassin versant de l'Isser

V.4-Présentation du Bassin de Zardezas :

Le bassin versant de Zardezas (la wilaya de Skikda) est situé au grand bassin versant des Côtiers Constantinois, codé : **03-09-02** par l'ANRH, voir (Figure V.3).

- Le bassin de l'Oued Saf-Saf, codé (0309) auquel appartient le sous-bassin de Zardezas, résulte de la conjonction de deux cours d'eau : l'Oued Bouhadjeb et l'Oued Khemkhem, et fait partie du côtier Constantinois. Il est limité par la Méditerranée au Nord, le bassin de Rhumel Kebir à l'Est et au Sud-Est, et le bassin de la Soumam à l'Ouest.



*Figure (V.3) - Situation du bassin versant de Zardezas
(Extrait de la carte ANRH, 2005)*

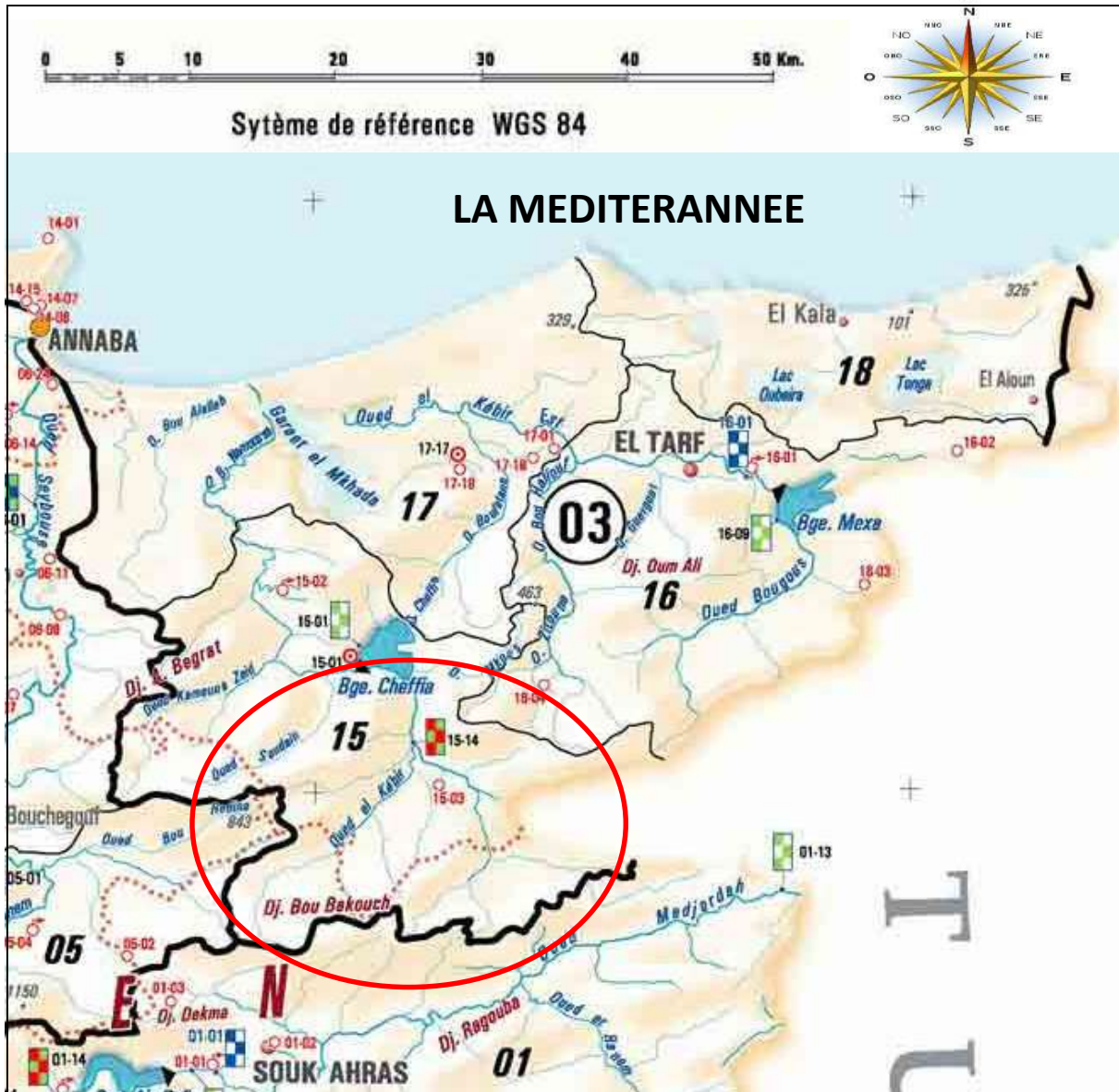
Le climat est de type méditerranéen, froid et relativement humide en Hiver, et chaud en été. Le bassin présente une forte densité de drainage (3.8 km/km²), son relief est caractérisé par des terrains accidentés. En effet, les massifs montagneux couvrent plus de 50% du bassin, en particulier dans la partie Sud du bassin. Zardezas dispose d'une station hydrométrique contrôlée par l'ANBT (l'Agence Nationale des Barrages et Transfert) (Amireche et al, 2017).

V.5-Présentation du bassin versant de La Cheffia :

- Le bassin versant de la Cheffia est situé dans le Nord-Est Algérien dans le côtier Constantinois codé (03) par l'ANRH, il est alimenté par l'Oued Bounamoussa qui est formé par l'intersection des Oueds de Kamouna et de Soudan, et se ramifie en Oueds Bou Alalah et El Kébir. Il est limité au Nord par la Méditerranée, à l'Est par la Tunisie, et au Sud-Est par le bassin versant de RhumelKébir. Il est équipé d'une seule station hydrométrique. Le barrage de la Cheffia permet d'alimenter en eau potable et d'irrigation les habitants de cette région. Le climat du bassin est méditerranéen, l'Hiver est froid où la température atteint parfois les 0°C, le bassin est relativement humide, la pluviométrie varie en moyenne entre 800 et 900 mm, et dépasse parfois les 1000 mm La période pluvieuse s'étale de Novembre à Mai, l'été est relativement chaud et sec. (AMIRECHE.M et al ,2017).

TableauV.2- Caractéristiques de Bassin vessant Cheffia(ANRH)

Types d'indices	
Pente moyenne d'oued (m/km)	4.22
Pente globale (m/km)	27.82
Densité de drainage (km ⁻¹)	3.45
Densité relative (%)	35.71
Surface du bassin versant(km ²)	575



*Figure(V.4)- Situation du bassin versant du Cheffia
(Extrait de la carte ANRH, 2005)*

V.6-Bassin de Bouchegouf

Le sous bassin versant de BOUCHEGOUF de Oued Mellah, est un sous bassin du bassin versant de la SEYBOUSSE. Codé (14 05) par l'ANRH, il présente un climat Méditerranéen avec un comportement saisonnier, où l'on observe une succession de saisons sèches et pluvieuses très contrastée à l'échelle annuelle, et des régimes d'écoulement très variables à l'échelle interannuelle.

Ce sous bassin est situé au Nord-Est de l'Algérie, à l'amont de l'Oued Seybouse dans les territoires de la wilaya de Guelma. Sa superficie totale est de 550 km² de Djebel Ras El Alia (1317m d'altitude) jusqu'à la vallée de Bouchegouf (environ 100m).

Le sous bassin versant de Bouchegouf se trouve du côté droit du bassin de Seybouse, il est limité au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois, à l'Est par le bassin de Medjerdah, au

Sud par les bassins de l'Oued Cherf et d'Oued Bouhamdane, à l'Ouest par les deux bassins de Guelma (moyenne Seybouse) et Ain Berda (Oued Ressoul) (Figure(V-5)).

Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées ont été recueillies au niveau de l'ANRH. Cependant, les données de l'évapotranspiration ont été calculées à partir des températures recueillies sur le site « Global Weather Data for SWAT ».

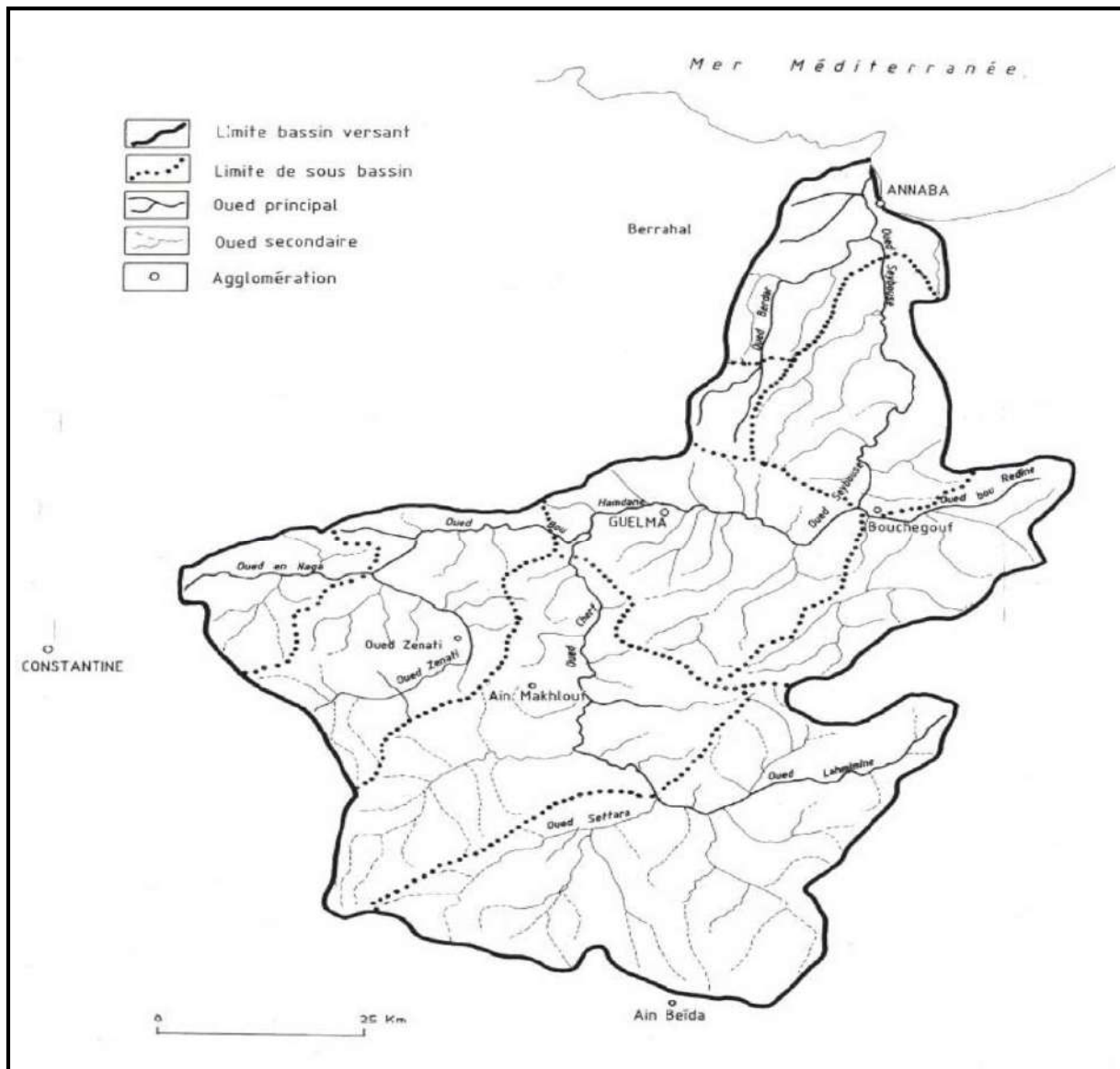


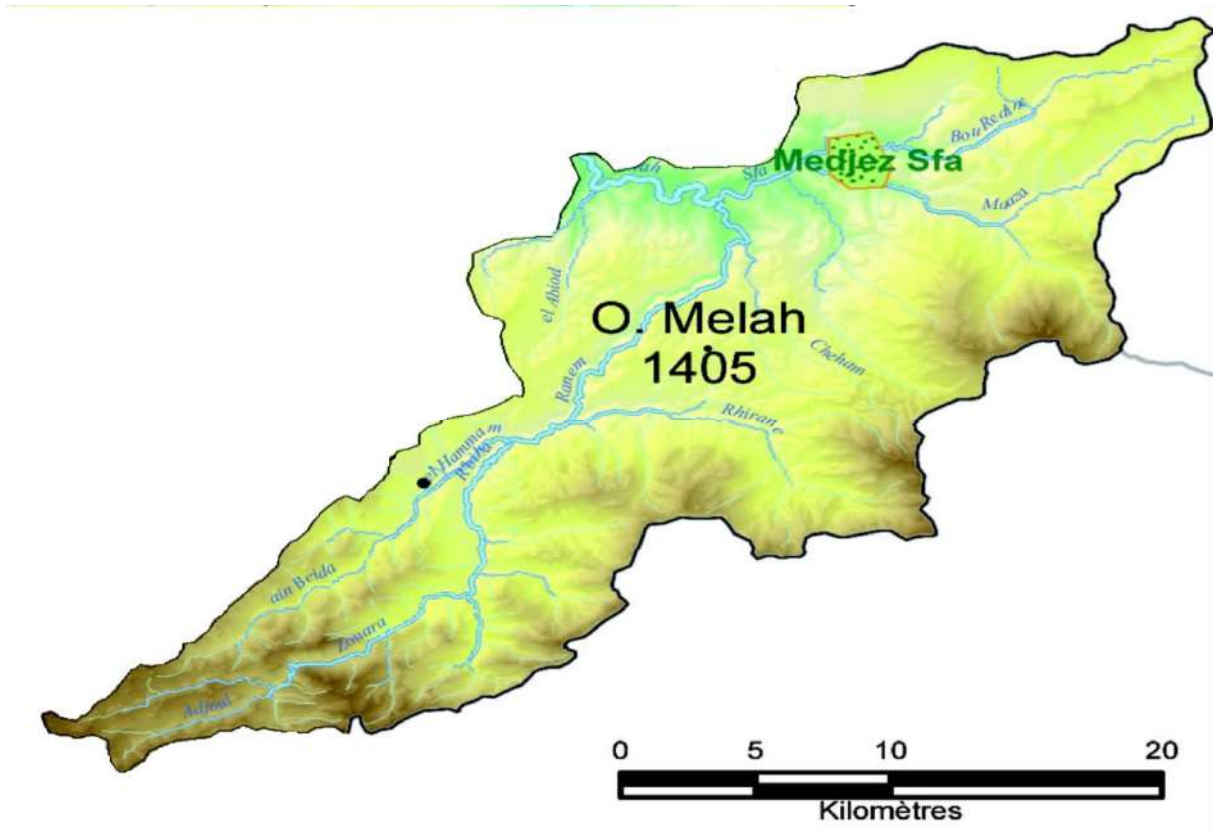
Figure (V.5) : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Seybouse

Le principal affluent de ce bassin est Oued Mellah, il doit son nom à la forte salinité des eaux dans le bassin aval. Son profil en long est caractérisé par une courbe à très forte pente (la dénivelée brute du bassin est importante 1222 m), ce qui révèle son caractère torrentiel.

Il est important de noter que près de 70% de la surface du bassin se situe à une altitude supérieure à 500m.

Le bassin peut être décomposé en trois zones différenciées indiquées dans la : (Figure (V.6)):

- Le bassin amont est essentiellement montagneux et accidenté, avec des sommets dépassant les 1000m (djebel Ras El Alia 1317m, djebel Zaoura 1292 m).
- Le bassin moyen est montagneux, mais nettement moins accidenté (Djebel Metelek 704m).
- Le bassin aval présente des reliefs bas consistant à la plaine agricole de Bouchegouf.



Figure(V.6) : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Bouchegouf (ABHCS-M, 2013).

La taille des séries hydrométriques et pluviométriques utilisées dans cette étude sont concomitantes, correspondent à une durée d'observations de 200 mois (17 ans et 8 mois).

Le modèle est testé sur cette période dans laquelle les séries modélisées sont divisées en deux sous échantillons, le premier servant le calage pour l'estimation des paramètres, la deuxième pour la validation du modèle.

Les données morphométriques sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-3 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant d'Oued Mellah à la Station de Bouchegouf d'après (A.N.R.H), (Mebarki ,2005)

Paramètres	Bassin de Bouchegouf
Superficie (km ²)	550
Périmètre (km)	120
Longueur du rectangle équivalent (km)	48,7
Longueur du Thalweg principal (km)	53
Altitude max. (m)	1317
Altitude min. (m)	95
Altitude moyenne (m)	641
Coefficient de compacité Kc	1,43
Indice de pente de Roche	0,15
Coefficient de torrentialité	25,2
Pente moyenne (m/km)	240
Dénivelée spécifique (m)	346,7
Temps de concentration (h)	9,19
Densité de drainage (km/km ²)	4
Classe de relief (selon Dubreuil & Guiscafre, 1974)	R6 (Relief fort)

V.7-Synthèse des caractéristiques morphologiques des bassins étudiés :

Les caractéristiques morphologiques des quatre bassins étudiés sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau V.4 - Synthèse des caractéristiques pour les bassins étudiés

Bassin	Cheffia (03-15)	Isser (09-04)	Zardezas (03-09)	Bouchegouf (14-05)
Superficie (km ²)	575	1044	345	550
Coefficient Kc	1.20	1.25	1.26	1.43
Altitude moyenne (m)	420	665	628	641
Indice de pente de Roche	0.11	0.11	0.17	0.15

V.8- Données hydro-climatiques et hydrométrique des bassins étudiés:

- Les données d'entrées utilisées sont les données journalières concomitantes de pluie et de débit, ainsi que les données d'évapotranspiration (ETP). Les données de pluie et de débit ont été recueillies auprès de l'ANRH et l'ANBT. Pour le bassin de la Cheffia, nous utiliserons les données de l'ETP journalières de la ville d'Annaba, calculées par la méthode d'Oudin.

Les ETP journalières du bassin de Zardezas sont calculées par un bac Colorado (coefficient $K=0.7$). Pour les Isser, nous avons utilisé la formule d'Oudin (AMIRECHE.M et al , 2017).

Tableau V.5- Stations hydrométriques étudiées.

Stations (code)	Bassin	Coordonnées Lambert	Date d'installation	Superficie (km ²)
Cheffia(031501)	Cheffia	X=977.70 - Y=381.32	1978	575 km ²
Lakhdaria (090501)	Isser	X=579.10 - Y=368.75	1954/65	1044 km ²
Zardezas (030901)	Zardezas	X=878.75 - Y=370.67	1989	345 km ²
Boucheouf (14 05 01)	Boucheouf	X=949.16 - Y=362.44	1976	550 km ²

Tableau V.6-Périodes d'observations utilisées dans cette étude

Station (code)	Station hydrométrique	Période d'observations Journalières	Calibration/ validation -journalier	Calibration/ validation -Mensuel
Cheffia (031501)	Cheffia(031501)	1986-1990	03 ans / 2 ans.	1978-1986/ 1987-1991
Isser(090403)+ (090413)+(090419)	Isser (090501)	1992-1994	02 ans / 1 année.	1980-1992/ 1993-1996
Zardezas (030903)	Zardezas (030901)	1990-1995	04 ans / 02 années.	1990-1993/ 1994-1996
Boucheouf (14 05 01)	Boucheouf (14 05 01)	1985-2003	17 ans +08 mois.	1985-1995/ 1995/2003

Les données utilisées ont été choisies de sorte que les séries temporelles soient complètes et ne comportent pas de lacunes.

V.9-CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons présenté les bassins versants sujets de notre application : le bassin des Isser, Zardezas, Cheffia et Bouchegouf.

Chaque bassin a été décrit en détail et ses différentes caractéristiques ont été présentées.

Les stations hydrométriques et pluviométriques ont été définies sur chaque bassin.

Les données utilisées sont mentionnés ainsi que la durée de la modélisation.

Les cartes des bassins versants en Algérie ont été présentées ainsi que la délimitation des quatre bassins.

Chapitre VI-Résultats et discussions

Dans ce chapitre, les résultats obtenus en suivant la méthodologie mentionnée dans les parties précédentes vont être présentés et interprétés. Les résultats, se résument principalement à des tableaux présentant les valeurs des critères d'évaluation, offrant ainsi une possibilité d'évaluation analytique. D'autre part, les résultats analytiques vont être accompagnés par des représentations graphiques permettant une comparaison directe des hydrogrammes simulés et observés. L'évaluation graphique comme déjà mentionné, permet d'accentuer la performance des modèles et surtout confirmer l'information que les critères analytiques offrent. L'accent sera mis sur la reproduction des pics de l'hydrogramme ainsi que sur la surestimation ou sous-estimation des débits simulés par rapport aux débits observés.

VI.1-Méthodologie et Critères de validité :

VI.1.1 - Calage des modèles

Le calage consiste en l'ajustement numérique des entrées afin de reproduire les observations. Ce processus d'ajustement des variables d'entrée et des paramètres du modèle est établi dans le but de reproduire certains aspects de la réalité en comparant des variables de sortie à des données observées.

Il s'agit de l'une des étapes les plus consommatrices en temps de travail lors de la construction du modèle. Elle est fondamentale dans la mesure où elle détermine la qualité du modèle (Setra, 2010).

Le Processus de calage, consiste à déterminer les paramètres d'un modèle à partir d'un jeu de données observées (Setra, 2010).

VI.1.1.1 - Le calage manuel

La détermination d'un jeu de paramètres par tâtonnement, permet d'obtenir un optimum, qui est atteint lorsque l'erreur est minimisée, entre les données simulées et observées, l'inconvénient du calage manuel est qu'il est fastidieux, et nécessite un temps relativement long.

VI.1.1.2 - Le calage automatique

Dans ce cas, les données simulées sont ajustées aux données observées, au moyen d'un programme informatique, cet algorithme est plus avantageux que le calage manuel, mais présente l'inconvénient d'être influencé par certaines contraintes, qu'on peut résumer en (Benkaci, 2006) :

- L'interdépendance des paramètres (auto-corrélation) : le changement de la valeur d'un paramètre peut être compensé par la modification d'autres paramètres, ce qui entraîne des solutions équivalentes en termes de valeur du critère d'optimisation :

- La faible sensibilité de la fonction objectif.
- La présence d'optima locaux, ou également la présence de plusieurs zones de convergences.
- La qualité de l'estimation des paramètres d'un modèle dépend notamment de la puissance et de la robustesse de l'algorithme utilisé.

VI.1.2 - Validation des modèles

Souvent confondue avec l'étape de calage, la validation consiste à s'assurer que le modèle réagit correctement à des variations des données d'entrée et qu'il est apte à fonctionner en projection. On utilise pour cette étape des données qui n'ont pas servi au calage du modèle.

Elle permet également de vérifier la sensibilité du système aux changements à analyser, afin de s'assurer que les écarts entre résultats obtenus et observés soient raisonnables.

VI.1.3 - Exploitation des modèles

Une fois le modèle calé et validé, il peut être utilisé en projection, pour différents usages, en s'assurant à chaque exploitation, qu'il reste pertinent pour répondre aux problèmes posés.

VI.1.4 - Variables des modèles

La variable de forçage du système qui conditionne le cycle hydrologique du bassin versant est la précipitation à différents pas de temps.

Pour le calage/contrôle des modèles, la série des précipitations est constituée des pluies totales (cumulées) durant le pas de temps du modèle étudié (mm/mois) et (mm/jour). La pluviométrie moyenne n'étant utilisée que pour évaluer la tendance pluviométrique.

En pratique, il faut prendre en considération la moyenne de toutes les stations pluviométriques existant à l'amont de la station hydrométrique utilisée. Cependant, il est rare de trouver des stations pluviométriques ayant fonctionné sur une période assez longue pour représenter le phénomène hydrologique étudié, sur la même période d'observations, et sur une période concomitante avec les débits observés.

Une deuxième variable conditionne le cycle hydrologique du bassin versant, elle représente une perte du système, c'est l'évapotranspiration potentielle (ETP).

A l'échelle mensuelle, l'ETP peut être déduite de la température (Dechemi et al, 1997). La méthode de Thornthwaite permet à partir de la température moyenne du mois, de calculer l'évapotranspiration mensuelle d'une façon relativement précise.

A l'échelle journalière, les données décadaires estimées par la méthode de Penman, peuvent être désagrégées en données journalières (Benkaci, 2006, Edijatno,1991).

La réponse du bassin versant à l'ensemble des processus hydro-climatologiques représente le débit à l'exutoire du bassin. La mesure de cette variable reste toutefois assez délicate et imprécise. Le débit n'étant pas mesuré, mais calculé à partir des hauteurs limnimétriques observées, et des courbes de tarage de chaque station hydrométrique.

Pour le calage/contrôle des modèles, la série de débits est constituée du cumul des lames ruisselées par pas de temps (mm/mois) et (mm/jour). L'utilisation de la pluviométrie totale par pas de temps génère une lame ruisselée totale par le même pas de temps. Le débit moyen mensuel simulé peut être calculé par la suite.

VI.1.5 - Critères d'évaluation et d'efficacité des modèles

L'utilisation des modèles pluie-débit doit être très soignée vu leurs domaines d'utilisation. Il n'existe pas un bon modèle, mais juste un modèle meilleur qu'un autre. Afin de juger de la pertinence des modèles, plusieurs critères ont été développés, mais le choix du meilleur critère à utiliser suivant le cas d'étude reste toujours un choix très critique. Une étude critique des critères d'évaluation des modèles a été menée dans le but de :

- déterminer les techniques d'évaluation des modèles,
- évaluer les erreurs des modèles,
- établir une démarche d'évaluation des modèles.

VI.1.6 - Evaluation graphique

L'évaluation graphique donne un premier aperçu sur la tendance de la variable simulée par rapport à la variable observée. Elle permet de détecter certaines anomalies mal décelables par les critères numériques classiques. Après calage des modèles, elle nous indique si l'évolution de la variable simulée suit l'évolution de la variable observée. Autrement dit, elle nous indique si le modèle reproduit bien les événements.

VI.1.7 - Evaluation statistique

Afin de juger l'efficacité des modèles, on présentera les critères appliqués dans le domaine de la modélisation hydrologique. Une étude comparative du degré de représentation de ces critères sera établie par la suite afin de juger de la pertinence des critères suivant les cas d'étude.

Les critères globaux d'appréciation des performances des modèles de simulation des débits diffèrent sur trois points essentiels: la forme analytique de l'erreur (quadratique, absolue, cumulée...), la forme de la variable cible (transformée ou non) et le choix d'un modèle de référence (pour avoir une mesure relative).(Perrin, 2000).

VI.1.8 - Les régressions standard

Évaluent la force de la relation linéaire existant entre les observations et les prédictions.

VI.1.8.1 - Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination R^2 est défini comme étant le carré du coefficient de corrélation (LegatesandMcCabe, 1999). Il est donné par :

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_o.moy)(Q_s - Q_s.moy)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_o.moy)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_s.moy)^2}} \right]^2 \quad (6-1)$$

Q_o : valeurs observées. $Q_o.moy$: moyenne des valeurs observées.

Q_s : valeurs simulées.

$Q_s.moy$: moyenne des valeurs simulées.

Il mesure la qualité de prédiction d'une régression linéaire. Ce coefficient varie entre 0 et 1, soit entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort.

Le R^2 estime la dispersion (distribution) entre les valeurs simulées et observées, en déterminant la proportion avec laquelle la dispersion estimée explique la dispersion observée.

Plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points se disperse autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, alors $R^2 = 1$.

L'inconvénient majeur du R^2 est qu'il ne quantifie que la dispersion des variables, et de là, si le modèle sous-estime ou surestime toujours la prédiction, on aura toujours un R^2 proche de 1 même si les valeurs simulées sont fausses.

Pour faire face à cet inconvénient lors de la validation, on introduit la pente (b) et la composante (a) de l'intersection de la droite de régression avec l'axe des y ($y=b.x+a$).

Pour une bonne simulation, (a) devrait être proche de « 0 », ce qui veut dire qu'un débit observé nul (Q_{obs}), donnera un débit simulé (Q_{sim}) très proche de zéro, et (b) devrait être proche de « 1 ».

Si ($b < 1$) \Rightarrow le modèle sous-estime la prédiction, et la surestime dans le cas contraire.

La combinaison du R^2 et de b, nous donne le « R^2 pondéré », qui prend en compte la sous/surestimation de la prédiction :

$$\omega R^2 = \begin{cases} |b|R^2 & \text{pour } b \leq 1 \\ |b|^{-1} & \text{pour } b > 1 \end{cases} \quad (6-2)$$

Le coefficient de détermination pondéré accorde ainsi plus de poids aux forts débits.

VI.1.9 - Les critères adimensionnels

Fournissent un modèle d'évaluation où les indices d'erreur quantifient l'écart dans les unités de données traitées.

VI.1.9.1 - Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE

Proposé par Nash et Sutcliffe en 1970, ce critère évalue le pouvoir prédictif des modèles hydrologiques. Il est défini comme étant « un » moins la somme des carrés des erreurs normalisées par la variance des valeurs observées durant la période d'étude :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_{o.moy})^2} \quad (6-3)$$

Le NSE varie entre "-∞" et "1". Un NSE de "1", indique une correspondance parfaite entre les valeurs observées et prédites. Les valeurs comprises entre 0,0 et 1,0 sont généralement considérées comme des niveaux de performance acceptables, tandis que des valeurs

inférieures à 0,0 indiquent que la valeur moyenne observée est meilleure que la valeur simulée, ce qui indique une performance inacceptable.

L'inconvénient du coefficient « NSE » est qu'il introduit le carré des erreurs. Par conséquent, les grandes erreurs dans la série temporelle influencent fortement la variation de ce critère, tandis que les faibles erreurs sont négligées. Ceci conduit à la surestimation de la performance du modèle lors des pics et sa sous-estimation lors des étiages. Le NSE accorde plus de poids aux débits moyens.

Et tout comme le R^2 , le NSE ne peut pas être utilisé, si le modèle sous-estime ou surestime les données observées. C'est la raison pour laquelle, le critère PBIAS, une mesure de la sous-estimation ou de la surestimation, est utilisé conjointement avec le NSE.

VI.1.9.2 - Index of agreement (Indice de Concordance)

Développé par Willmot (1981), en tant que mesure normalisée du degré d'erreur de prédiction du modèle et varie entre 0 et 1. Une valeur calculée de 1 indique un accord parfait entre valeurs mesurées et prédites, et 0 n'indique aucun accord.

Cet indice représente le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et l'erreur potentielle (Willmot, 1984). L'auteur a défini l'erreur potentielle comme étant la somme des valeurs absolues au carré des distances des valeurs prédites à la valeur moyenne observée et des distances des valeurs observées à la valeur moyenne observée :

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_s - Q_o.moy| + |Q_o - Q_o.moy|)^2} \quad (6-4)$$

L'inconvénient de ce critère est qu'il est trop sensible aux valeurs extrêmes en raison des différences au carré de l'erreur quadratique (Legates et McCabe, 1999). Des valeurs élevées de D ont été signalées même pour des ajustements de modèle médiocres (Krause et al., 2005).

VI.1.10 - Critère du bilan (Perrin 2000) :

Il correspond au rapport des volumes annuels simulés et observés. Une formulation variant sur le même intervalle que le critère de Nash $(]-\infty; 1[)$ a été utilisée:

$$B = 1 - \left| \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_s}{\sum_{i=1}^n Q_o}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_o}{\sum_{i=1}^n Q_s}} \right| \quad (6-5)$$

Ce critère a été développé lors d'une étude comparative des modèles journaliers.

VI.1.11 - Les indices d'erreurs :

Plusieurs mesures d'estimation de l'erreur ont été développées: l'erreur absolue moyenne (MAE, équation (6-6)) ou encore l'erreur relative moyenne, la moyenne de l'erreur au carré (MSE, équation (6-7)), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, équation (6-8)), sont les indices d'erreurs les plus utilisés. Ils sont intéressants car ils indiquent l'erreur dans les unités des variables étudiées. Une valeur « 0 » de ces indices indique que le modèle

simule bien la variable étudiée. D'autre part, MSE et RMSE indiquent l'erreur aléatoire entre les mesures et les prédictions.

VI.1.11.1 MAE, MSE, RMSE

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_o - Q_s| \quad (6-6)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2 \quad (6-7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2} \quad (6-8)$$

VI.1.11.2 - Percent Bias (PBIAS)

Mesure la tendance moyenne des valeurs simulées (plus grande ou plus petite) par rapport aux valeurs observées (GUPTA et al., 1999), donc estime la sous ou surestimation de la simulation. Sa valeur optimale est de « 0 ». Des valeurs positives de ce critère indiquent qu'il y a sous-estimation du biais et des valeurs négatives indiquent qu'il y a surestimation du biais.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)}{\sum_{i=1}^n Q_o} \quad (6-9)$$

Ce critère est recommandé pour sa capacité d'indiquer la performance du modèle.

La variation du PBIAS est plus importante durant les périodes sèches que durant les périodes humides (GUPTA et al., 1999).

VI.1.11.3 - RMSE-observations standard déviation ratio (RSR)

Moriasi et al. (2007) ont également recommandé l'utilisation du rapport de l'erreur quadratique moyenne à l'écart type des données observées (RSR), calculé comme suit:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_o.moy)^2}} \quad (6-10)$$

Le RSR incorpore les avantages d'un indice d'erreur statistique et d'un facteur de normalisation pour qu'il soit applicable aux différentes variables, en accordant le même poids à tous les débits.

Il varie de la valeur optimale « 0 » qui indique une variation résiduelle nulle et donc un modèle de simulation parfait, à des valeurs positives très grandes.

Le RSR et le NSE sont liés et donnent en pratique des classements de performances similaires.

VI.1.12 - Intervalles d'efficacité des modèles

Dans la présente étude, on s'intéressera lors de la validation des modèles étudiés à ceux jugés les plus pertinents par l'étude des critères d'évaluation des modèles pluie-débit (Moriassi et al - 2007) et confirmé et complété par (Moriassi et al -2015)

En se basant sur les recommandations des études passées, la combinaison de l'évaluation graphique avec l'évaluation statistique, les indices d'erreurs et les critères adimensionnels plus précisément, devrait être utilisée pour l'évaluation des modèles hydrologiques. Et les critères jugés les plus performants sont : le NSE, PBIAS, et RSR.

Moriassi et al. (2007) ont fourni des cotes de performance pour ces critères dans le contexte de la modélisation du ruissellement de surface.

En général, un modèle de simulation des débits liquides est jugé « satisfaisant » si :

$$\left\{ \begin{array}{l} NSE > 50\% \\ RSR \leq 0.7 \\ |PBIAS| < 25\% \end{array} \right.$$

Et pour un pas de temps mensuel :

Tableau VI.1 : Intervalles d'appréciation des critères d'évaluation

Taux de performance	RSR	NSE	PBIAS : Débits liquide (%)
Très bon	$0.0 \leq RSR \leq 0.5$	$0.75 < NSE \leq 1.0$	$-10 \leq PBIAS \leq 10$
Bon	$0.5 < RSR \leq 0.6$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$-15 \leq PBIAS < 15$
Satisfaisant	$0.6 < RSR \leq 0.7$	$0.5 < NSE \leq 0.65$	$-25 \leq PBIAS < 25$
Insatisfaisant	$RSR > 0.7$	$NSE \leq 0.5$	$ PBIAS \geq 25$

Un certain nombre d'autres mesures de performance sont également fournies à titre de référence dans ce travail : l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le RSR et le Coefficient de corrélation de Pearson (r).

VI.2- Résultats des GR :

VI.2.1- Le modèle journalier GR4J :

VI.2.1.1- Calibration :

Dans cette partie, nous avons fait la calibration des paramètres du modèle suivant la méthode du 'try and error', avec intégration d'une période de routing du programme au départ, afin d'atteindre le mieux possible les niveaux initiaux dans les réservoirs (S0 et R0), et d'améliorer ainsi les résultats, nous avons gardé les mêmes paramètres de calibration.

VI.2.1.2-Paramètres da calibration :

Tableau VI.2: Paramètres de calibration du modèle GR4J

Bassin	X1	X2	X3	X4
Isser	134.29	-0.07	16.44	1.96
Cheffia	403.43	-0.20	7.39	1.24
Zardezas	204.28	-2.41	20.00	1.28
Boucheougouf	298.87	0.41	12.18	1.53

VI.2.1.3-Tableau récapitulatif :

Tableau VI.3: Valeurs des critères d'évaluation du modèle GR4J

Bassin	Calibration				Validation			
	Nash(%)	R ²	Bilan(%)	PBIAS (%)	Nash(%)	R ²	Bilan(%)	PBIAS (%)
Isser	76.84	0.73	95.60	4.40	42.63	0.43	85.20	14.80
Cheffia	77.00	0.72	63.00	27.00	78.40	0.82	112.90	-12.90
Zardezas	83.10	0.84	75.30	24.70	78.10	0.83	51.40	48.60
Boucheougouf	58.45	0.61	141.5	-41.50	35.61	0.50	178.2	-78.2
Moyenne	76.92	0.73	93.85	3.65	58.685	0.645	106.93	-6.925

VI.2.1.4- Illustration graphique :

Nous avons choisi d'illustrer graphiquement les résultats du bassin de la Cheffia.

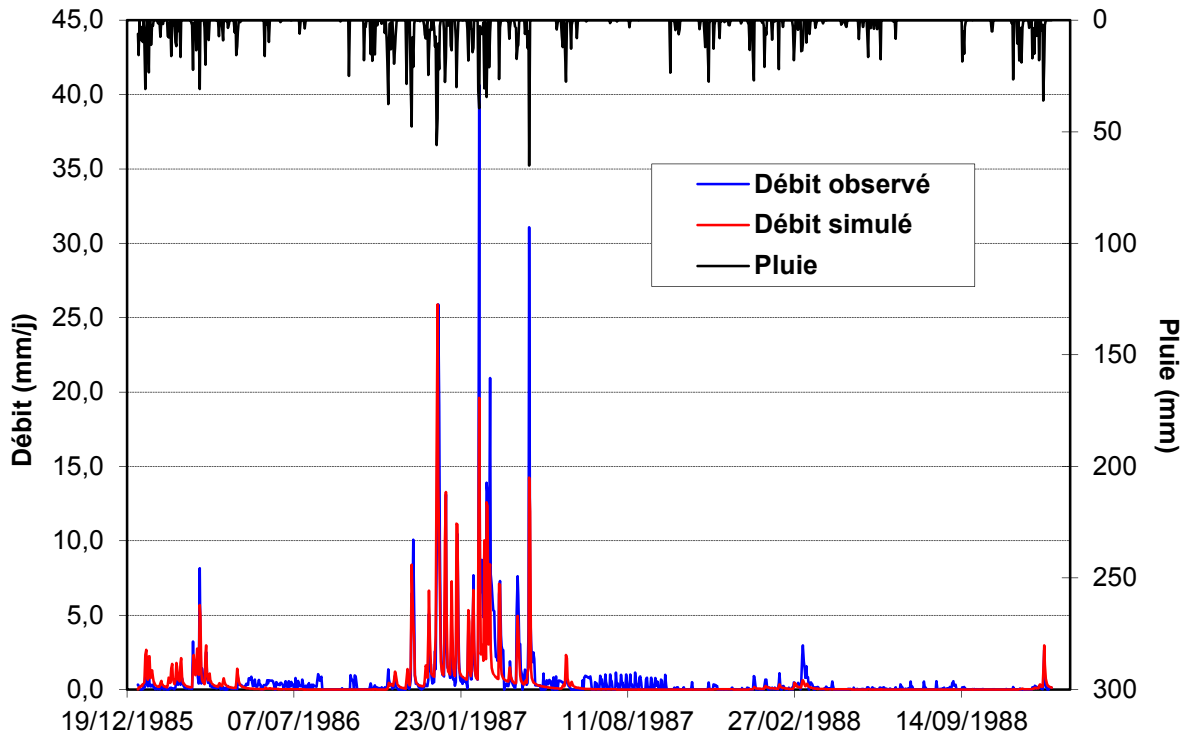


Figure (VI.1) : Calibration Cheffia GR4J

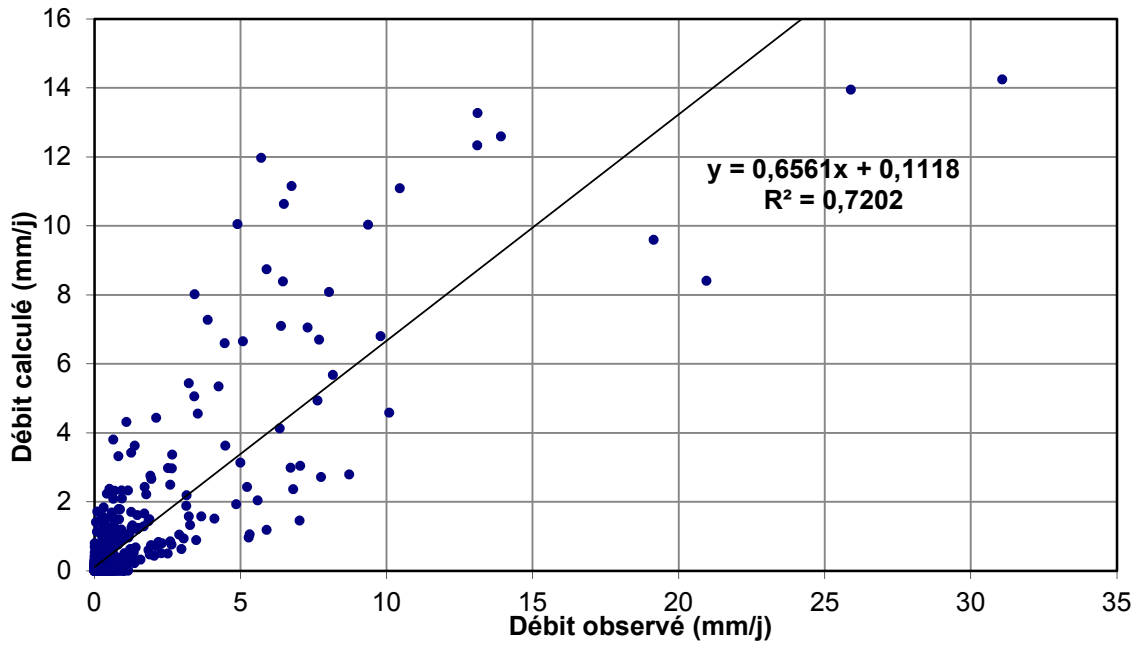


Figure (VI.2) : Calibration Cheffia GR4J

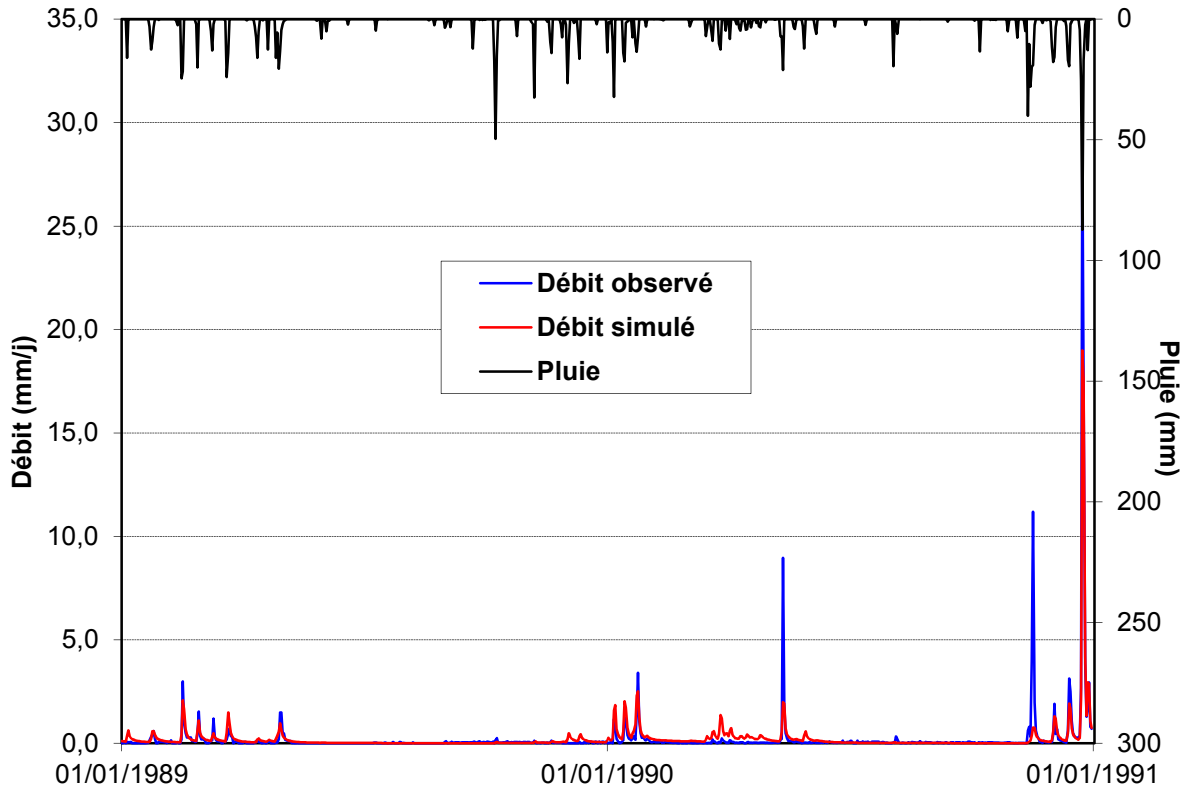


Figure (VI.3) : Validation CheffiaGR4J

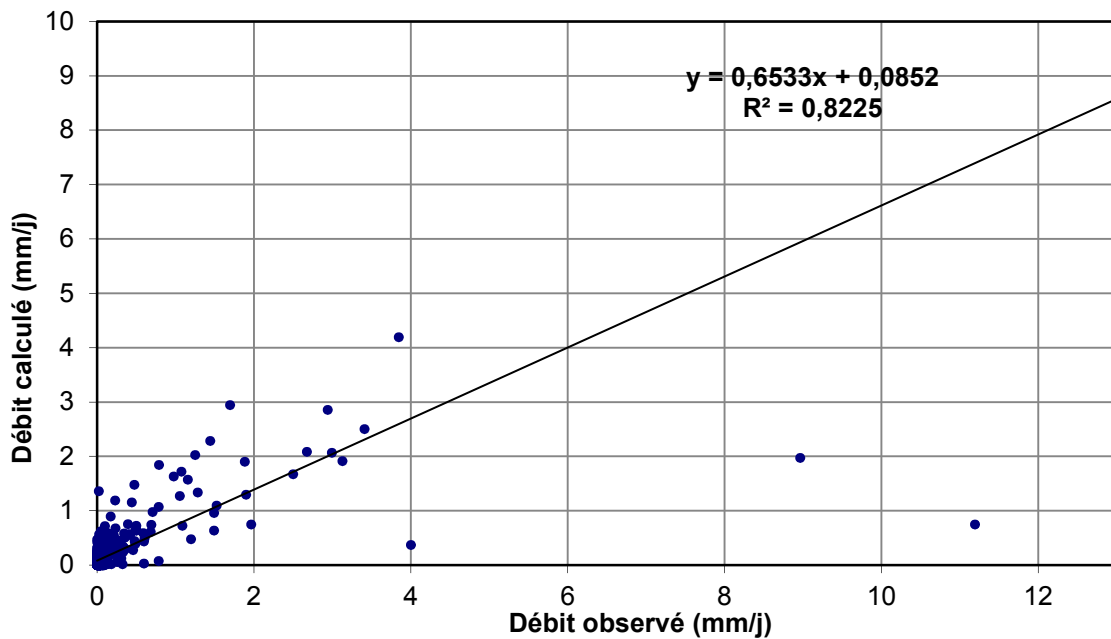


Figure (VI.4) : Validation Cheffia GR4J

VI.2.1.5 Commentaires sur les résultats des GR4J :

Les résultats de la modélisation GR4J diffèrent d'un bassin à un autre. En effet, le NSE est satisfaisant pour les phases de calibration et de validation pour les bassins de Cheffia et Zardezas (NSE > 0.50).

Toutefois, le report des pics de débit est jugé insuffisant, d'après les graphiques obtenus, ce qui montre que la capacité du modèle est meilleure dans la reproduction des valeurs moyennes observées, que pour les valeurs extrêmes.

Par contre pour les bassins des Isser et de Bouchegouf, les résultats sont jugés insuffisants dans la phase de validation bien qu'ils soient satisfaisants dans la phase de calibration (NSE < 0.50). Par conséquent, les modèles obtenus pour ces bassins ont une capacité prédictive très limitée.

VI.2.2- Le modèle mensuel GR2M :

VI.2.2.1- Calibration :

De la même manière que pour GR4J, nous avons calibré le modèle en choisissant par la méthode 'try and error' les paramètres X1 et X2.

VI.2.2.2- Paramètres de calibration :

Tableau VI.4: Paramètres de calibration du modèle GR2M

Bassin	X1	X2
Isser	221.41	0.40
Cheffia	365.04	0.85
Zardezaz	221.41	0.80
Bouchegouf	270.43	0.97

VI.2.2.3- Tableau récapitulatif :

Tableau VI.5: Valeurs des critères d'évaluation du modèle GR2M

Bassin	Calibration				Validation			
	Nash(%)	R ²	Bilan(%)	PBIAS (%)	Nash(%)	R ²	Bilan(%)	PBIAS (%)
Isser	43.6	0.37	66.3	33.7	13.43	0.20	64.7	35.3
Cheffia	77.75	0.76	101.4	-1.4	82.9	0.88	80.6	19.4
Zardezaz	82.91	0.82	101.9	-1.9	81.32	0.83	94.0	6
Bouchegouf	65.0	0.66	103.0	-3.0	41.44	0.70	163.2	-63.2
Moyenne	67.315	0.65	93.15	6.85	54.77	0.65	100.63	-0.63

VI.2.2.4- Illustration graphique :

Nous avons choisi d'illustrer graphiquement les résultats du bassin de Zardezas.

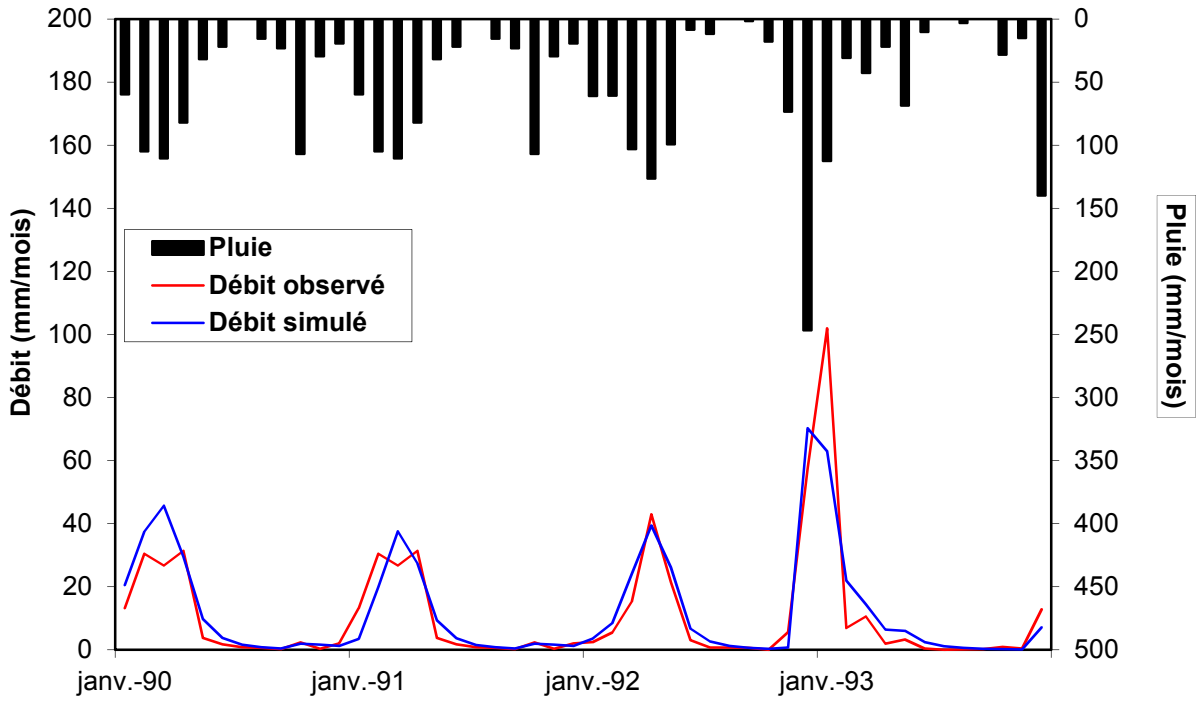


Figure (VI.5) : Calibration GR2M - Zardezas

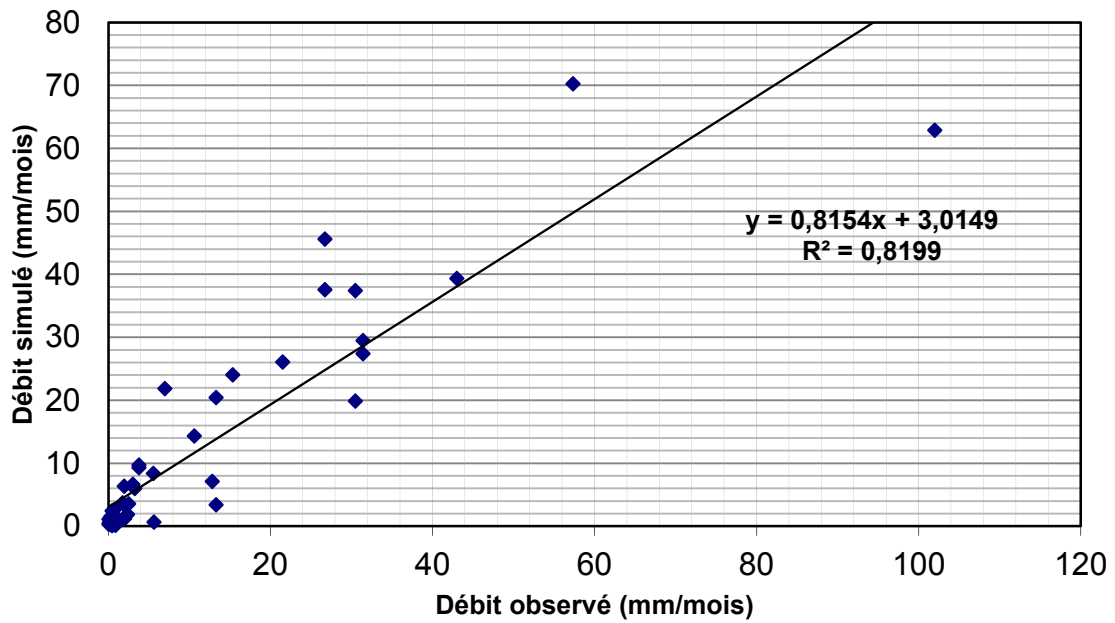


Figure (VI.6) : Calibration GR2M Zardezas

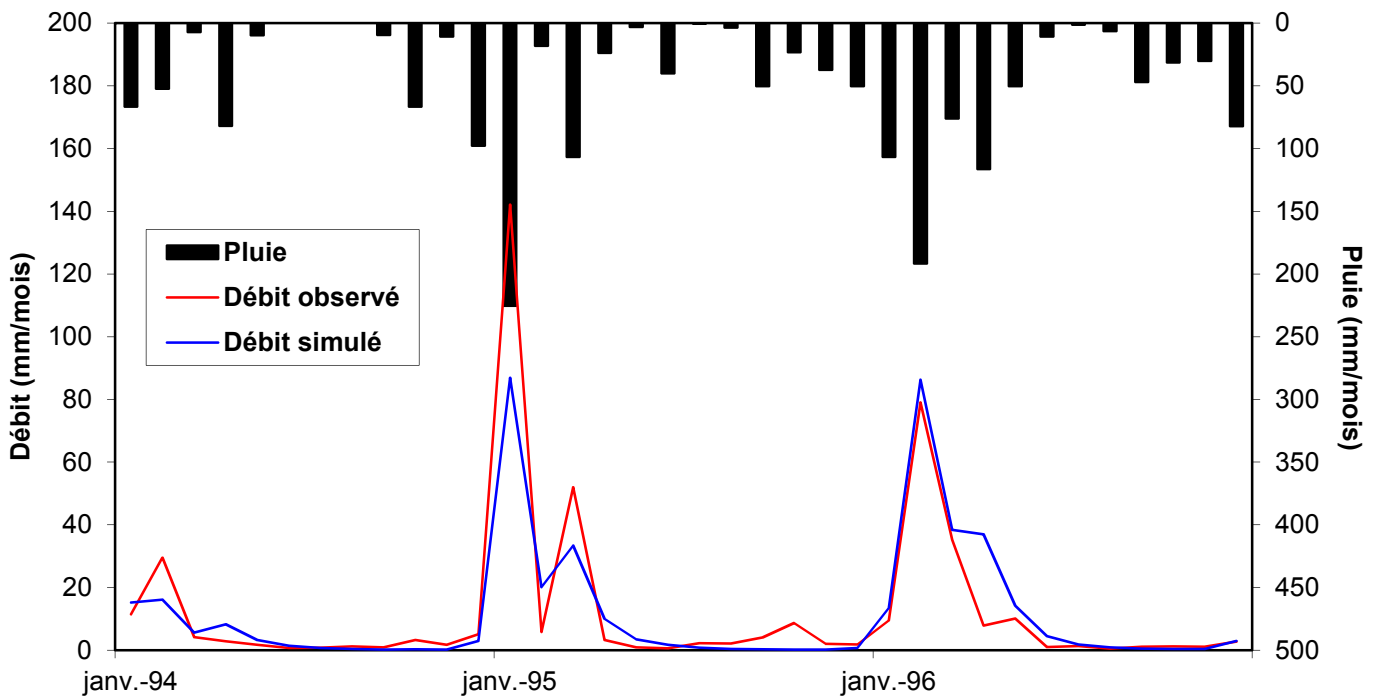


Figure (VI.7) : Validation GR2M Zardezas

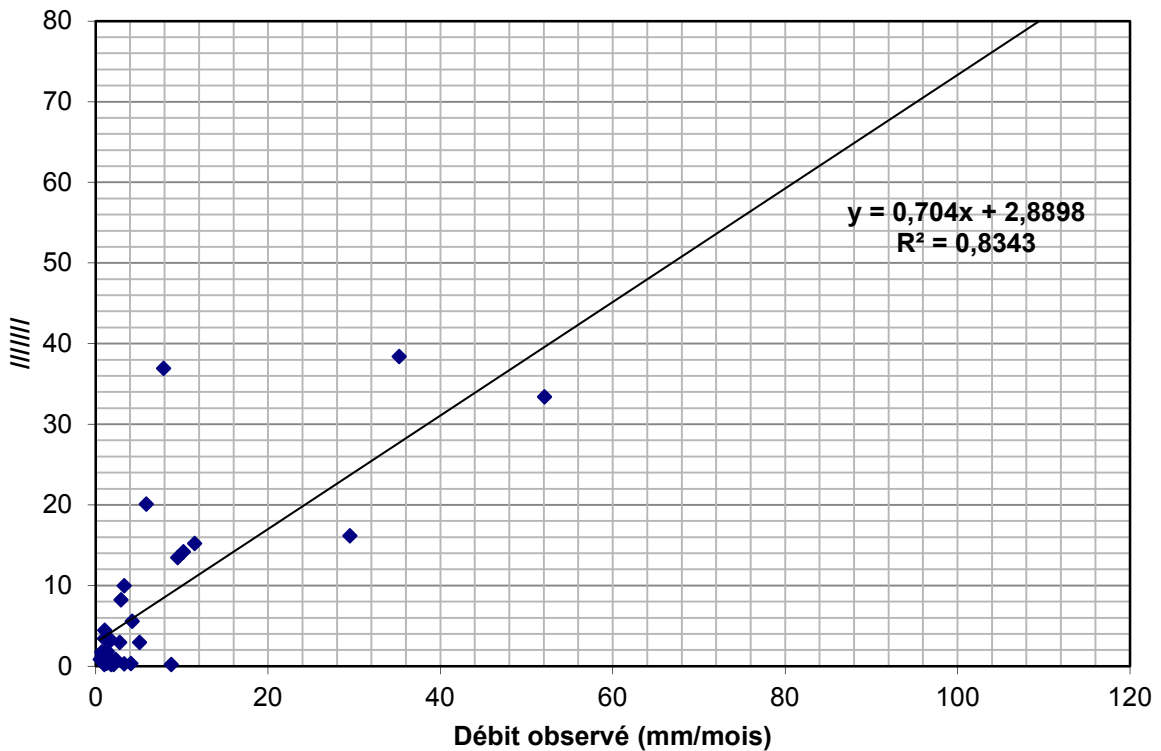


Figure (VI.8) : Validation GR2M Zardezas

VI.2.2.5 Commentaires sur les résultats des GR2M :

Les résultats trouvés pour les 4 bassins étudiés, révèlent que les critères de validation NSE et R^2 obtenus par le modèle GR2M sont très bons pour les deux phases de calibration et de validation dans les bassins de Cheffia et de Zardezas, en effet, les valeurs de NSE trouvés sont respectivement de 78% et 83% pour la phase de calibration, et de 83% et 81% pour la phase de validation. Ces résultats sont confirmés graphiquement, par exemple pour le bassin Zardezas, on remarque une bonne reproduction de l'évolution des débits observés lors des deux phases et essentiellement celle de la calibration.

Par contre, les résultats du modèle GR2M restent très insuffisants pour les bassins des Isser et de Bouchegouf puisque le $NSE \leq 0.50$ surtout en période de validation avec des valeurs respectives de 13 % et 41 %. La modélisation du bassin des Isser pour ce pas de temps est la plus médiocre parmi les quatre bassins.

La reproduction des extremums dans le cas de Cheffia et Zardezas est aussi meilleure.

VI.3- Résultats du Tank Model simple:

Au départ nous avons testé le Tank model simple et classique afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux issus du couplage : Tank Model - Filtre de Kalman.

On a commencé par tester le Tank de Sugawara classique à 4 réservoirs, mais nous avons constaté qu'on pouvait se contenter d'un Tank Model à deux (02) réservoirs, sans qu'il y ait aucune influence significative sur les résultats. En effet la diminution du nombre de paramètres d'un modèle est toujours souhaitée dans un processus de modélisation.

Les résultats de ces essais sont présentés dans ce qui suit :

VI.3.1 Pas de temps journalier :

VI.3.1.1- Paramètres du Tank Model :

Tableau VI.6: Paramètres du Tank Model pour les bassins versants

Nom du bassin	H1	H2	A11	A12	A21	C11	C12	C21	B1	B2
Isser	2.000	30.400	.03800	.08000	0.02800	0.600	0.300	0.337	0.3400	0.06000
Zardezas	20.500	10.600	.02000	.02900	0.0121	0.264	0.136	0.197	0.11100	0.01440
Cheffia	16.000	4.000	0.10000	0.10000	0.16000	0.600	0.300	0.100	0.20000	0.24400
Bouchegouf	4.000	4.000	0.08000	0.08000	0.11000	0.600	0.300	0.090	0.15000	0.22000

VI.3.1.2 -Résultats du Tank Model :

Tableau VI.7: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model (Calage)

	Isser	Zerdezas	Cheffia	Bouchegouf
Nash	0.315	0.457	0.367	-0.632
R²	0.382	0.490	0.429	0.217
RSR	1.696	1.655	0.433	0.721
RMSE	1.545	1.189	1.9676	1.2392
SDEV	0.9105	0.7185	4.5478	1.7179

Tableau VI.8: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model (Validation)

	Isser	Zardezas	Cheffia	Bouchegouf
Nash	0.247	0.469	-0.310	-0.044
R²	0.232	0.557	0.455	0.319
RSR	2.449	1.914	0.384	0.549
RMSE	1.079	1.364	1.6267	1.5502
SDEV	0.4406	0.7127	4.2324	2.8252

VI.3.1.3-Illustration graphique :

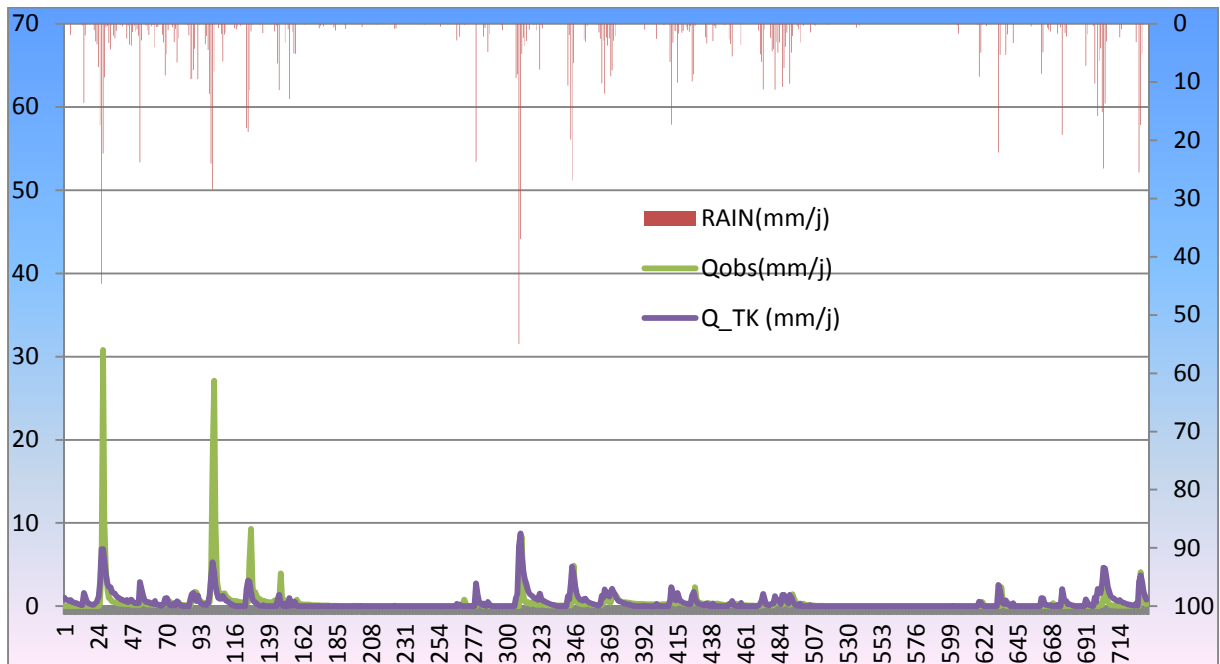


Figure (VI.9) : Calibration du bassin des Isser (TK Model simple- journalier)

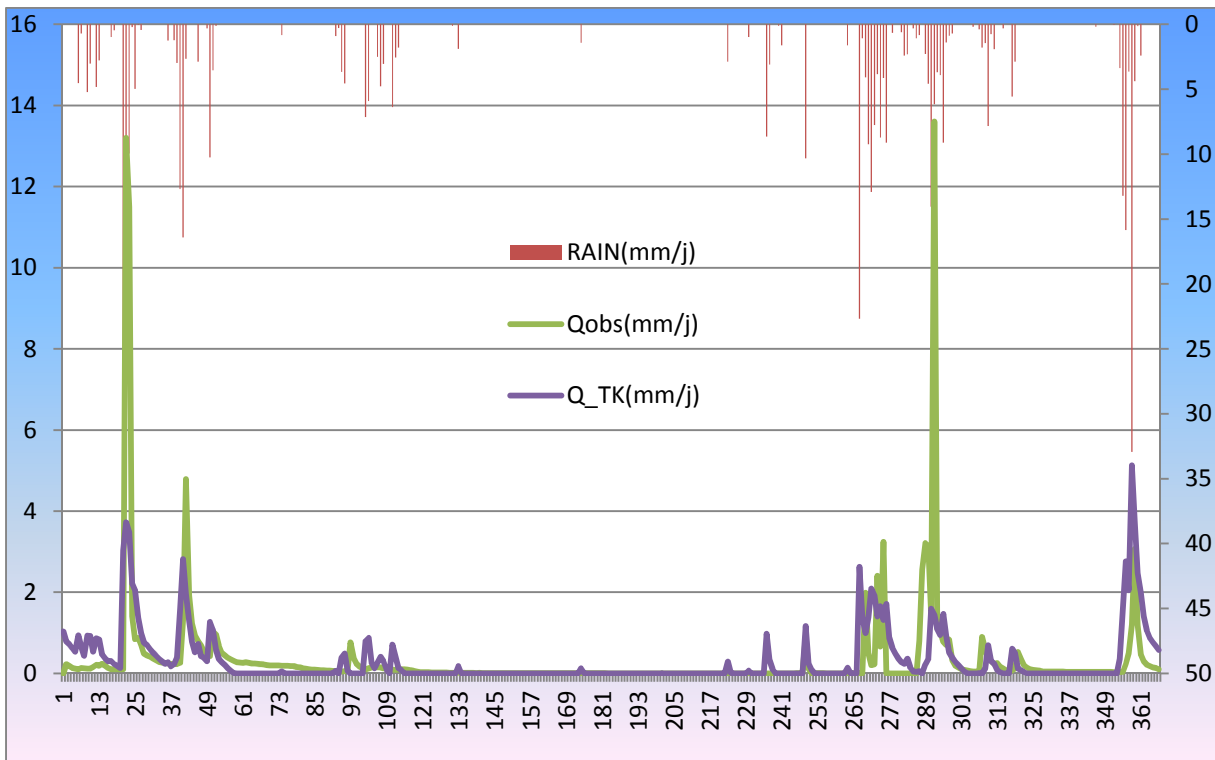
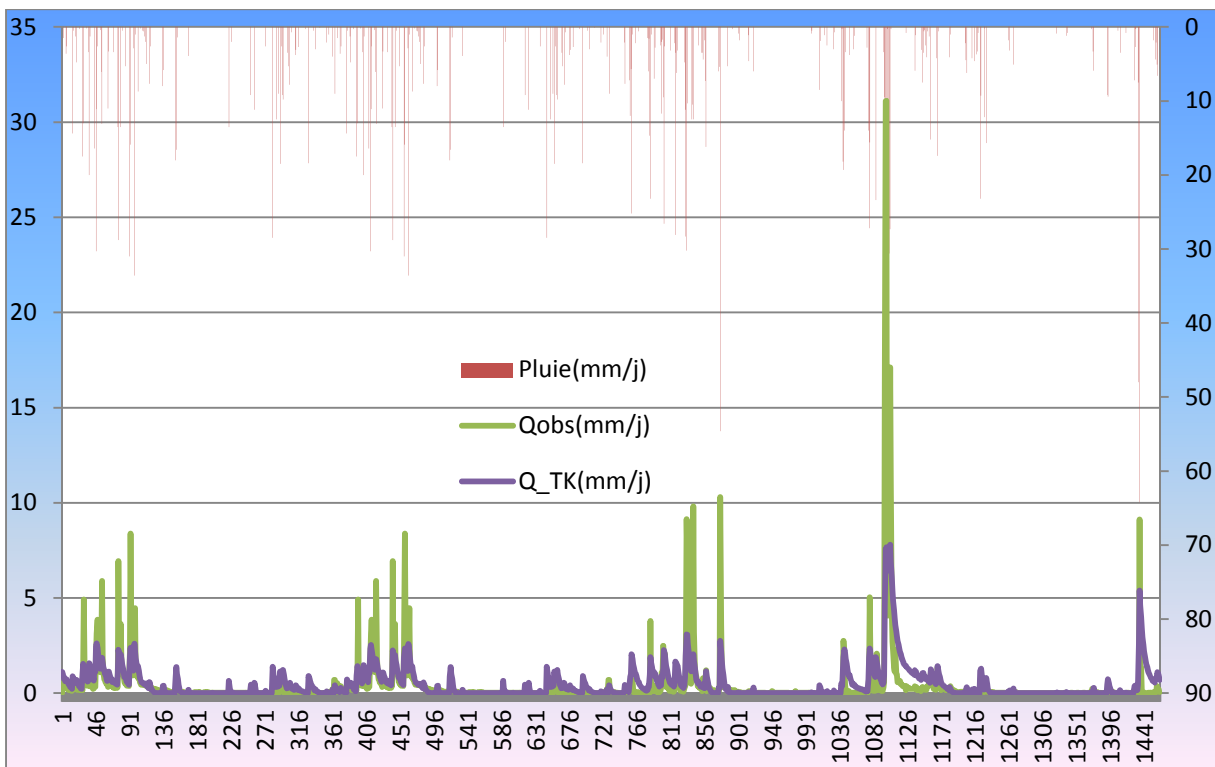


Figure (VI.10) : Validation du bassin des Isser (TK Model simple-journalier)



Figure(VI.11) : Calibration du bassin de Zardezas (TK Model simple-journalier)

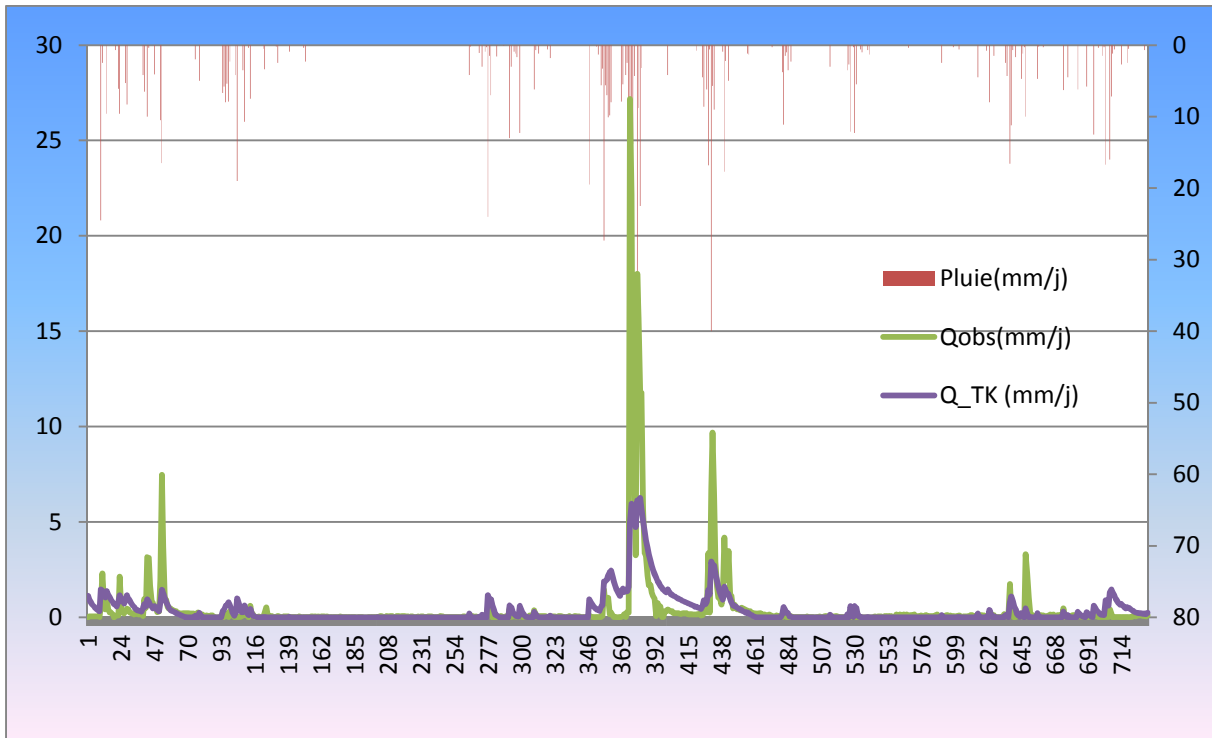


Figure (VI.12) : Validation du bassin de Zardezas (TK Model simple-journalier)

VI.3.1.4 Commentaires sur les résultats du Tank Model simple (journalier) :

Pour les bassins étudiés, les valeurs du critère d'évaluation NSE ($-0.632 \leq NSE \leq 0.457$) pour la calibration, et ($-0.310 \leq NSE \leq 0.469$) pour la validation, ceci signifie que les résultats obtenus sont insatisfaisants. Il en est de même pour les valeurs des autres critères tels que R^2 et RSR qui confirment la médiocrité des résultats.

Les illustrations graphiques montrent que les hydrogrammes simulés ne reproduisent pas bien sur les hydrogrammes observés, et plus particulièrement, les extremums.

On peut alors déduire que le Tank Model simple, simule mal la relation pluie-débit sur les bassins étudiés. Ceci est peut-être dû au fait que la structure unique du Tank utilisée pour modéliser la relation pluie-débit pendant la période d'étude ne peut pas couvrir le comportement variable du bassin versant en fonction du temps vis à vis de cette relation.

VI.3.2 Pas de temps mensuel :

VI.3.2.1- Paramètres du Tank Model :

Tableau VI.9 : Paramètres du Tank Model pour les bassins versants

Nom du bassin	H1	H2	A11	A12	A21	C11	C12	C21	B1	B2
Isser	10.000	10.000	0.03000	0.01500	0.01100	1.500	0.000	0.000	0.0600	0.00000
Zardezaz	6.000	4.000	0.10000	0.10000	0.10000	3.000	0.000	0.000	0.10000	0.00000
Cheffia	6.000	16.000	0.25000	0.10000	0.10000	4.000	3.000	0.000	0.23000	0.00000
Bouchegouf	5.000	10.000	0.10000	0.10000	0.10000	1.000	0.500	0.000	0.25000	0.00000

VI.3.2.2 -Résultats du TankModel :

Tableau VI.10: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model (phase de calage)

	Isser	Zerdezas	Cheffia	Bouchegouf
Nash	0.232	0.616	0.590	0.485
R²	0.246	0.629	0.614	0.501
RSR	0.311	0.062	0.025	0.123
RMSE	6.6441	11.574	20.718	12.494
SDEV	21.367	185.33	835.00	101.26

Tableau VI.11: Valeurs des critères d'évaluation du TK Model (phase de validation)

	Isser	Zardezaz	Cheffia	Bouchegouf
Nash	0.141	0.546	0.410	0.591
R²	0.157	0.601	0.413	0.597
RSR	0.410	0.084	0.059	0.058
RMSE	8.127	18.330	24.003	12.02
SDEV	19.813	218.86	1027.2	205.84

VI.3.2.3-Illustration graphique :

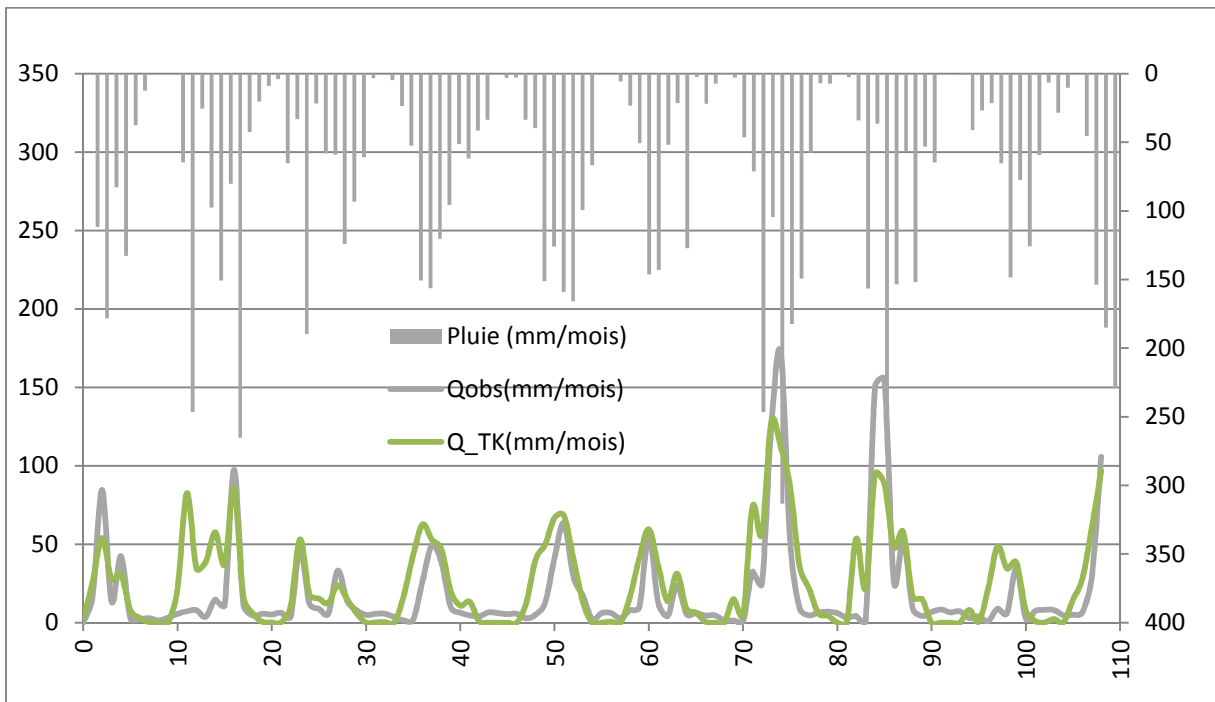


Figure (VI.13) : Calibration du bassin de Cheffia (TK Model simple-mensuel)

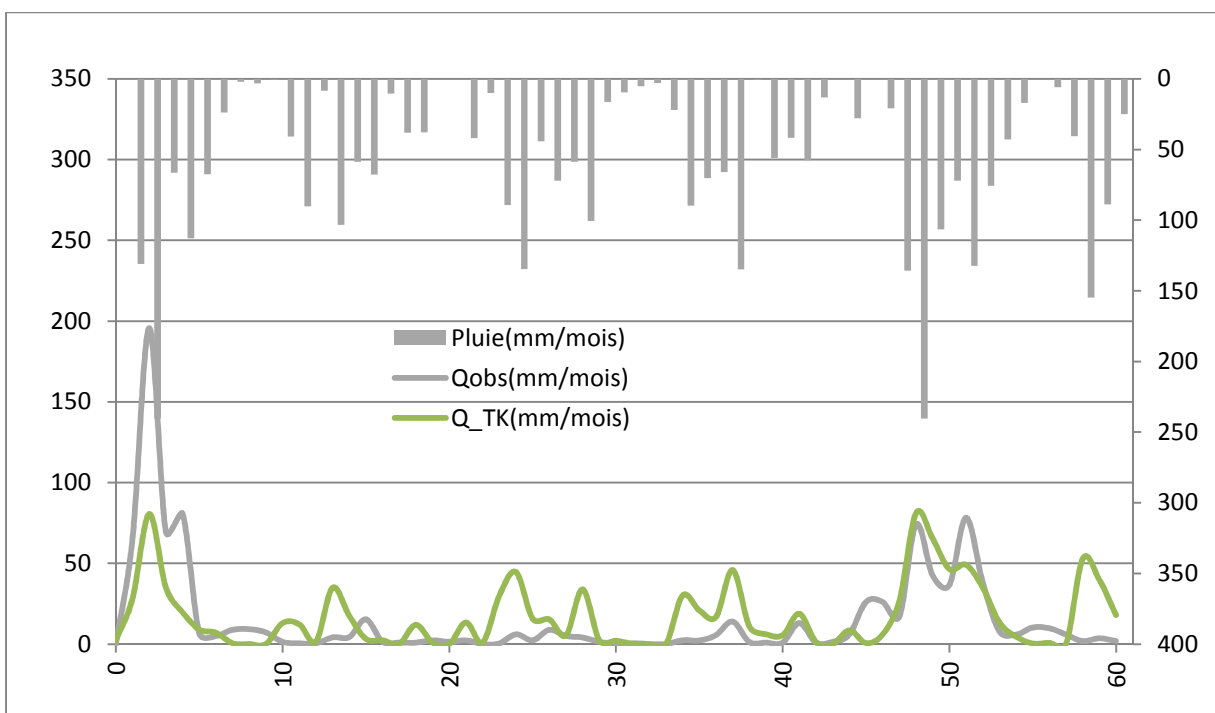


Figure (VI.14) : Validation du bassin de Cheffia (TK Model simple-mensuel)

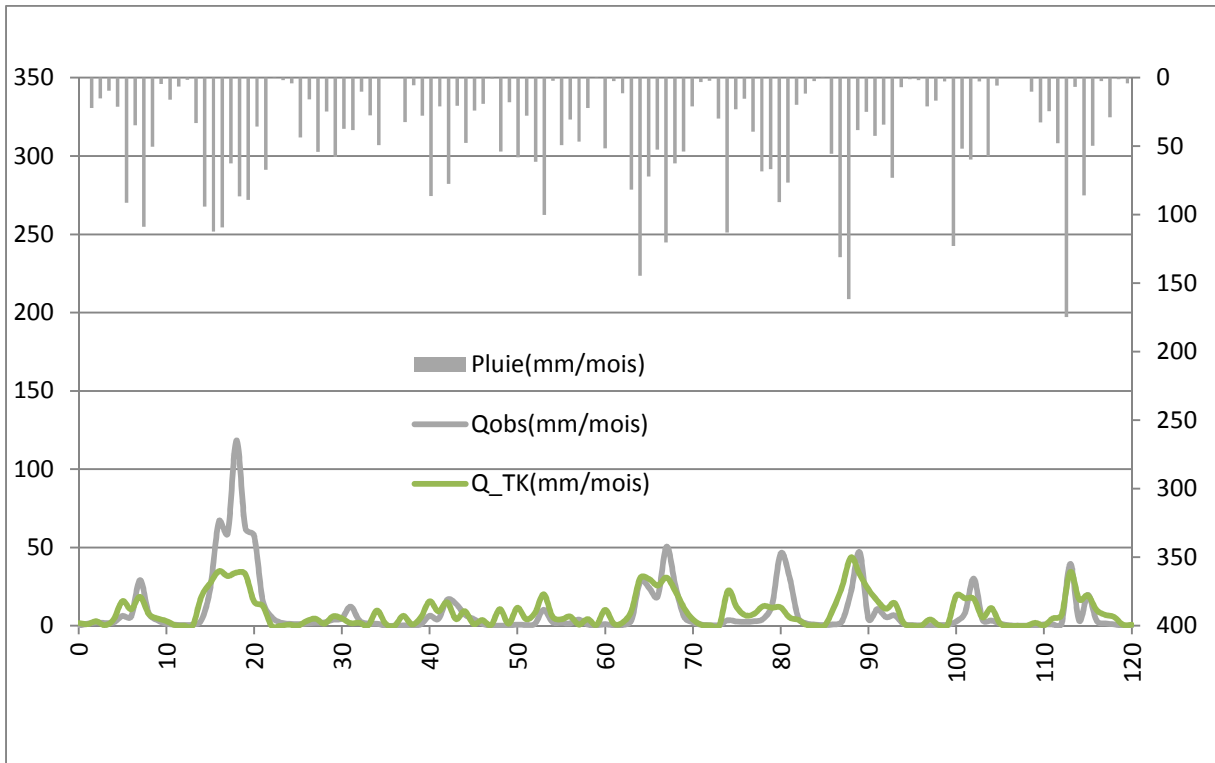


Figure (VI.15) : Calibration du bassin de Bouchegouf (TK Model simple-mensuel)

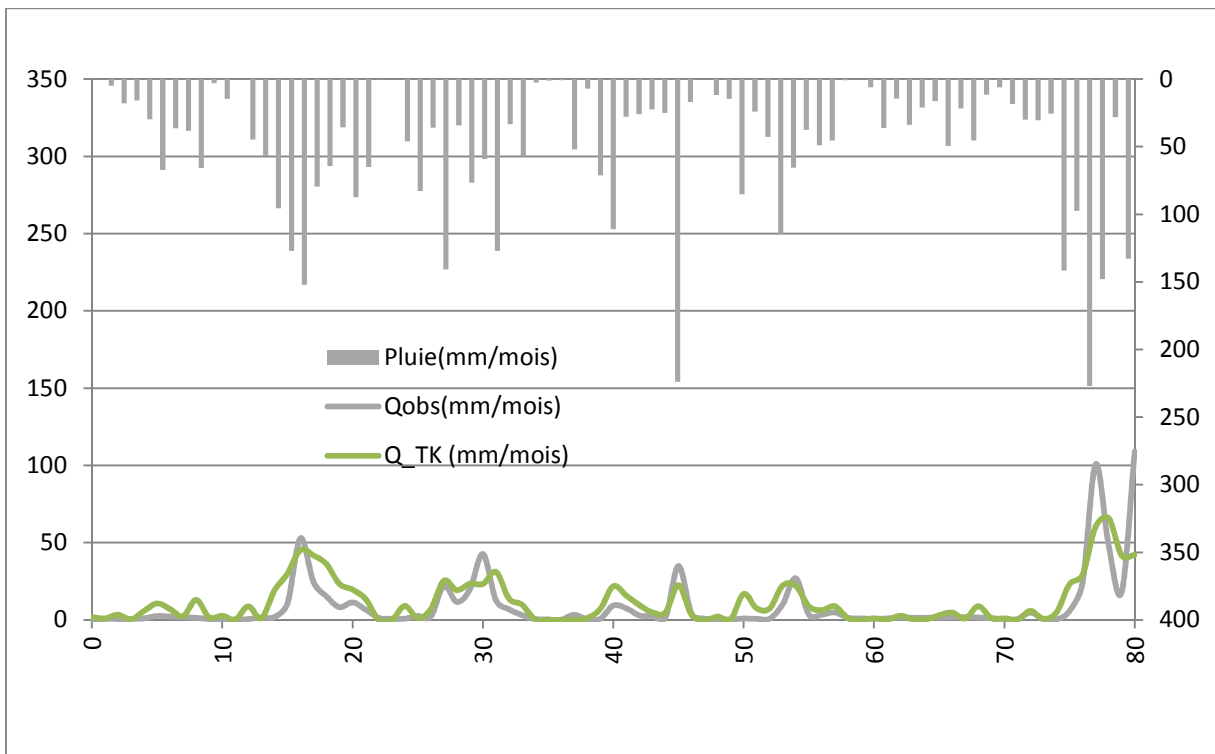


Figure (VI.16) : Validation du bassin de Bouchegouf (TK Model simple-mensuel)

VI.3.2.4 Commentaires sur les résultats du Tank Model simple (Mensuel) :

Pour l'étape de calibration, les résultats obtenus peuvent être considérés comme insatisfaisants pour les bassins des Isser et Bouchegouf. A l'inverse, ceux des bassins de Zardezas et de la Cheffia peuvent être considérés comme satisfaisants ($NSE \geq 0.50$).

Pour la phase de validation, les résultats de Zardezas demeurent satisfaisants, par contre ceux de la Cheffia chutent à $NSE = 0.410$, alors que pour Bouchegouf ces résultats, sont sensiblement meilleurs, à l'inverse de ceux des Isser qui demeurent toujours insatisfaisants.

Néanmoins que ces résultats sont meilleurs que ceux obtenus pour le pas de temps journalier, ils restent insuffisants.

Les illustrations graphiques confirment ces dernières conclusions.

VI.4- Résultats du Tank Model utilisant le Filtre de Kalman Standard:

Le modèle réservoir appelé « TankModel de Sugawara » a été couplé à un Filtre de Kalman Standard (Lee and Singh, 1999) afin de modéliser la relation pluie-débit sur les quatre bassins étudiés. Les résultats de cette modélisation sont présentés dans cette partie.

VI.4.1 Pas de temps journalier :

VI.4.1.1- Paramètres du Tank Model :

Notre formulation du Tank Model couplé au Filtre de Kalman (TK_FK) Standard, permet non seulement d'effectuer un filtrage du bruit blanc sur les mesures et sur le modèle, mais aussi de déterminer l'état du système dynamique à toute étape k , ce que nous avons noté $X(k/k)$.

Le processus de calcul dans le Filtre de Kalman nécessite la définition de l'état initial du système $X(0/0)$; afin de s'approcher de l'état réel du système au départ et de son évolution, nous avons choisi de prendre comme état initial le Tank Model simple avec ses caractéristiques déjà cités au paragraphe VI.3 (pas de temps Journalier).

VI.4.1.2- Paramètres du filtre :

Pour Tous les bassins étudiés, nous avons utilisé les mêmes paramètres du filtre à savoir :

La covariance de bruit : $R = 10^{-4}$.

La diagonale de la matrice de covariance :

$P(0,0) = (0.25, 0.25, 0.1, 0.3, 0.3, 3, 3, 3)$

La covariance de bruit du processus $M(k)$ est une matrice de 10^{-4} sur la diagonale et 0 dans tout le reste.

VI.4.1.3-Résultats :

a) Résultats du calage :

Tableau VI.12: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Calage)

	Isser	Cheffia	Zardezaz	Boucheougouf	Moyenne
Nash	0.9904	0.9083	0.9196	0.9585	0.9442
R²	0.9906	0.9166	0.9389	0.9592	0.951325
PBIAS	1.4627	6.4532	19.1632	6.3457	8.3562
RSR	0.0981	0.3028	0.2835	0.2037	0.222025
RMSE	0.1831	0.7503	0.4576	0.1977	0.397175

b) Résultats de la validation :

Tableau VI.13: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Validation)

	Isser	Cheffia	Zardezaz	Boucheougouf	Moyenne
Nash	0.9249	0.9902	0.8693	0.9976	0.9455
R²	0.9287	0.9931	0.9274	0.9976	0.9617
PBIAS	2.4787	5.6292	14.5578	3.1716	6.459325
RSR	0.2741	0.0991	0.3616	0.049	0.19595
RMSE	0.3418	0.1413	0.6779	0.0744	0.30885

VI.4.1.4. Illustration graphique :

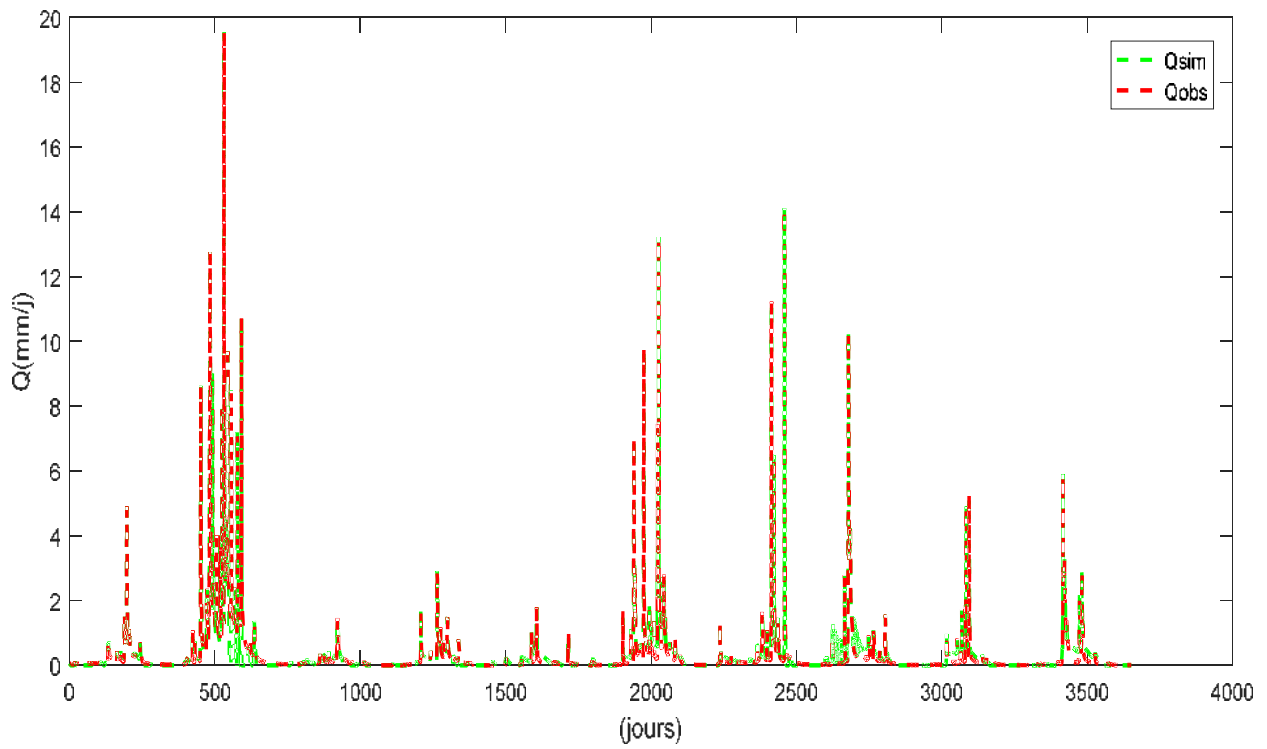


Figure (VI.17) : Calibration du bassin de Bouchegouf

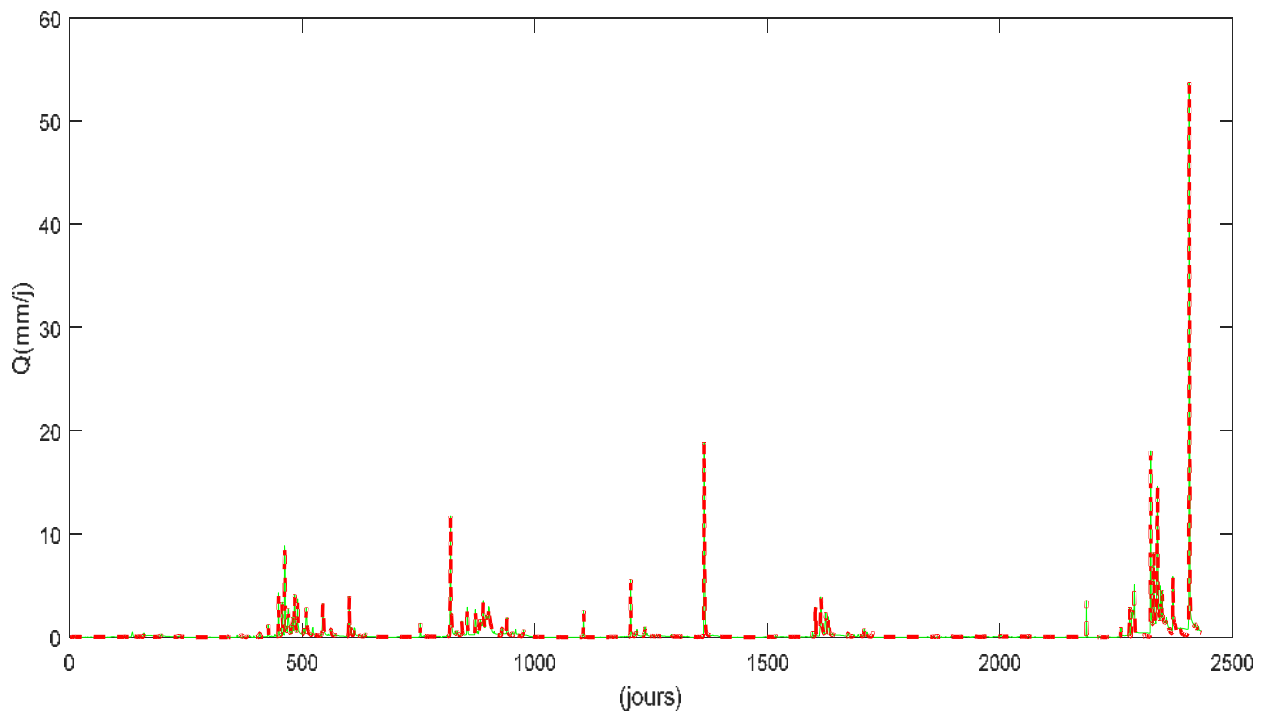


Figure (VI.18) : Validation du bassin de Bouchegouf

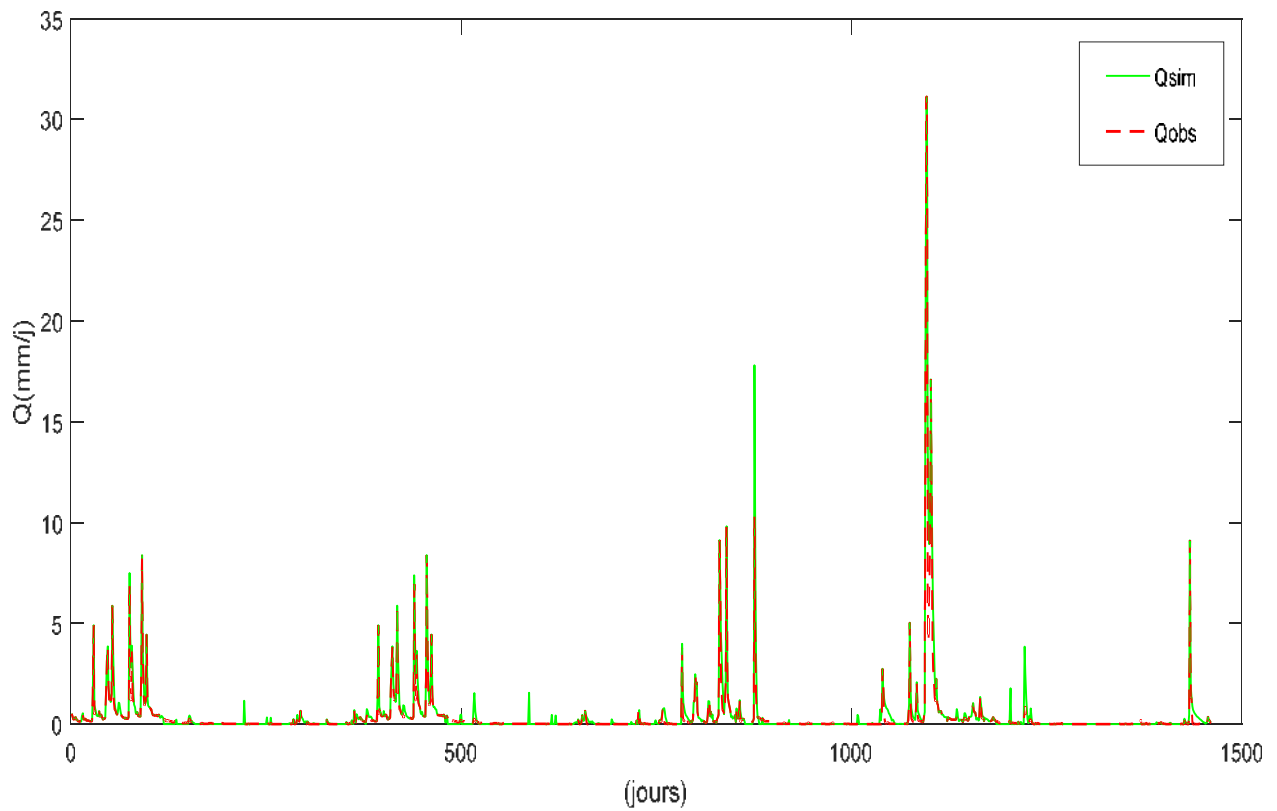


Figure (VI.19) : Calibration du bassin de Zardezas

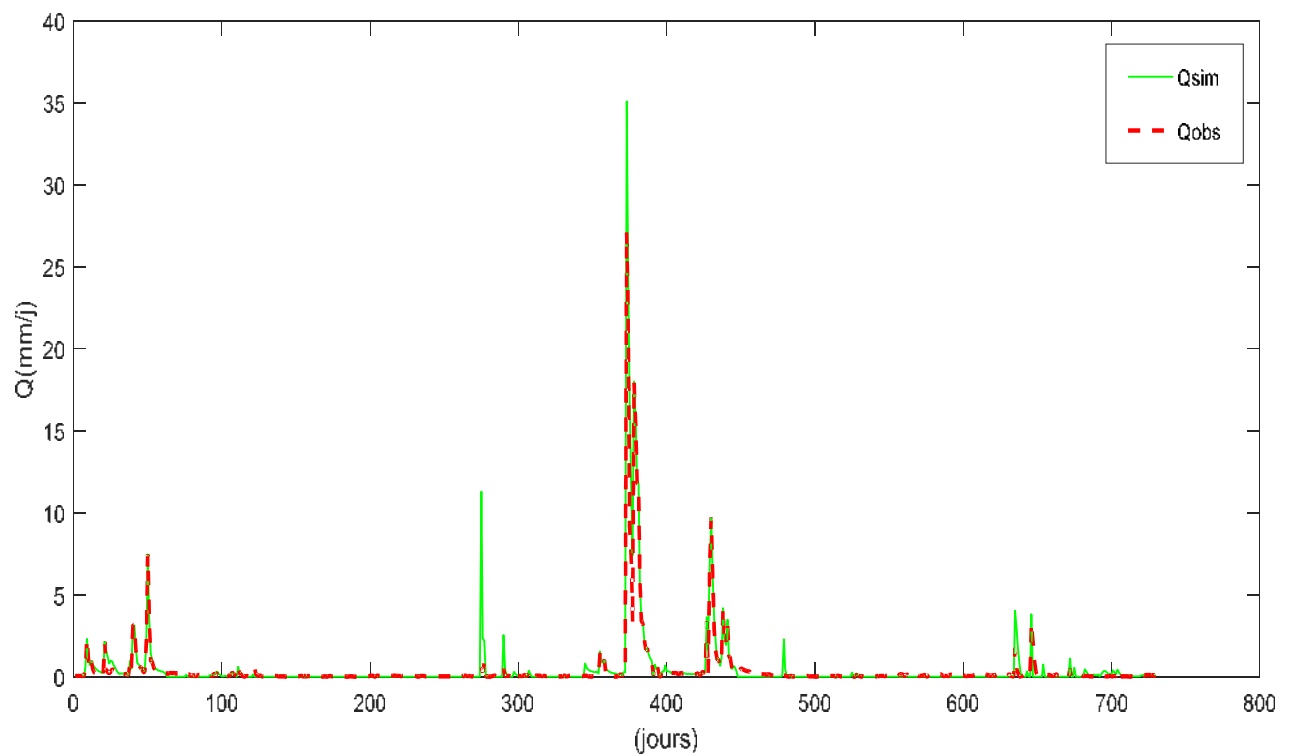


Figure (VI.20) : Validation du bassin de Zardezas

VI.4.1.5 Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Standard (Pas de temps journalier) :

Les résultats de la modélisation sont très bons, que ce soit pour la partie calage ou validation, pour les quatre bassins versants ($NSE \geq 0.90$; $RSR \leq 0.31$), sauf pour le bassin de Zardezas où les résultats se dégradent légèrement lors de la phase de validation ($NSE = 87\%$, $RSR = 0.36$).

Ces résultats sont corroborés par le critère graphique où l'on voit bien que le modèle adopté reproduit parfaitement l'évolution des débits observés et simulés pour les deux périodes, sauf pour la partie validation de Zardezas, où les pics simulés présentent un écart considérable avec les pics observés.

VI.4.2 Pas de temps mensuel :

VI.4.2.1- Paramètres du TankModel :

Le processus de calcul dans le Filtre de Kalman nécessite la définition de l'état initial du système $X(0/0)$; afin de s'approcher de l'état réel du système au départ et de son évolution nous avons choisi de prendre comme état initial le Tank model simple avec ses caractéristiques déjà cités dans le paragraphe VI.3 (Pas de temps mensuel).

VI.4.2.2- Paramètres du filtre

- Pour le bassin des **Isser**, nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

La covariance de bruit : $R = 0.01$.

La diagonale de la matrice de covariance :

$$P(0,0) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.3, 3, 3, 3)$$

La covariance de bruit du processus $M(k)$ est une matrice de 10^{-5} sur la diagonale et 0 dans le reste.

- Pour le bassin de **Zardezas**, nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

La covariance de bruit : $R = 0.0001$.

La diagonale de la matrice de covariance :

$$P(0,0) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.1, 3, 3, 3)$$

La covariance de bruit du processus $M(k)$ est une matrice de 10^{-4} sur la diagonale et 0 dans le reste.

- Pour le bassin de la **Cheffia**, nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

La covariance de bruit : $R = 0.0001$.

La diagonale de la matrice de covariance :

$$P(0,0) = (0.25, 0.25, 0.1, 0.3, 3, 3, 3)$$

La covariance de bruit du processus $M(k)$ est une matrice de 10^{-4} sur la diagonale et 0 dans le reste.

- Pour le bassin de **Bouhegouf**, nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

La covariance de bruit : $R = 0.0001$.

La diagonale de la matrice de covariance : $P(0,0) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 3, 3, 3)$

La covariance de bruit du processus $M(k)$ est une matrice de 10^{-4} sur la diagonale et 0 dans le reste.

VI.4.2.3-Résultats :

a) Résultats du calage :

Tableau VI.14: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Calage)

	Isser	Zardezaz	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
NSE	0.9313	0.9497	0.9138	0.8408	0.9089
R²	0.9352	0.9527	0.9239	0.8489	0.9152
PBIAS	4.8449	4.3464	4.4499	12.0888	6.4325
RSR	0.2621	0.2242	0.2935	0.399	0.2947
RMSE	1.9853	4.1716	9.4866	6.9381	5.6454

b) Résultats de la validation :

Tableau VI.15: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Standard (Validation)

	Isser	Zardezaz	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
NSE	0.8899	0.9802	0.845	0.9938	0.9272
R²	0.8955	0.9814	0.8637	0.9951	0.9339
PBIAS	2.3103	4.5915	24.9178	5.9209	9.4351
RSR	0.3317	0.1408	0.3938	0.0784	0.2362
RMSE	2.9025	3.821	12.283	1.4721	5.1197

VI.4.2.4-Illustration graphique

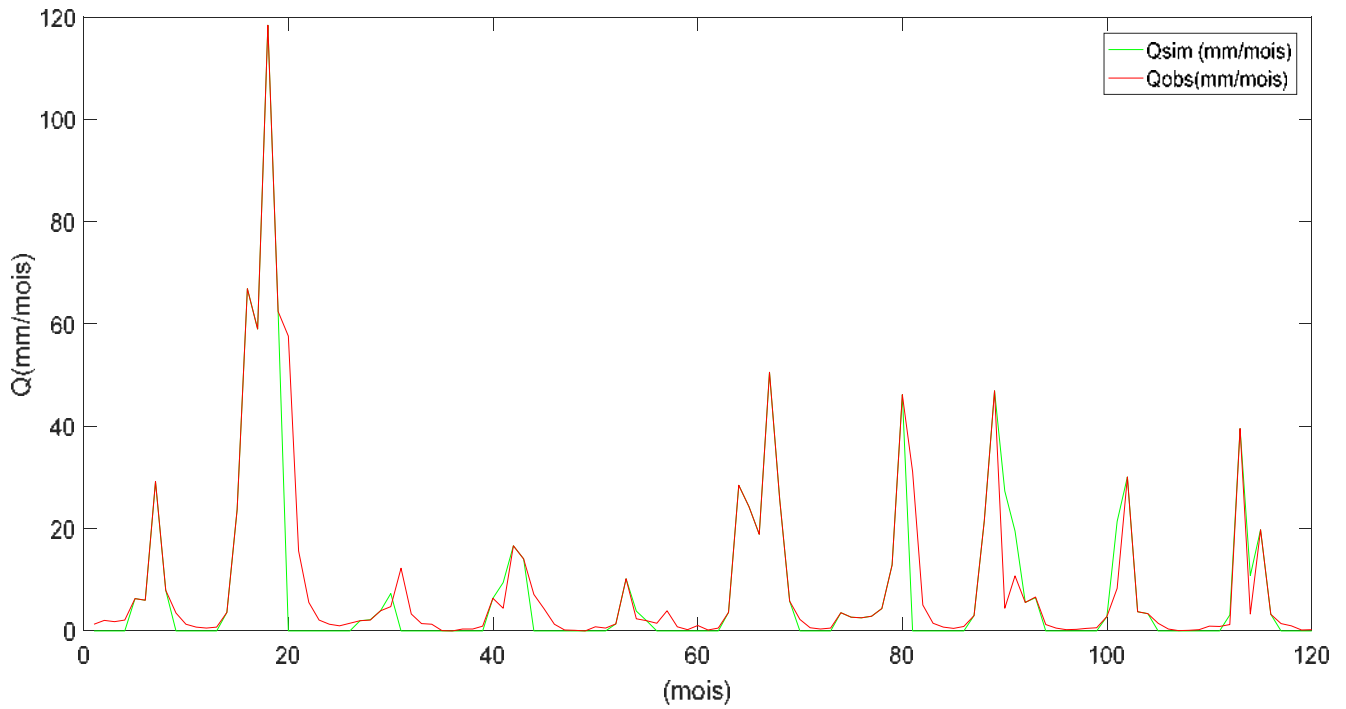


Figure (VI.21) : Calibration du bassin de Bouchegouf

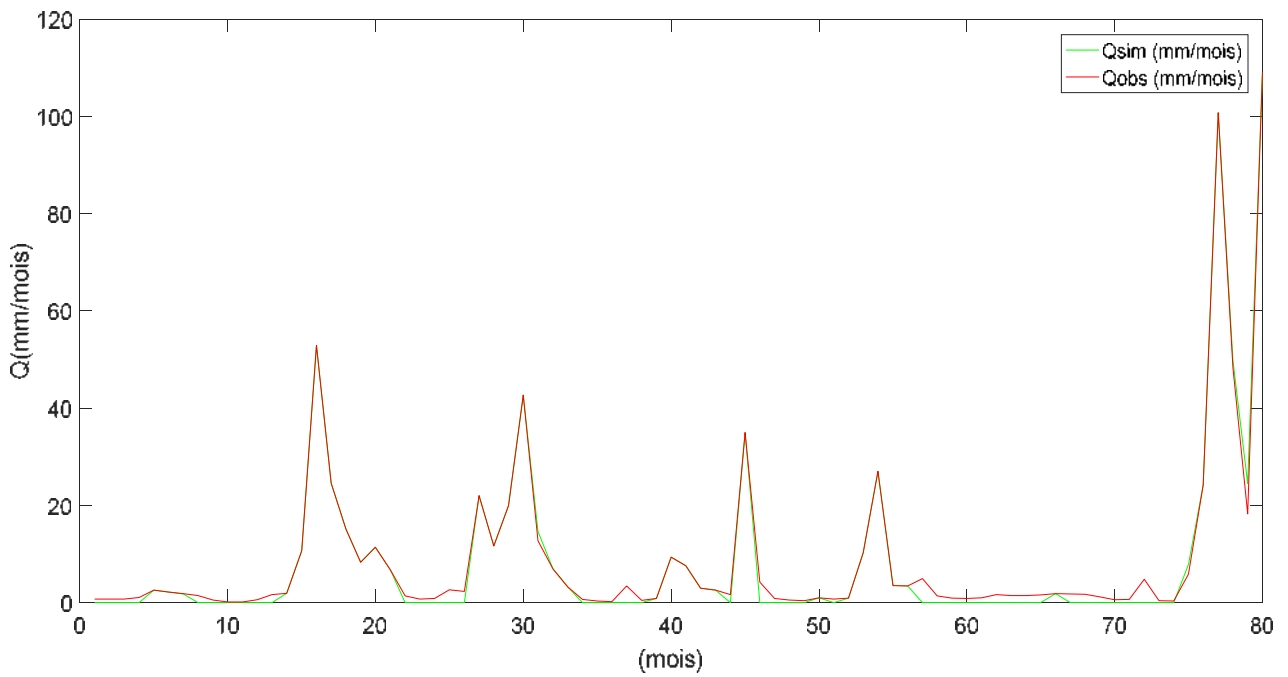


Figure (VI.22) : Validation du bassin de Bouchegouf

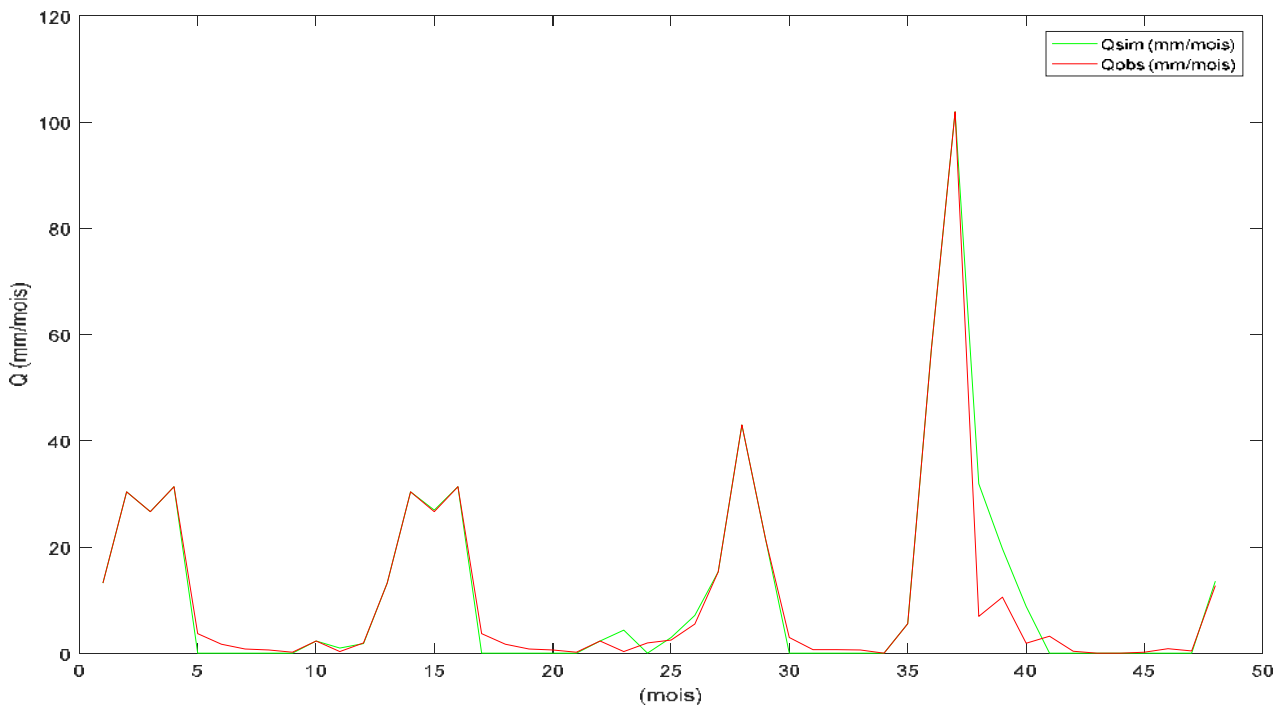


Figure (VI.23) : Calibration du bassin de Zardezas

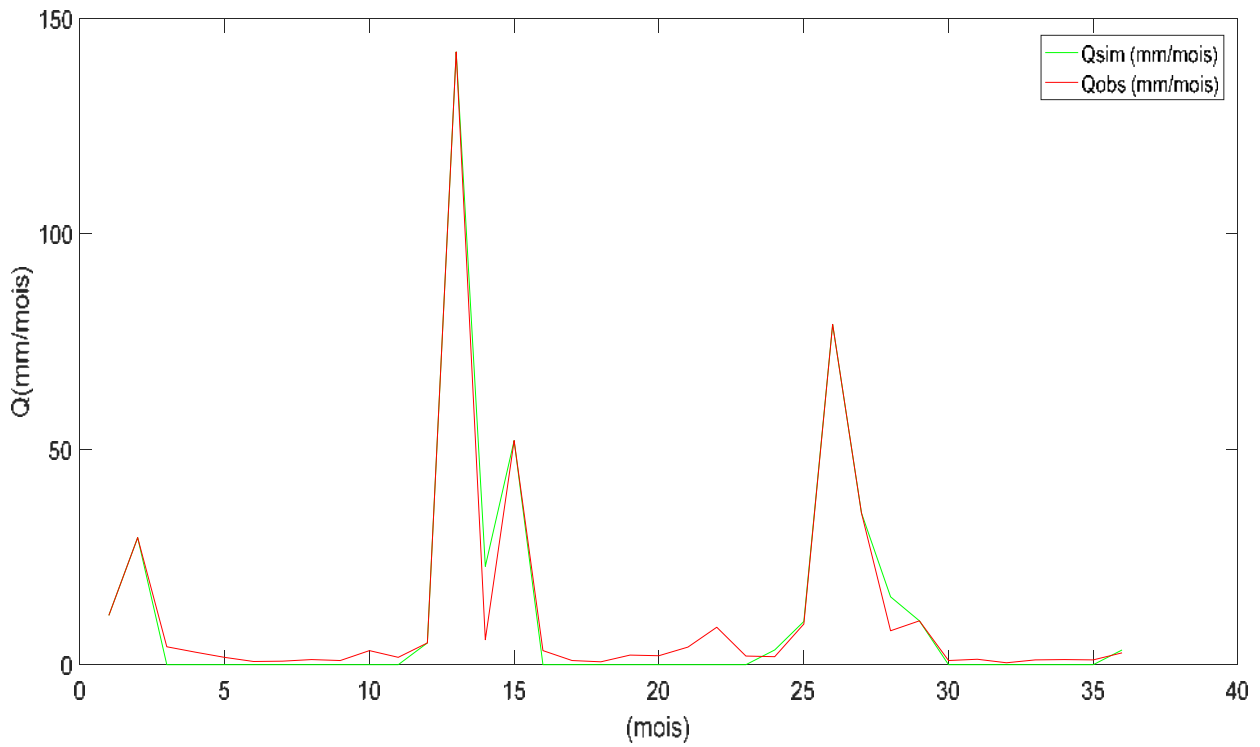


Figure (VI.24) : Validation du bassin de Zardezas

VI.4.2.5 Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Standard (Pas de temps mensuel) :

Selon les critères d'évaluation numériques les résultats obtenus pour les quatre bassins sont très bons avec : $95\% \leq NSE \leq 84\%$, il en est de même pour le R^2 et le RSR, que ce soit en période de calage ou de validation, avec une légère infériorité du critère PBIAS pour Bouchegouf ($12.09\% > 10\%$) pour la partie calage, et un PBIAS satisfaisant pour le bassin de la Cheffia dans la phase validation ($PBIAS = 24\%$) (voir tableau VI-1).

Les résultats graphiques sont jugés très bons, pour les quatre bassins, que ce soit en période de calage ou de validation sauf pour le bassin de Bouchegouf, où l'on remarque une légère différence dans la reproduction des décrues, lors de la phase de calage. La reproduction des extremums est jugée très bonne.

VI.5- Résultats du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu

Une modélisation de la relation Pluie – Débit utilisant le « Tank Model de Sugawara » couplé au Filtre de Kalman Etendu a été effectuée, et appliquée aux quatre bassins étudiés.

VI.5.1-L'approche Updating :

VI.5.1.1 -Pas de temps journalier :

VI.5.1.1.1- Paramètres du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu :

Pour l'état initial $X(0/0)$, voir paragraphe VI.3 (Pas de temps journalier).

VI.5.1.1.2- Paramètres du Filtre :

Pour les quatre bassins nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

Isser :

- Calibration et validation :

Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0200$

Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0005$

Zardezaset Cheffia :

- Calibration et validation :

Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0184$

Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0003$

Bouchegouf :

- Calibration et validation :

Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0300$

Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0003$

VI.5.1.1.3- Résultats du Tank Model couplé au FK Etendu:

a) Résultats du calage du Tank Model couplé au FK Etendu:

Tableau VI.16: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Calage)

	Isser	Zardezaz	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
Nash	0.974	0.981	0.969	0.985	0.978
R²	0.983	0.981	0.969	0.985	0.980
RSR	0.072	0.086	0.073	0.126	0.089
RMSE	0.301	0.219	0.423	0.116	0.265
SDEV	4.1625	2.5551	5.764	0.924	3.351

b) Résultats de la validation du 'Tank Model couplé au FKEtendu:

Tableau VI.17: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Validation)

	Isser	Zardezaz	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
Nash	0.913	0.989	0.960	0.978	0.960
R²	0.912	0.990	0.961	0.978	0.960
RSR	0.255	0.060	0.118	0.096	0.132
RMSE	0.364	0.194	0.250	0.226	0.259
SDEV	1.4297	3.2367	2.115	2.362	2.286

VI.5.1.1.4-Illustration graphique :

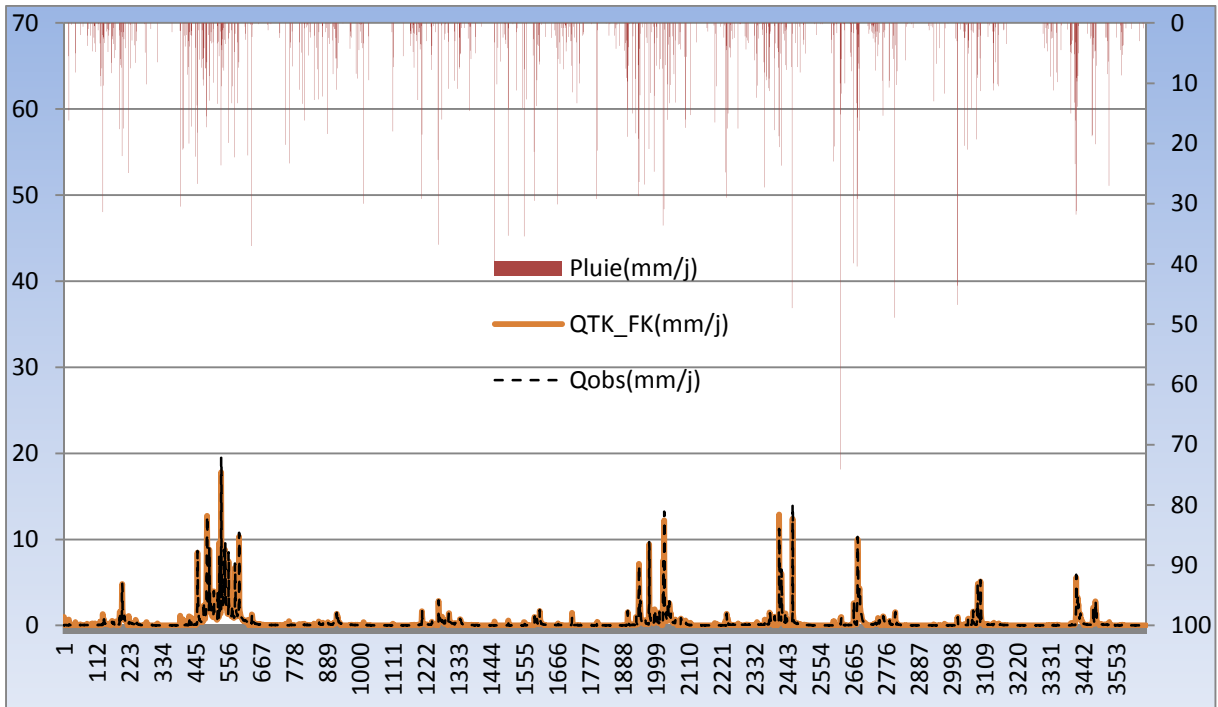
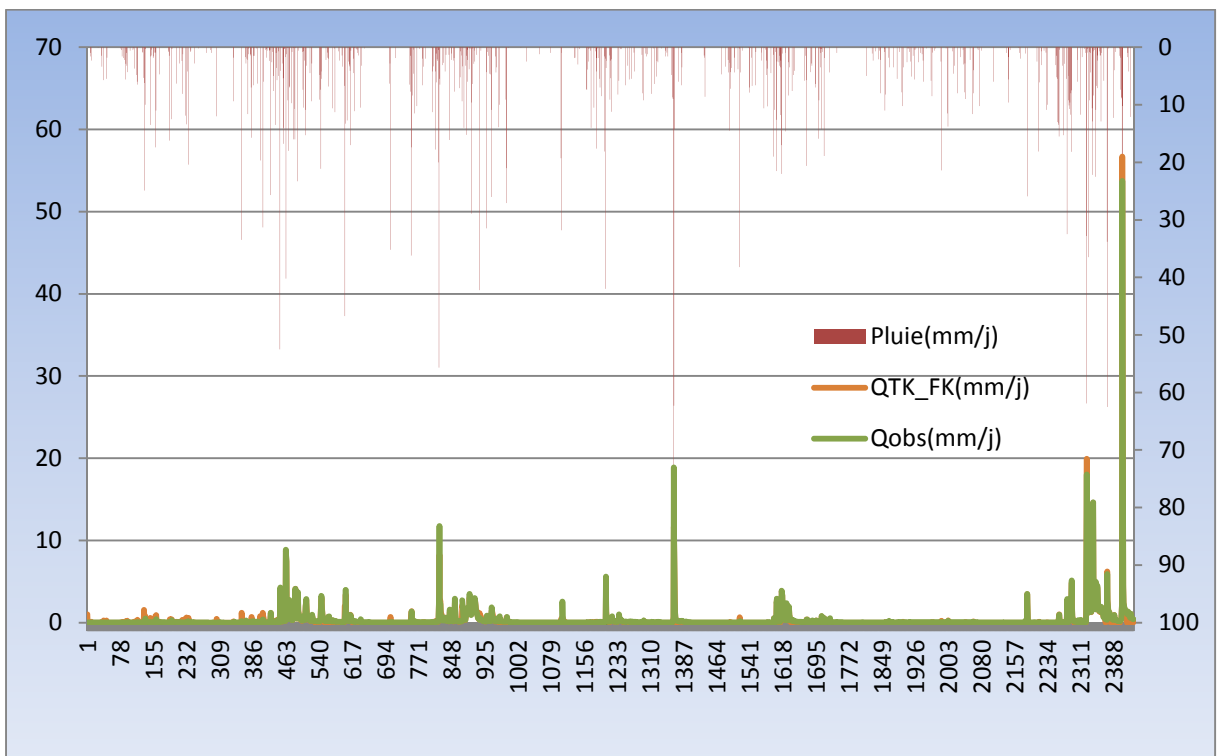


Figure (VI.25) : Calibration du bassin de Bouchegouf



Figure(VI.26) : Validation du bassin de Bouchegouf

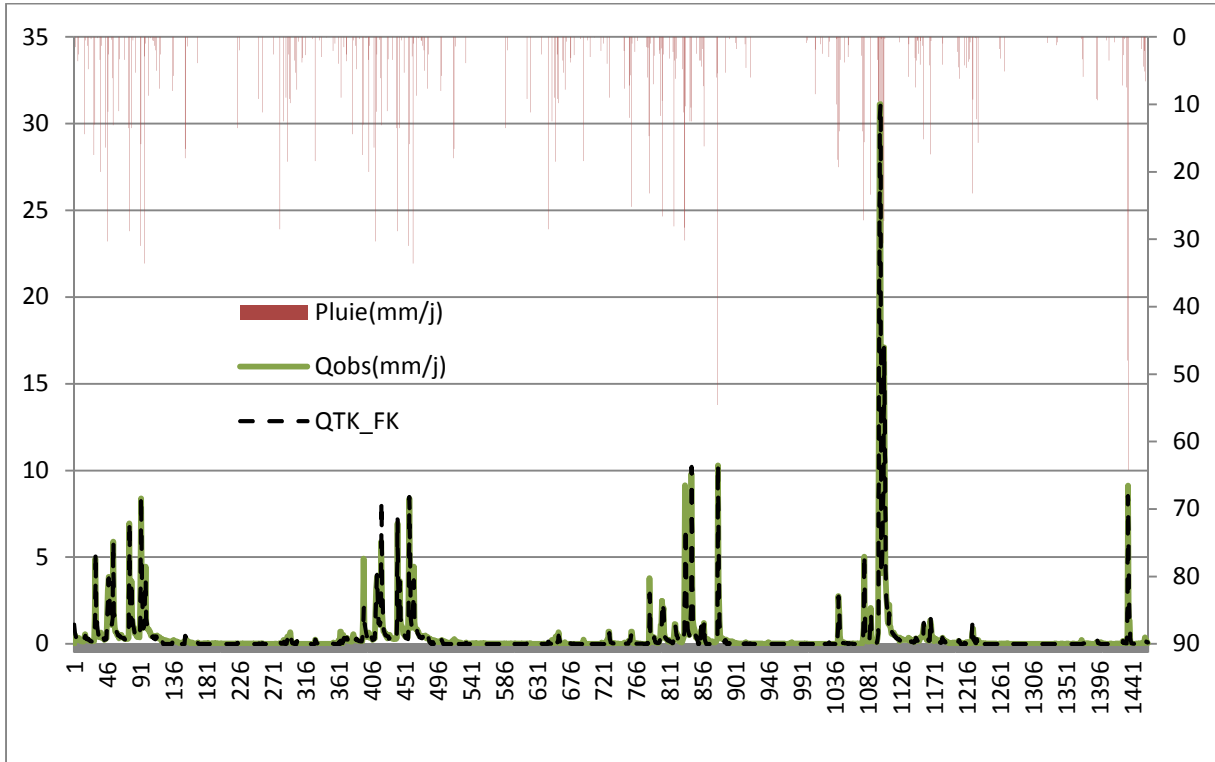


Figure (VI.27) : Calibration du bassin de Zardezas

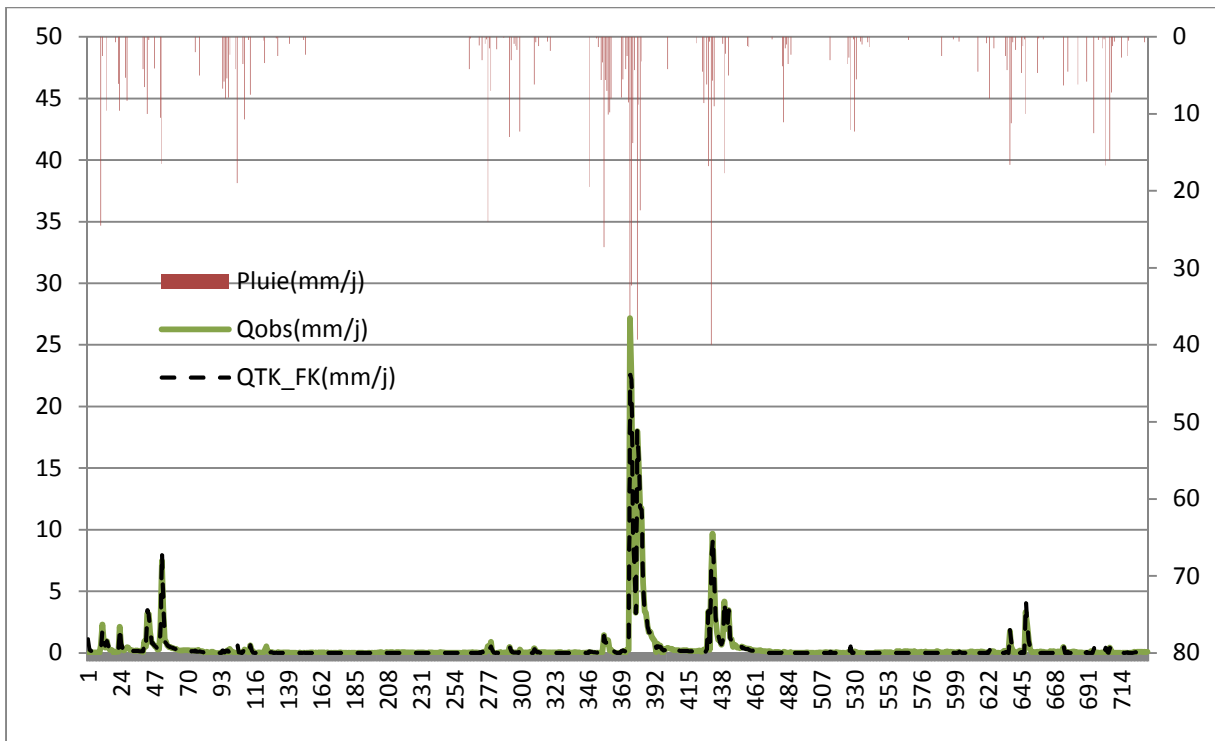


Figure (VI.28) : Validation du bassin de Zardezas

VI.5.1.1.5 Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Etendu- Updating (Pas de temps journalier) :

Les résultats montrent que les valeurs des critères numériques obtenus pour les quatre bassins sont jugés très bons que ce soit en période de calage ($NSE \geq 0.96$; $RSR \leq 0.126$), ou de validation ($NSE \geq 0.960$, $RSR \leq 0.118$), avec une légère baisse de performance du modèle, en période de validation, pour le bassin des Isser ($NSE = 0.913$, $RSR = 0.255$).

Les critères graphiques présentent une évolution plus que parfaite des débits observés et simulés, avec une excellente reproduction des extremums.

VI.5.1.2 -Pas de temps mensuel-Updating:

VI.5.1.2.1- Paramètres du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu :

Pour l'état initial X (0/0), voir paragraphe VI.3 (Pas de temps mensuel).

VI.5.1.2.2- Paramètres du filtre

Pour les quatre bassins nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

Isser et Zardezas :

- Calibration et validation :

Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0184$

Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0005$

Cheffia:

- Calibration et validation:

- Ecart type du bruit d'observation: $SDW = 2.5000$

- Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .2000$

Bouhegouf :

- Calibration et validation :

- Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0200$

- Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0002$

VI.5.1.2.3- Résultats du Tank Model couplé au FK Etendu:

a) Résultats du calage du Tank Model couplé au FK Etendu:

Tableau VI.18: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Calage)

	Isser	Zardezaz	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
Nash	0.992	0.998	0.986	0.991	0.9918
R²	0.992	0.998	0.987	0.991	0.9920
RSR	0.011	0.002	0.003	0.006	0.0055
RMSE	0.6556	0.708	3.848	1.677	1.7222
SDEV	58.176	351.64	1119	303.77	458.1465

b) Résultats de la validation du Tank Model couplé au FK Etendu:

Tableau VI.19: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Validation)

	Isser	Zadrezas	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
Nash	0.989	0.995	0.986	0.986	0.989
R²	0.989	0.995	0.983	0.987	0.989
RSR	0.012	0.002	0.003	0.006	0.006
RMSE	0.9267	1.879	3.849	2.183	2.209
SDEV	79.107	752.61	1120	358.65	577.592

VI.5.1.2.4-Illustration graphique :

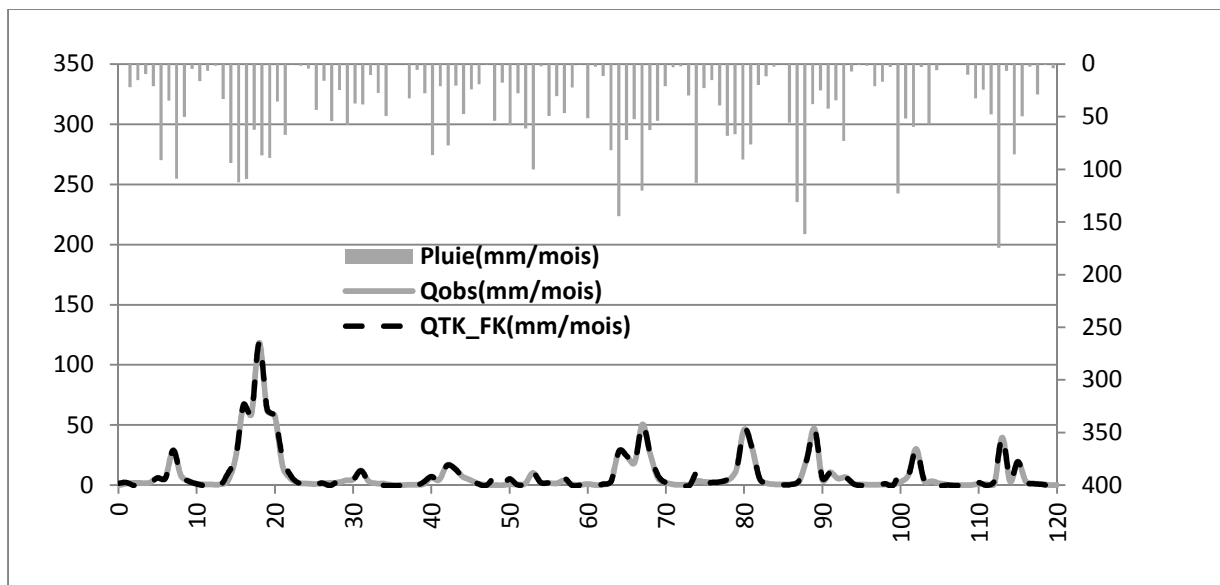


Figure (VI.29) : Calibration du bassin de Bouchegouf

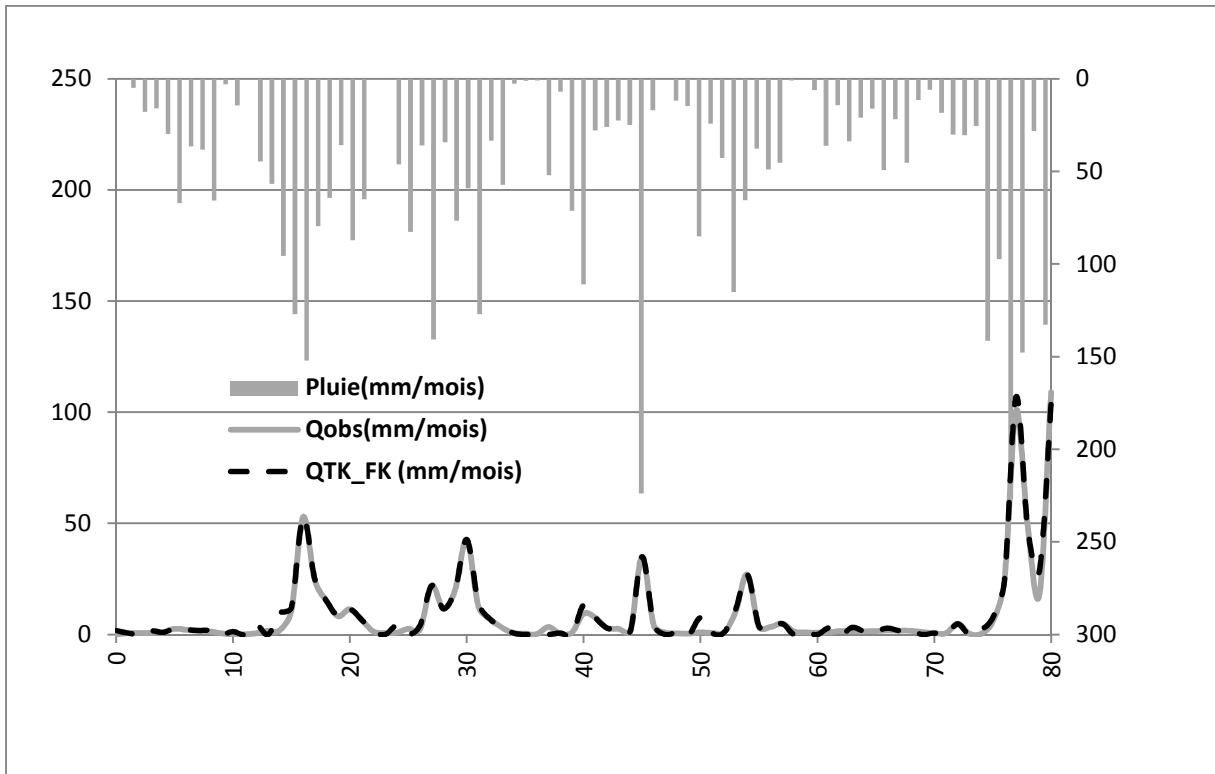


Figure (VI.30) : Validation du bassin de Bouchegouf

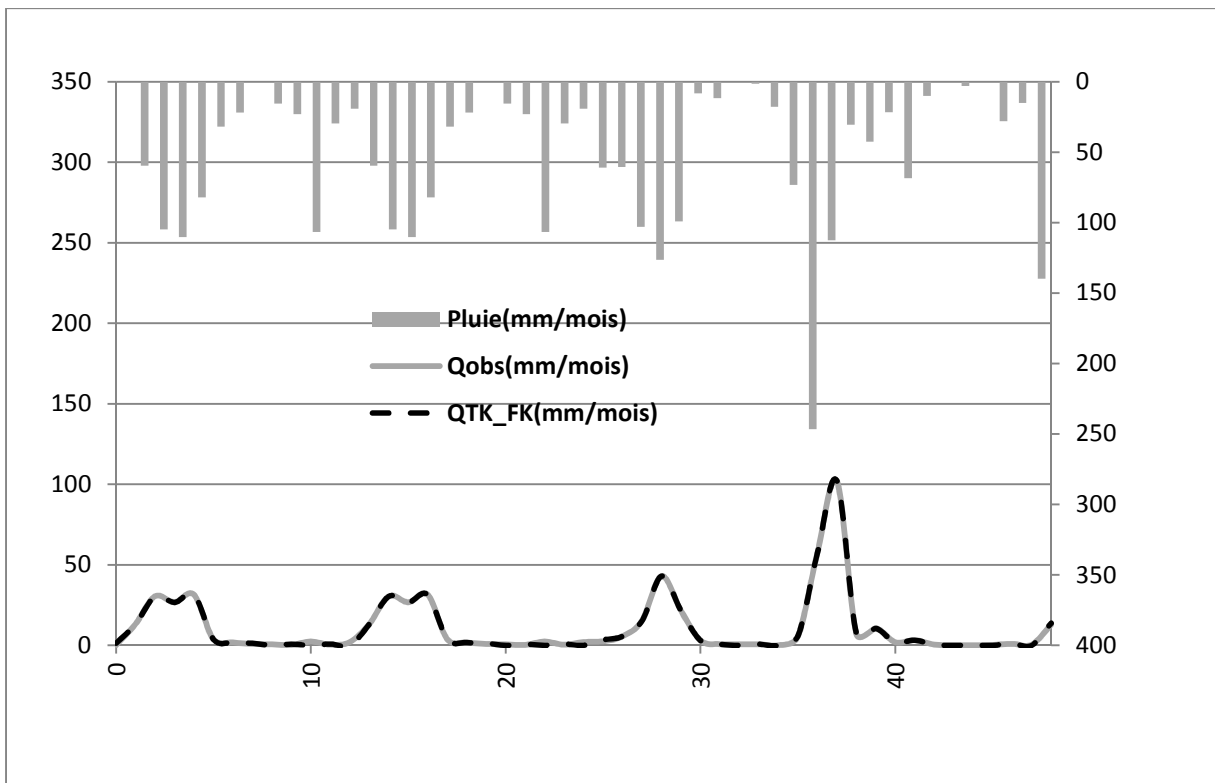


Figure (VI.31) : Calibration du bassin de Zardezas

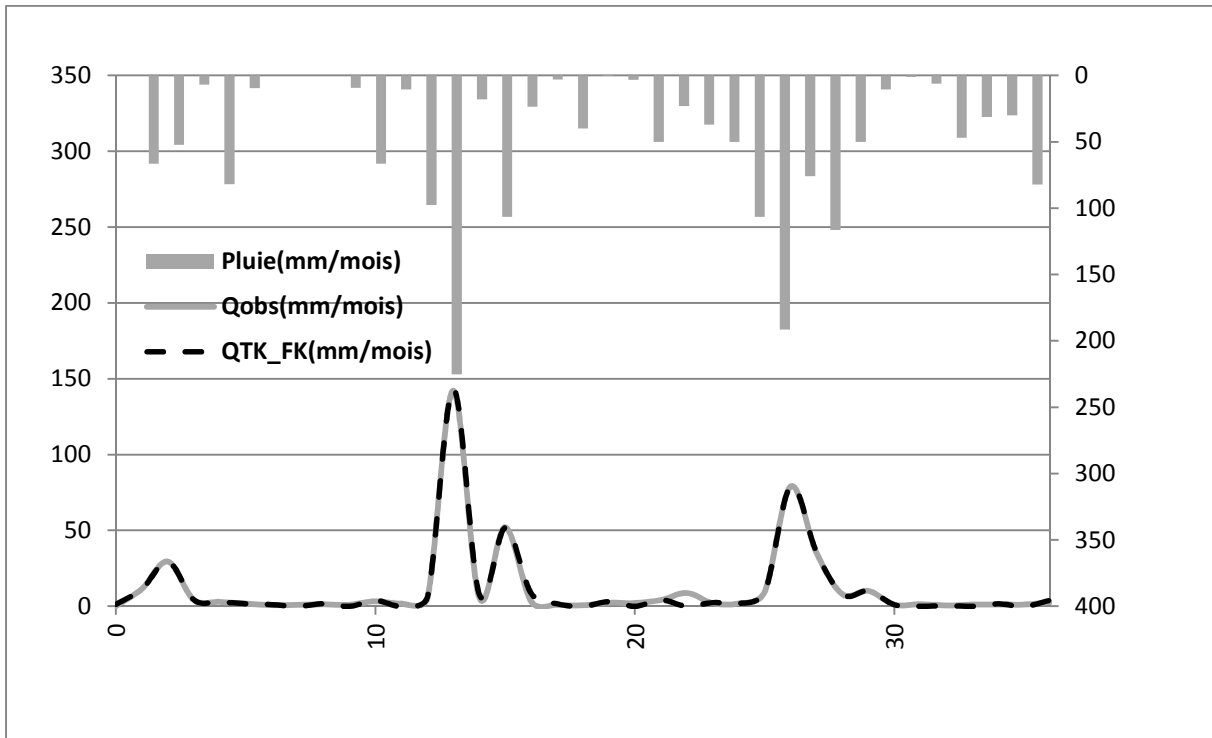


Figure (VI.32) : Validation du bassin de Zardezas

VI.5.1.2.5 Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Etendu- Updating - (Pas de temps mensuel) :

Selon les critères numériques (NSE, R^2 et RSR), les résultats obtenus pour les quatre bassins sont très bons aussi bien en phase de calage que de validation ($NSE \geq 0.986, RSR \leq 0.012$). A noter que ces résultats sont meilleurs que ceux obtenus par la formulation du FK Standard.

Les illustrations graphiques confirment l'excellence des résultats, et montrent une reproduction parfaite, y compris des extremums, des hydrogrammes observés et simulés pour les quatre bassins.

VI.5.2- La formulation 'Not Updating' :

VI.5.2.1 -Pas de temps journalier :

VI.5.2.1.1- Paramètres du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu

Pour l'état initial X (0/0), voir paragraphe VI.3 (Pas de temps journalier).

VI.5.2.1.2- Paramètres du filtre

Pour les quatre bassins nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

Isser :

- Calibration et validation :
- Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0150$

- Pourcentage du bruit du système: SNPER = .0001

Zardezaset Cheffia:

- Calibration et validation :

- Ecart type du bruit d'observation: SDW = .0184

- Pourcentage du bruit du système: SNPER = .0003

Bouchegefouf :

- Calibration et validation :

- Ecart type du bruit d'observation: SDW = .0300

- Pourcentage du bruit du système: SNPER = .0003

VI.5.2.1.3- Résultats du Tank Model couplé au FK Etendu :

a) Résultats du calage du Tank Model couplé au FK Etendu:

Tableau VI.20: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Calage)

	Isser	Zardezaset	Cheffia	Bouchegefouf	Moyenne
Nash	0.949	0.998	0.988	0.963	0.9745
R²	0.951	0.997	0.988	0.963	0.97475
RSR	0.126	0.027	0.040	0.196	0.09725
RMSE	0.4217	0.0691	0.2486	0.1867	0.231525
SDEV	3.3538	2.5506	6.2027	0.9521	3.2648

b) Résultats de la validation du Tank Model couplé au FK Etendu:

Tableau VI.21: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK Etendu (Validation)

	Isser	Zadrezaset	Cheffia	Bouchegefouf	Moyenne
Nash	0.933	0.997	0.987	0.977	0.960
R²	0.936	0.997	0.987	0.977	0.960
RSR	0.212	0.026	0.043	0.100	0.132
RMSE	0.3167	0.0912	0.0879	0.227	0.259
SDEV	1.4917	3.4519	2.0597	2.2707	2.286

VI.5.2.1.4-Illustration graphique :

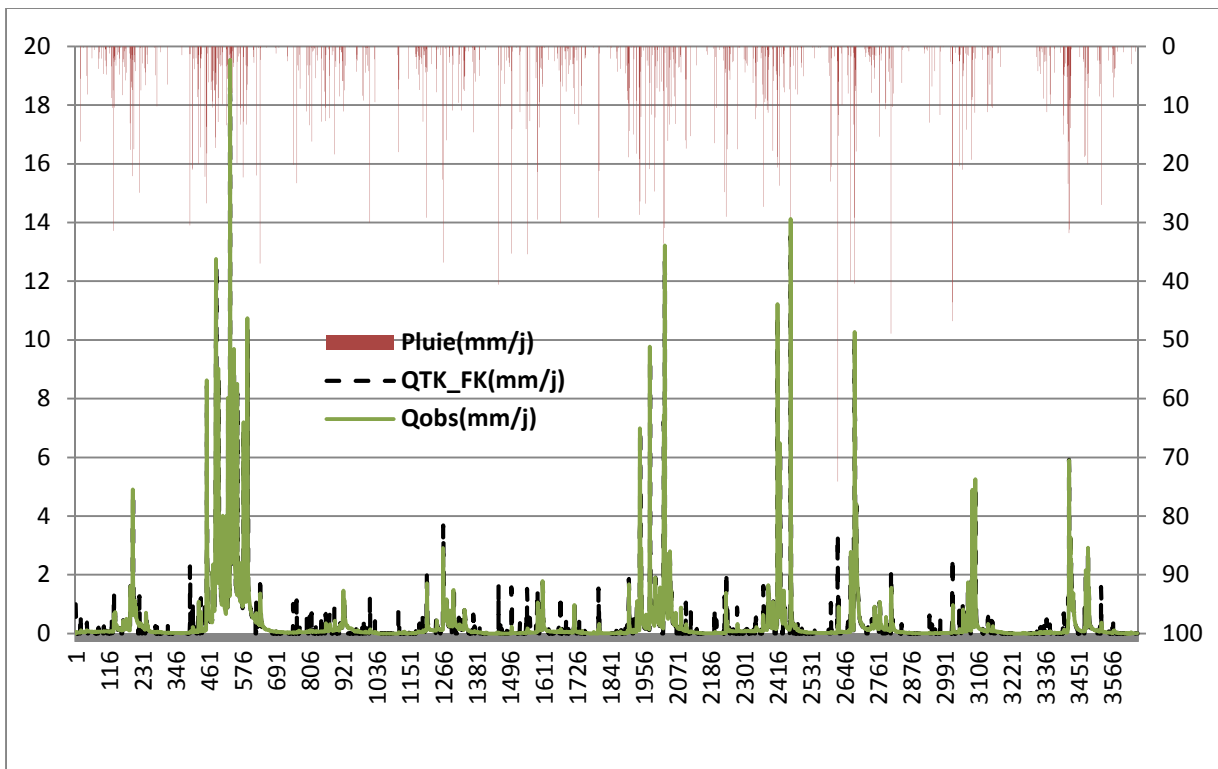


Figure (VI.33) : Calibration du bassin de Bouchegouf

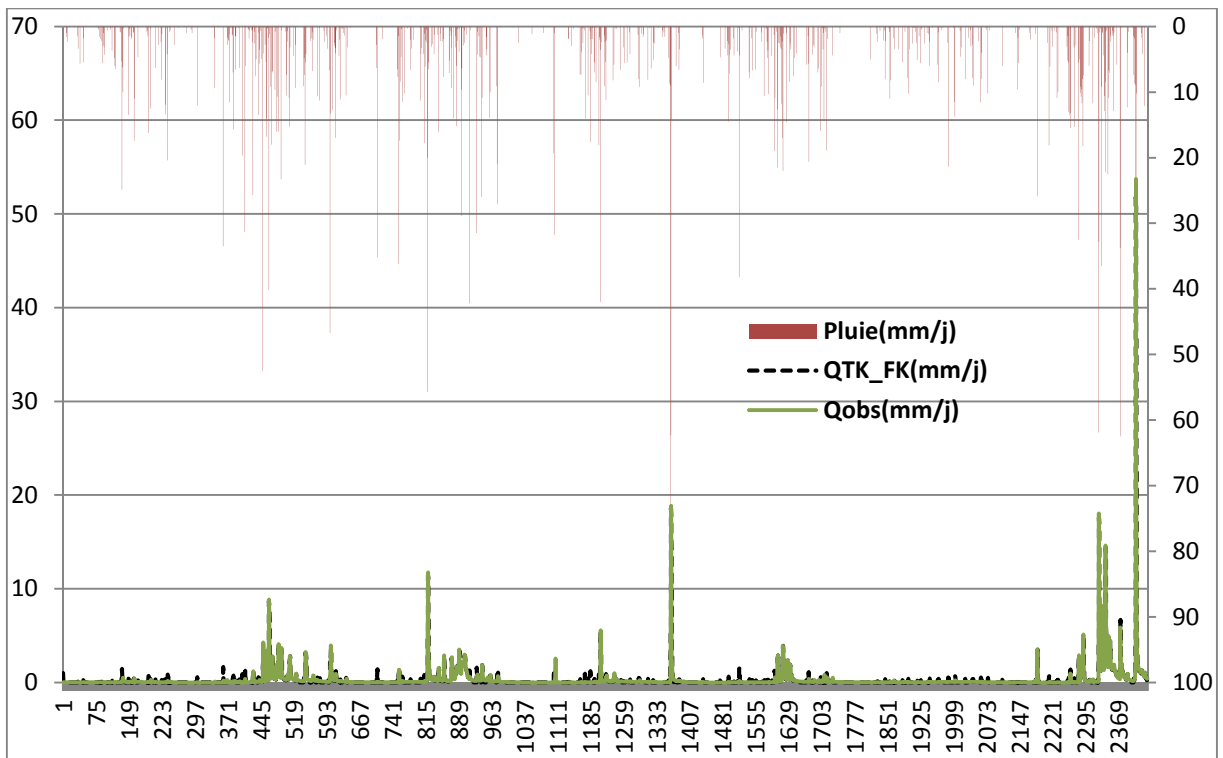


Figure (VI.34) : Validation du bassin de Bouchegouf

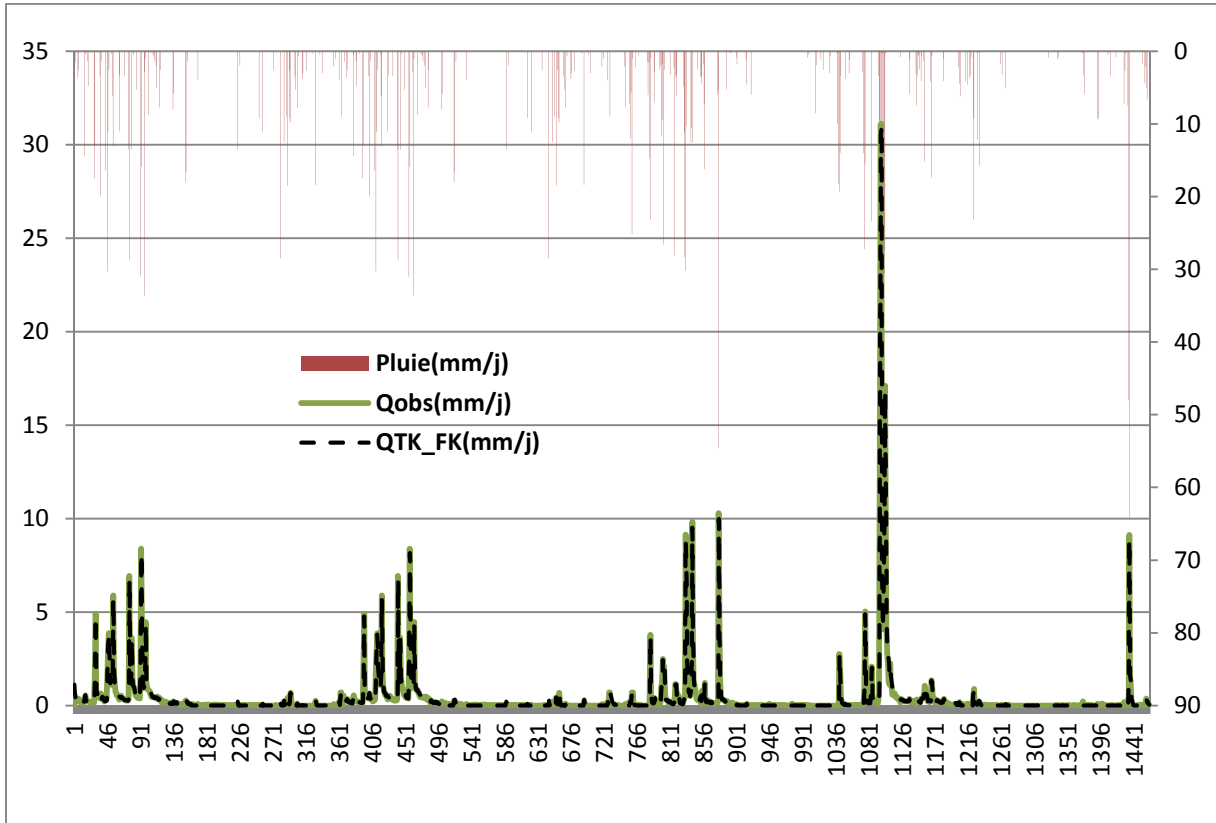


Figure (VI.35) : Calibration du bassin de Zardezas

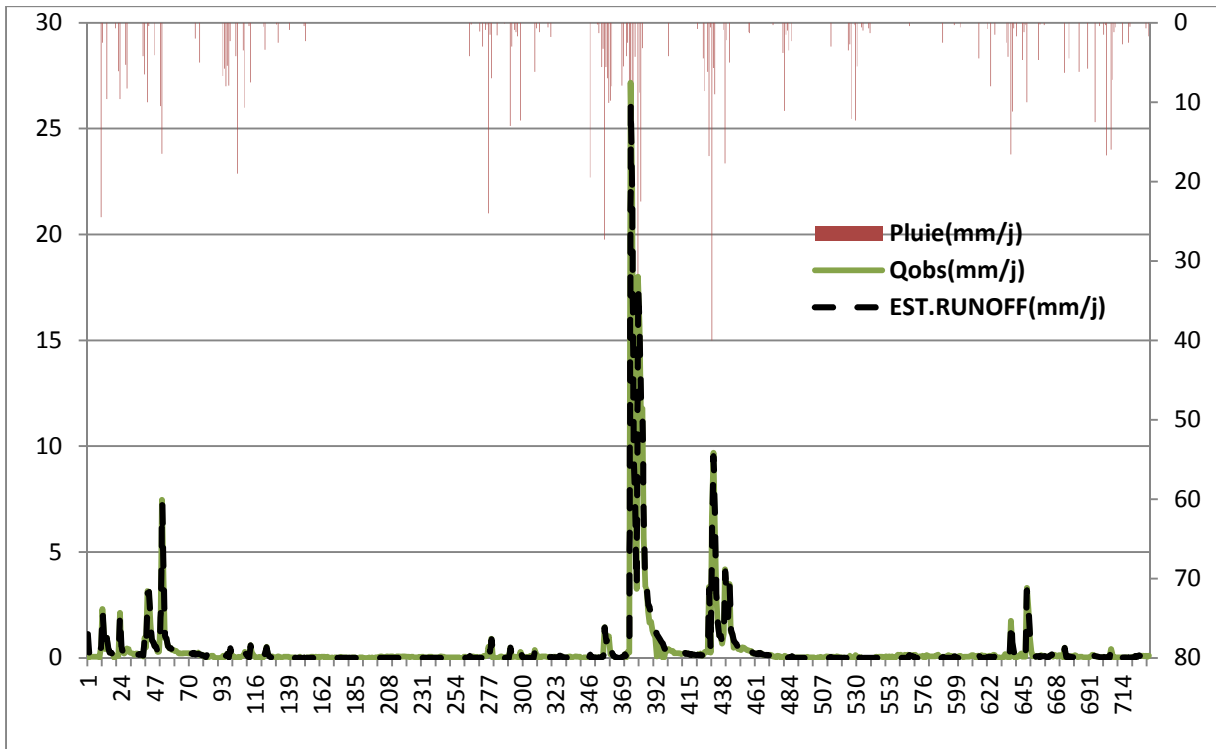


Figure (VI.36) : Validation du bassin de Zardezas

VI.5.2.1.5- Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Etendu- Not Updating - (Pas de temps journalier) :

Les résultats des critères numériques obtenus (NSE, R^2 , RSR et RMSE), pour les quatre bassins étudiés, sont très bons que ce soit en période de calage ou de validation. Le bassin de Zardezas présente le meilleur résultat avec un $NSE \geq 99\%$ et un $RSR \leq 0.040$ pour les deux phases.

Les critères graphiques confirment les résultats numériques, avec une évolution parfaite de la forme des hydrogrammes observés et simulés, y compris pour les pics.

VI.5.2.2-Pas de temps mensuel (Not Updating):

VI.5.2.2.1- Paramètres du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu :

Pour l'état initial X (0/0), voir paragraphe VI.3 (Pas de temps mensuel).

VI.5.2.2.2- Paramètres du filtre

Pour les quatre bassins nous avons utilisé les paramètres du filtre suivants :

Isser et Zardezas :

- Calibration et validation :
- Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0184$
- Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0005$

Cheffia:

- Calibration et validation :
- Ecart type du bruit d'observation: $SDW = 2.5000$
- Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .2000$

Boucheouf :

- Calibration et validation :
- Ecart type du bruit d'observation: $SDW = .0200$
- Pourcentage du bruit du système: $SNPER = .0002$

VI.5.2.2.3- Résultats du Tank Model couplé au FK Etendu:

a) Résultats du calage du Tank Model couplé au FK Etendu:

Tableau VI.22: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK-FK Etendu (Calage)

	Isser	Zardezas	Cheffia	Boucheouf	Moyenne
Nash	0.995	0.998	0.977	0.990	0.990
R²	0.995	0.998	0.976	0.991	0.990
RSR	0.009	0.002	0.005	0.006	0.006
RMSE	0.532	0.705	4.877	1.693	1.952
SDEV	57.91	350.67	1069.00	302.10	444.920

b) Résultats de la validation du Tank Model couplé au FKEtendu:

Tableau VI.23: Valeurs des critères d'évaluation du modèle TK_FK étendu (validation)

	Isser	Zadrezas	Cheffia	Bouchegouf	Moyenne
Nash	0.997	0.996	0.986	0.991	0.993
R²	0.996	0.996	0.986	0.991	0.992
RSR	0.007	0.002	0.004	0.005	0.005
RMSE	0.5024	1.648	3.696	1.747	1.898
SDEV	77.213	743.9	974.95	351.57	536.908

VI.5.2.2.4-Illustration graphique :

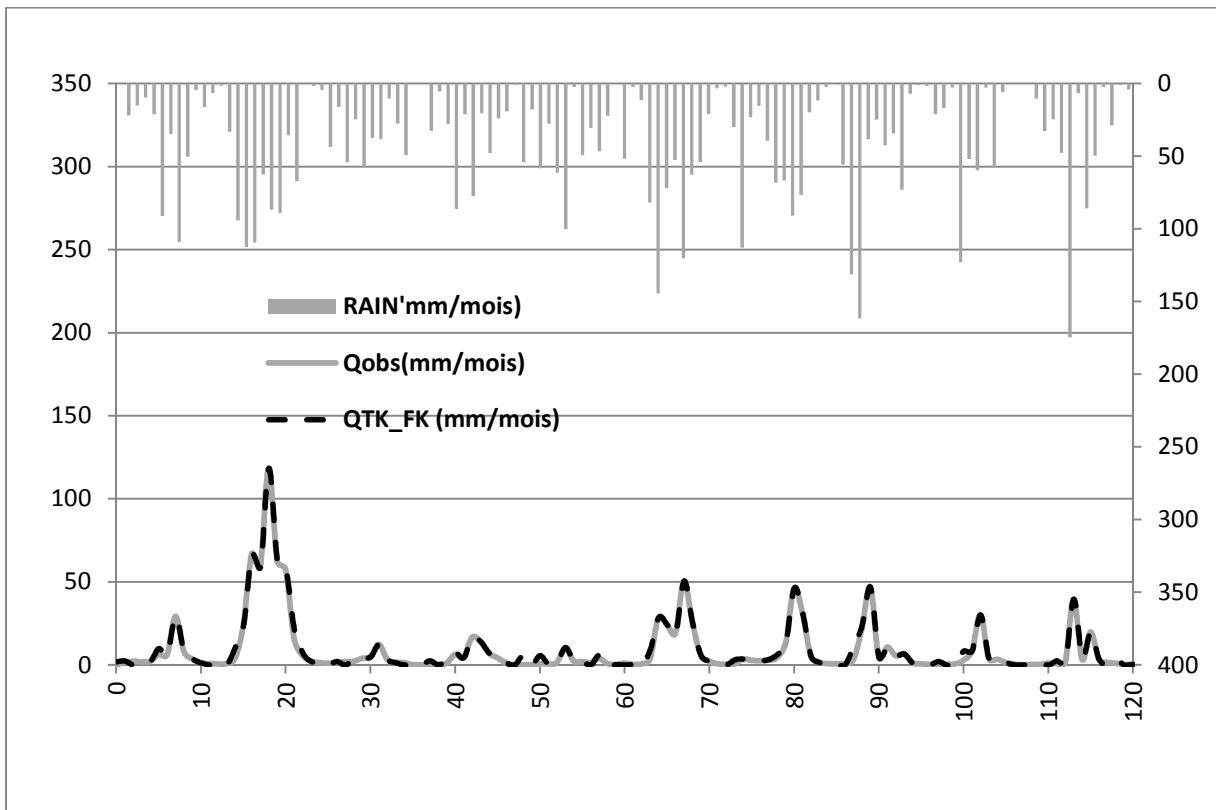


Figure (VI.37) : Calibration du bassin de Bouchegouf

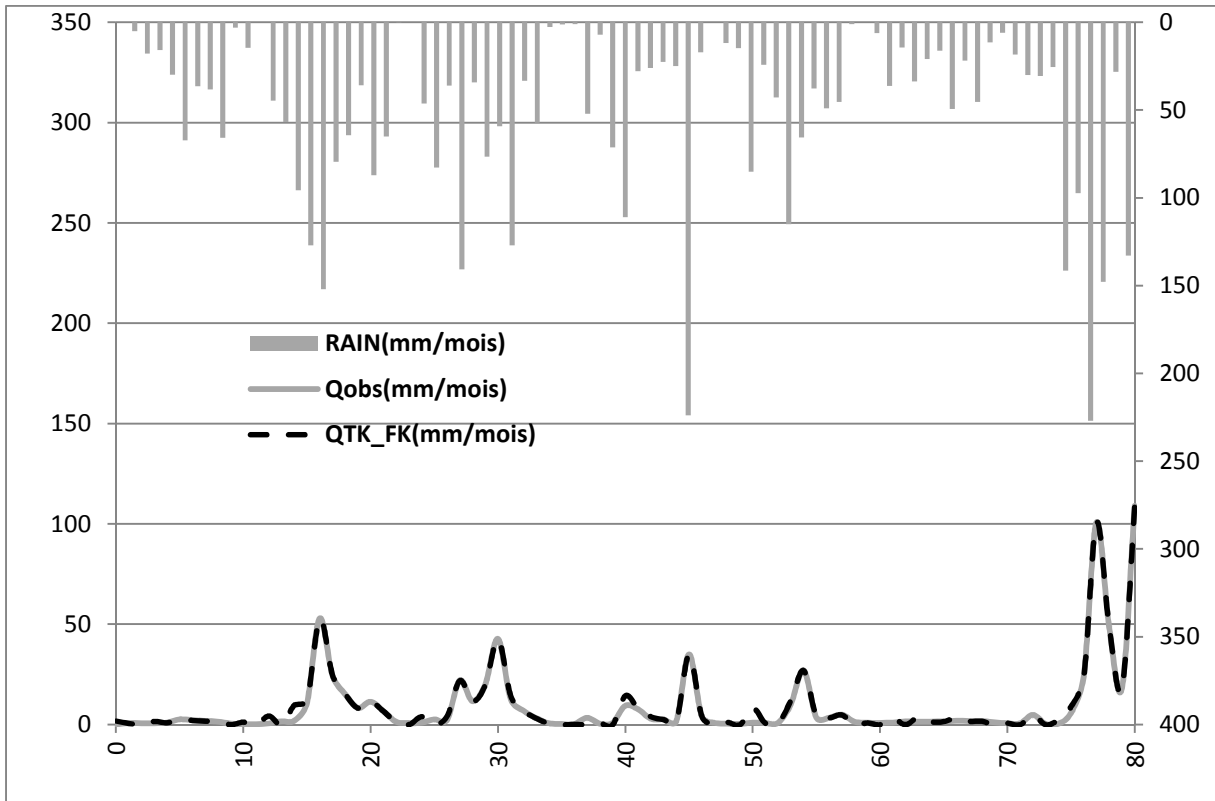


Figure (VI.38) : Validation du bassin de Bouchegouf

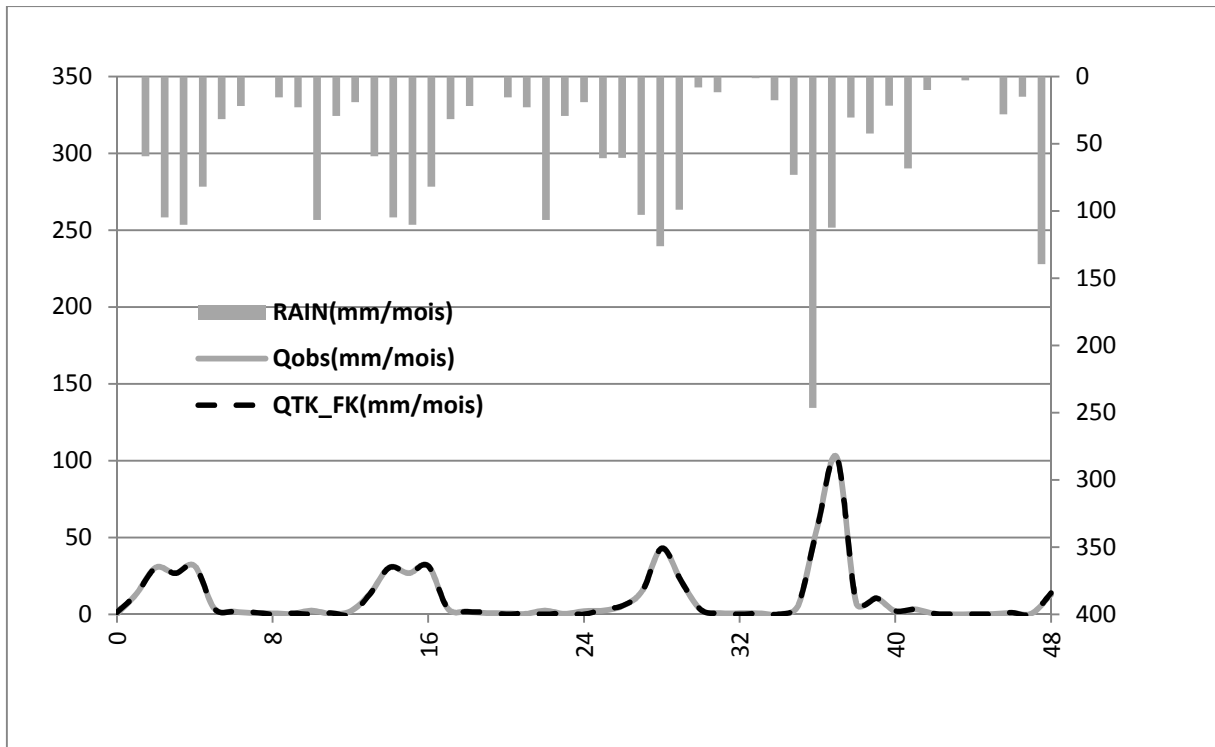


Figure (VI.39) : Calibration du bassin de Zardezas

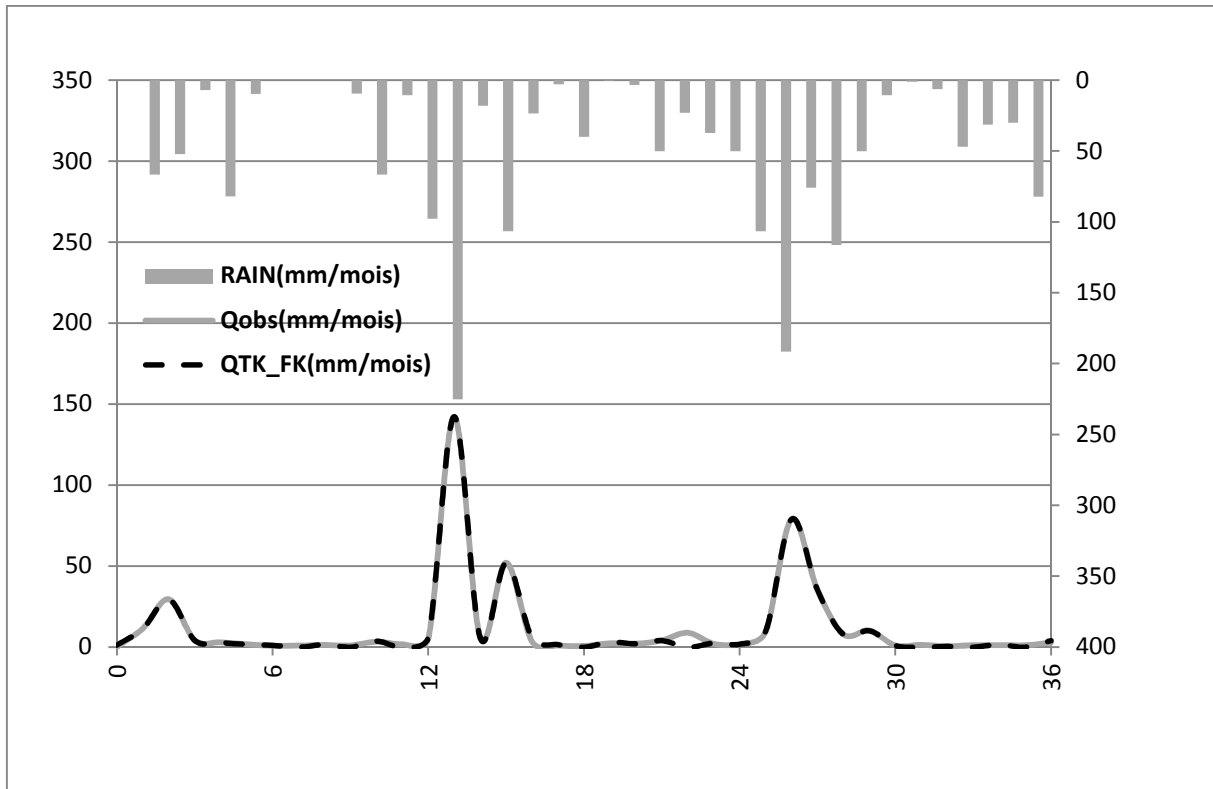


Figure (VI.40) : Validation du bassin de Zardezas

VI.5.2.2.6- Commentaires sur les résultats du Filtre de Kalman Etendu - Not Updating-(Pas de temps mensuel) :

D'après les critères numériques (NSE, R^2 et RSR), les résultats obtenus pour les quatre bassins étudiés, sont très bons aussi bien en phase de calage que de validation ($NSE \geq 0.970$, $RSR \leq 0.009$ et $R^2 \geq 0.970$). Ces résultats sont meilleurs que ceux obtenus par la formulation du FK Standard - voir tableau VI.1.

Les illustrations graphiques viennent confirmer l'excellence des résultats pour les quatre bassins. La reproduction des extrêmes est parfaite.

VI.6- Résultats de la modélisation par système Neuro-Flou :

VI.6.1- Le modèle Neuro-Flou au pas de temps mensuel :

Nous avons utilisé dans cette partie un modèle Neuro-Flou à deux (02) entrées: la Pluie et l'ETP (P, ETP) afin de modéliser la sortie : Débit simulé (Qsim). Les résultats de cette modélisation, au pas de temps mensuel, sont présentés dans cette dernière partie de notre travail.

VI.6.1.1- Tableaux récapitulatifs des résultats

Période de Calage :

Tableau VI.24: Tableau récapitulatif des résultats -Période de Calage Mensuel

Critères	Isser			Cheffia			Zardezas			Boucheouf		
	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²
Règles 3 ²	46.93	0.728	0.469	63.84	0.601	0.640	57.67	0.651	0.577	29.41	0.840	0.300
Règles 5 ²	65.68	0.586	0.658	79.36	0.454	0.794	99.91	0.031	0.999	78.25	0.466	0.789
Règles 8 ²	91.83	0.286	0.919	97.91	0.144	0.979	—	—	—	95.50	0.212	0.955

Période de validation :

Tableau VI.25: Tableau récapitulatif des résultats -Période de Validation Mensuel

Critères	Isser			Cheffia			Zardezas			Boucheouf		
	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²
Règles 3 ²	33.93	0.813	0.345	68.02	0.565	0.690	88.33	0.342	0.883	77.96	0.469	0.791
Règles 5 ²	56.78	0.657	0.604	88.65	0.337	0.888	99.94	0.025	0.999	92.07	0.282	0.925
Règles 8 ²	99.06	0.097	0.991	99.15	0.092	0.992	—	—	—	97.93	0.144	0.974

VI.6.1.2- Illustrations graphiques :

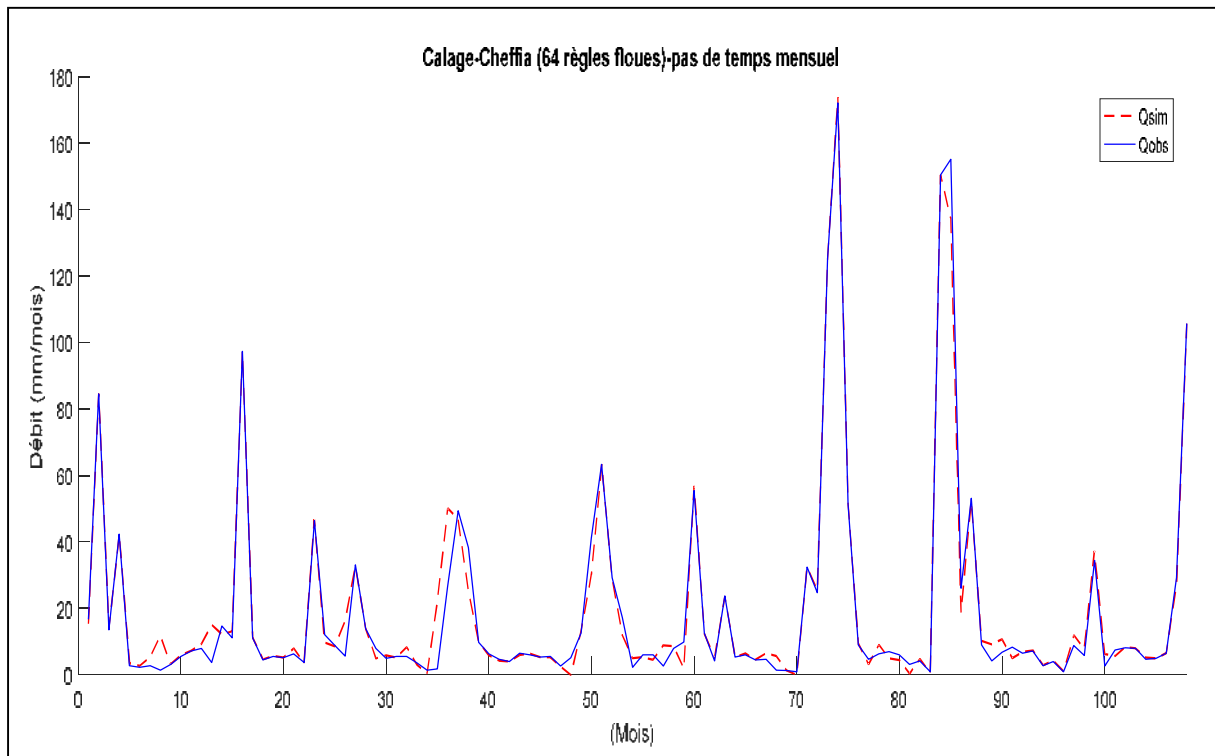


Figure (VI.41) : Calibration Cheffia -64 règles floues-Pas de temps mensuel

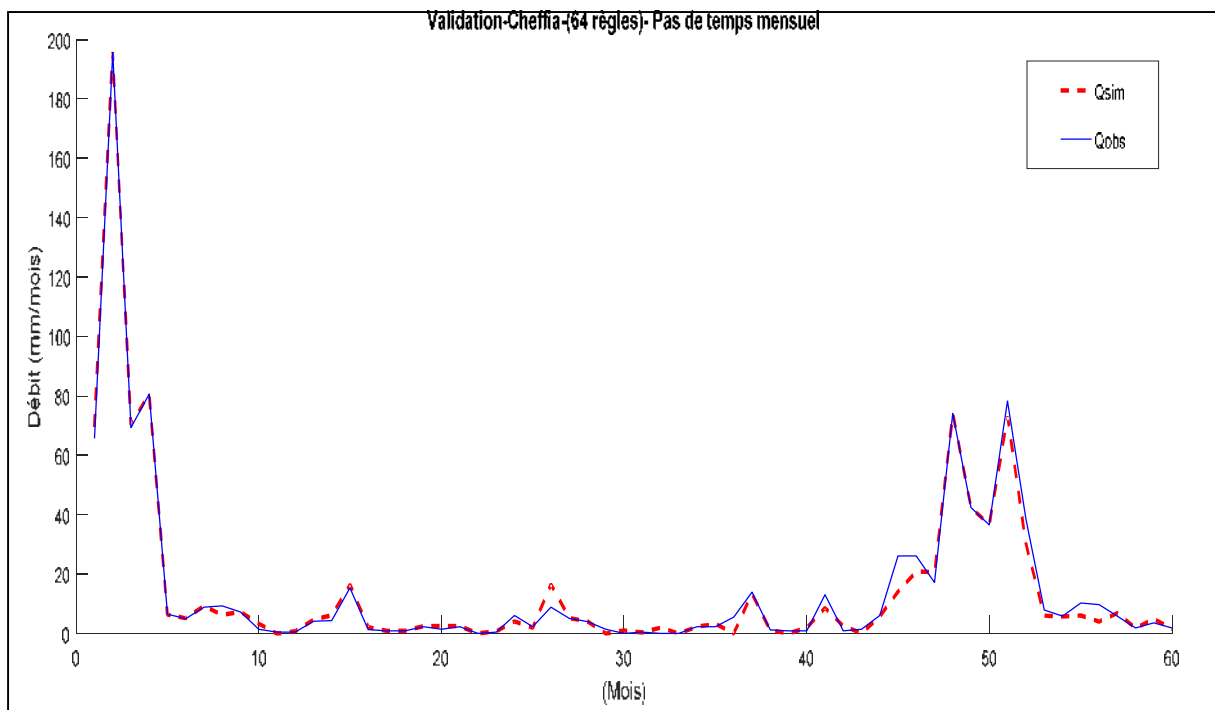


Figure (VI.42) : Validation Cheffia -64 règles floues-Pas de temps mensuel

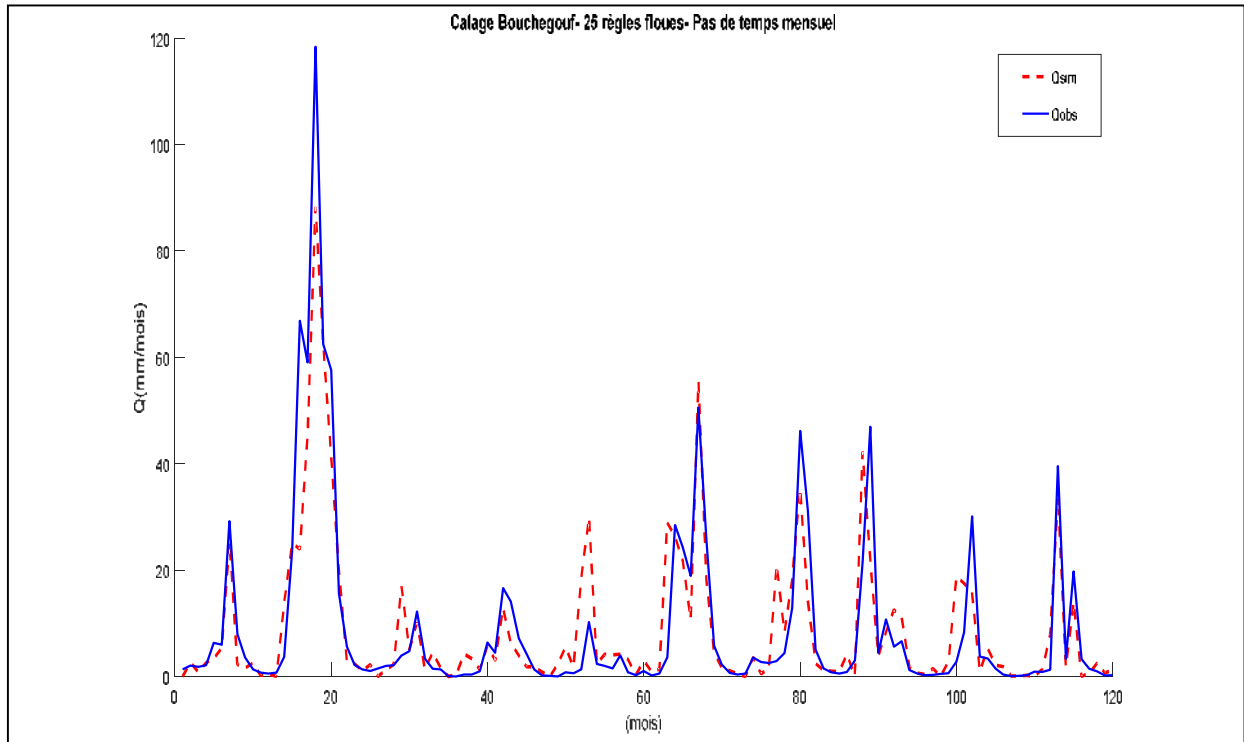


Figure (VI.43) : Calibration Bouchegouf -25 règles floues-Pas de temps mensuel

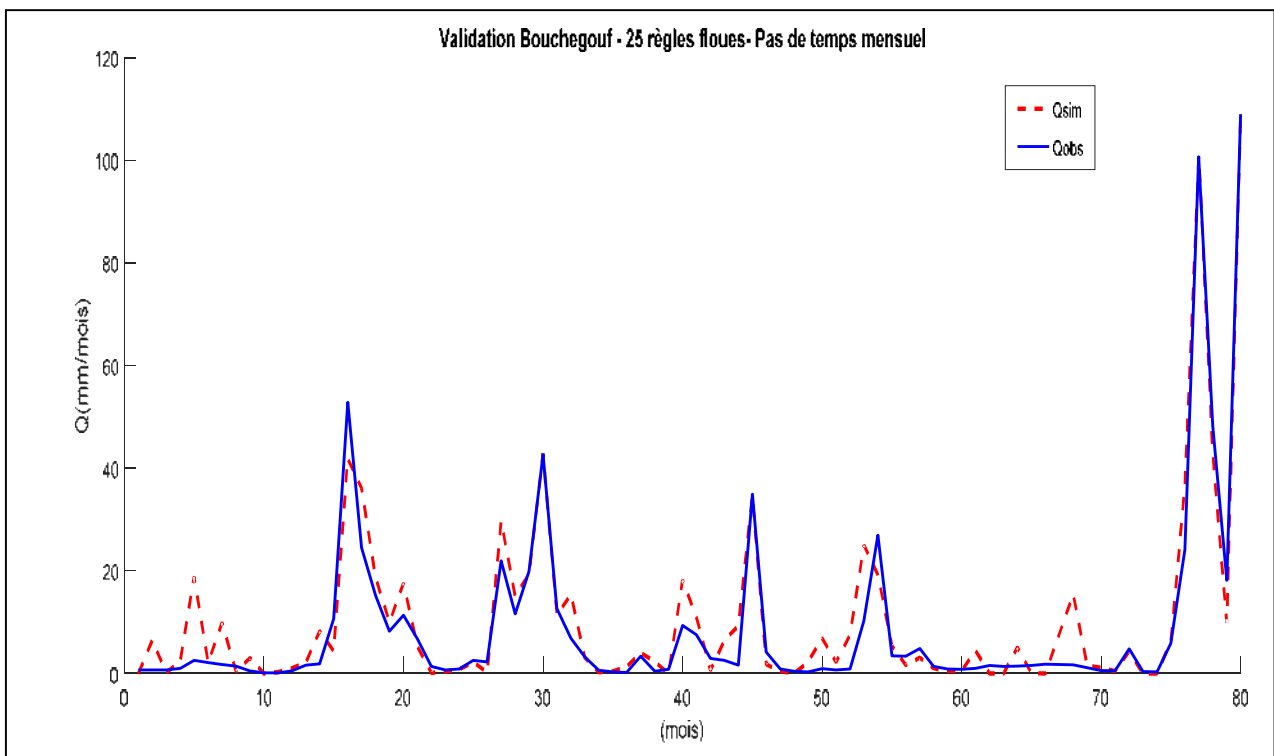


Figure (VI.44): Validation Bouchegouf -25 règles floues-Pas de temps mensuel

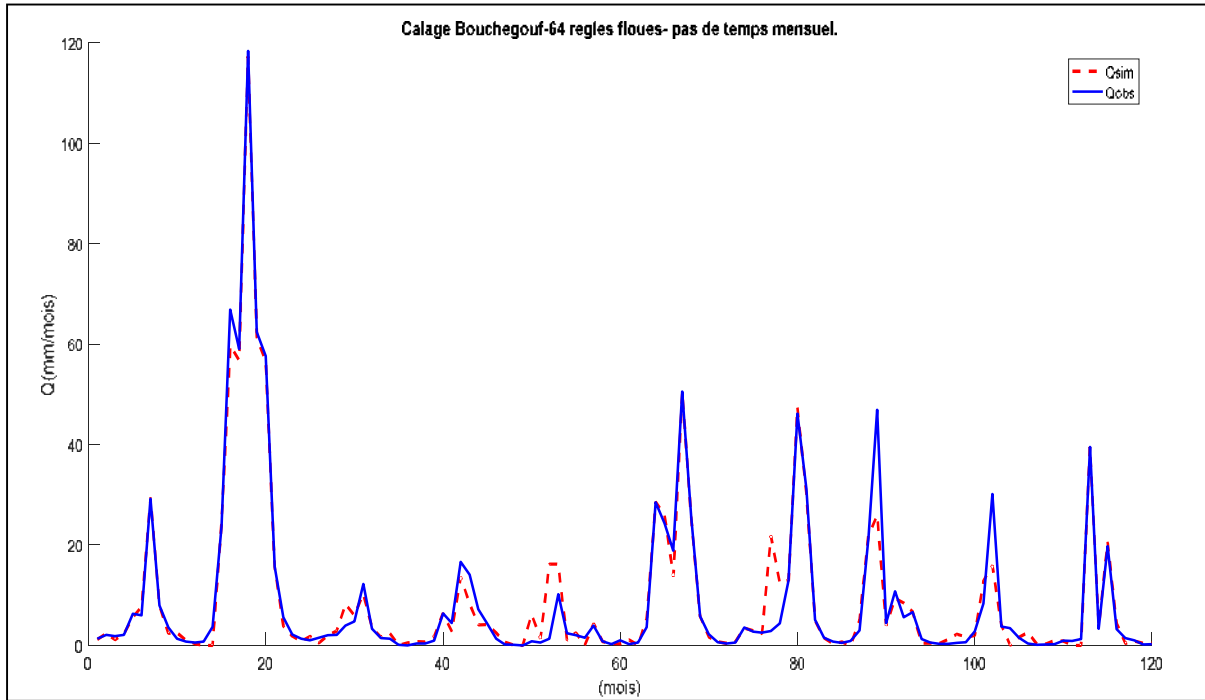


Figure (VI.45) : Calibration Bouchegouf -64 règles floues-Pas de temps mensuel

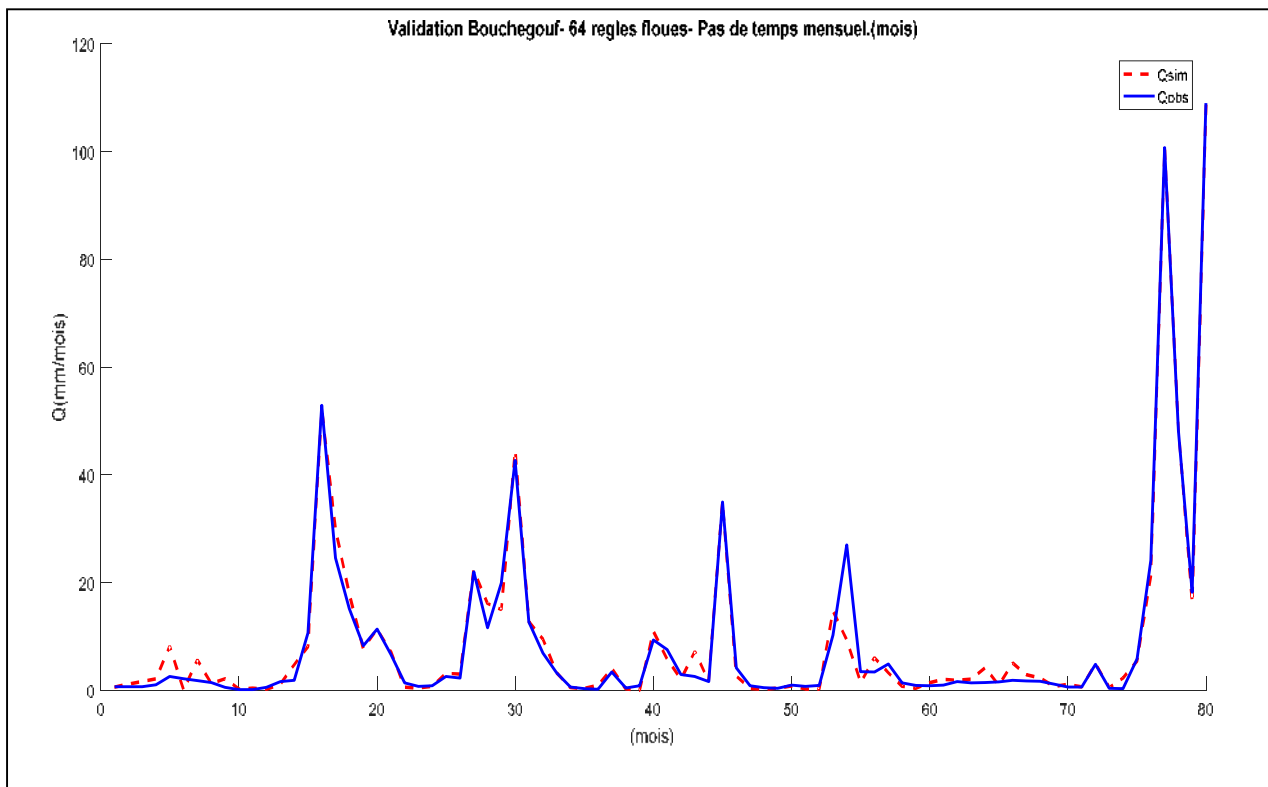


Figure (VI.46) : Validation Bouchegouf -64 règles floues-Pas de temps mensuel

VI.6.1.3 Commentaires sur les résultats du Neuro flou (Pas de temps mensuel) :

Les résultats sont présentés pour chaque bassin versant à part, et pour différents nombres de règles floues successivement, (3x3, 5x5 et 8x8). Dans tous les cas de figure, plus on augmente le nombre de règles floues, plus les résultats deviennent meilleurs, que ce soit en période de calage ou de validation. Il est à noter que le temps de calcul augmente et dépasse tous les autres modèles utilisés dans ce travail de recherche.

Selon les critères numériques (NSE, R² et RSR), les résultats obtenus, pour les quatre bassins étudiés sont très bons, pour un nombre de règles (8x8), sauf pour le bassin de Zardezas, où ces résultats deviennent très bons pour un nombre de règles floues de (5x5). En effet, pour ce bassin, le NSE dépasse les 99% que ce soit en calage ou en validation, alors que pour le reste des bassins, les résultats dépassent les 90%, pour un nombre de règles floues de (8x8).

En termes de critères graphiques, les hydrogrammes simulés suivent bien ceux observés, et les pics sont globalement bien reproduits.

VI.6.2- Le modèle à pas de temps journalier :

VI.6.2.1 Tableaux récapitulatifs des résultats

Période de calage :

Tableau VI.26 : Tableau récapitulatif des résultats -Période de Calage Journalier

Critères	Isser			Cheffia			Zardezas			Boucheougouf		
	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²
Règles 5 ²	69.96	0.548	0.704	54.84	0.672	0.553	61.83	0.618	0.620	10.84	0.944	0.118
Règles 7 ²	81.58	0.429	0.818	69.38	0.553	0.698	71.55	0.533	0.716	13.83	0.928	0.144
Règles 11 ²	92.51	0.274	0.925	87.81	0.349	0.880	93.18	0.261	0.932	27.80	0.850	0.278

Période de validation :

Tableau VI.27 : Tableau récapitulatif des résultats -Période de Validation Journalier

Critères	Isser			Cheffia			Zardezas			Boucheougouf		
	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²	Nash	RSR	R ²
Règles 5 ²	26.89	0.855	0.312	59.07	0.640	0.627	70.13	0.547	0.704	44.75	0.743	0.453
Règles 7 ²	48.90	0.715	0.490	65.93	0.584	0.691	80.97	0.436	0.810	47.75	0.723	0.482
Règles 11 ²	93.62	0.252	0.938	86.96	0.361	0.882	93.74	0.250	0.937	75.13	0.499	0.752

VI.6.2.2 Illustration graphique :

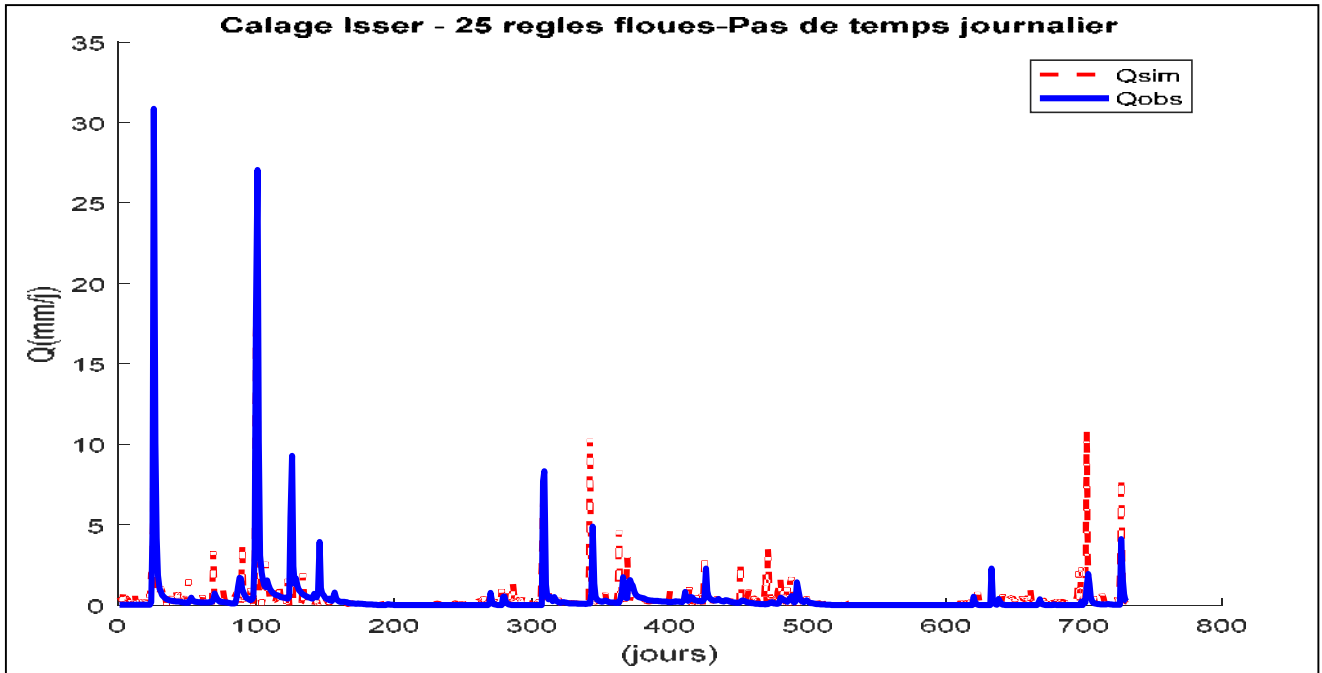


Figure (VI.47) : Calibration Isser - 25 règles floues-Pas de temps journalier

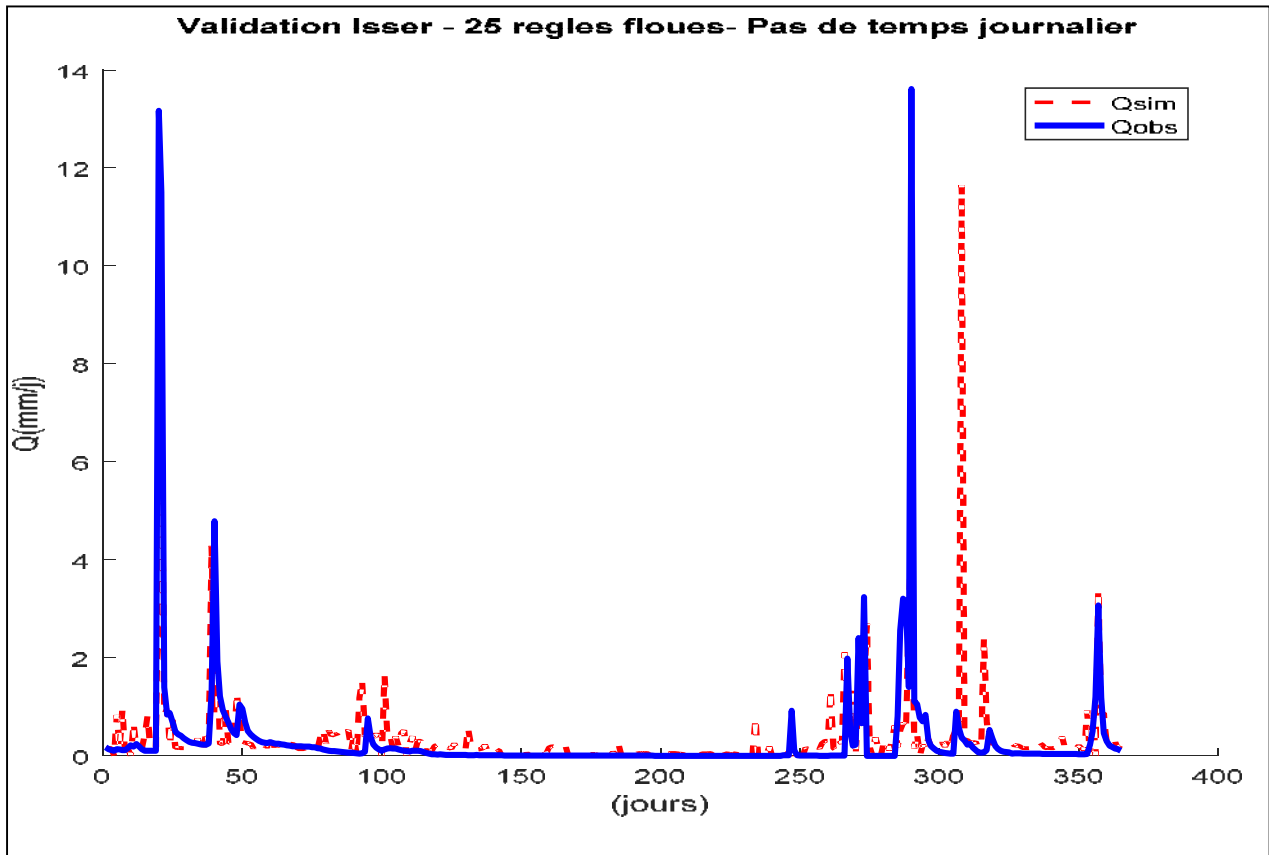
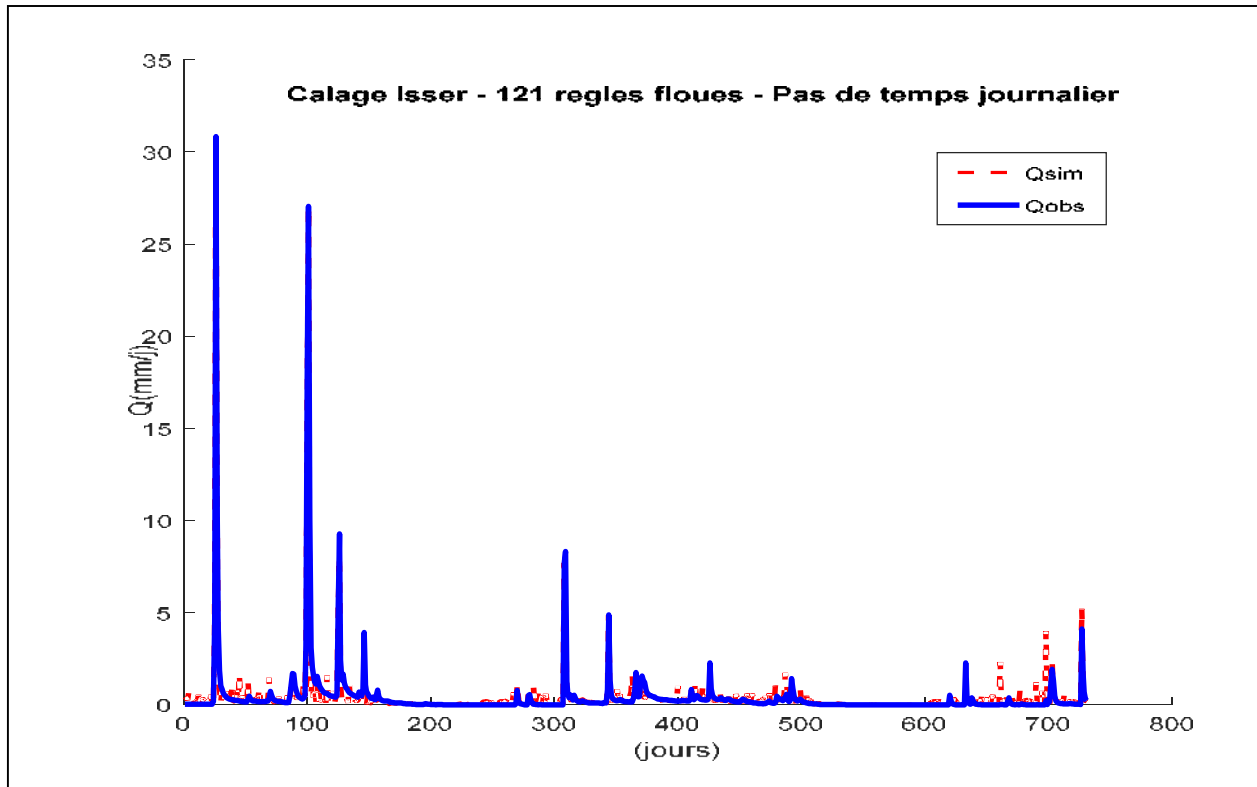


Figure (VI.48) : Validation Isser -25 règles floues-Pas de temps journalier



Figure(VI.49) : Calibration Isser -121 règles floues-Pas de temps journalier

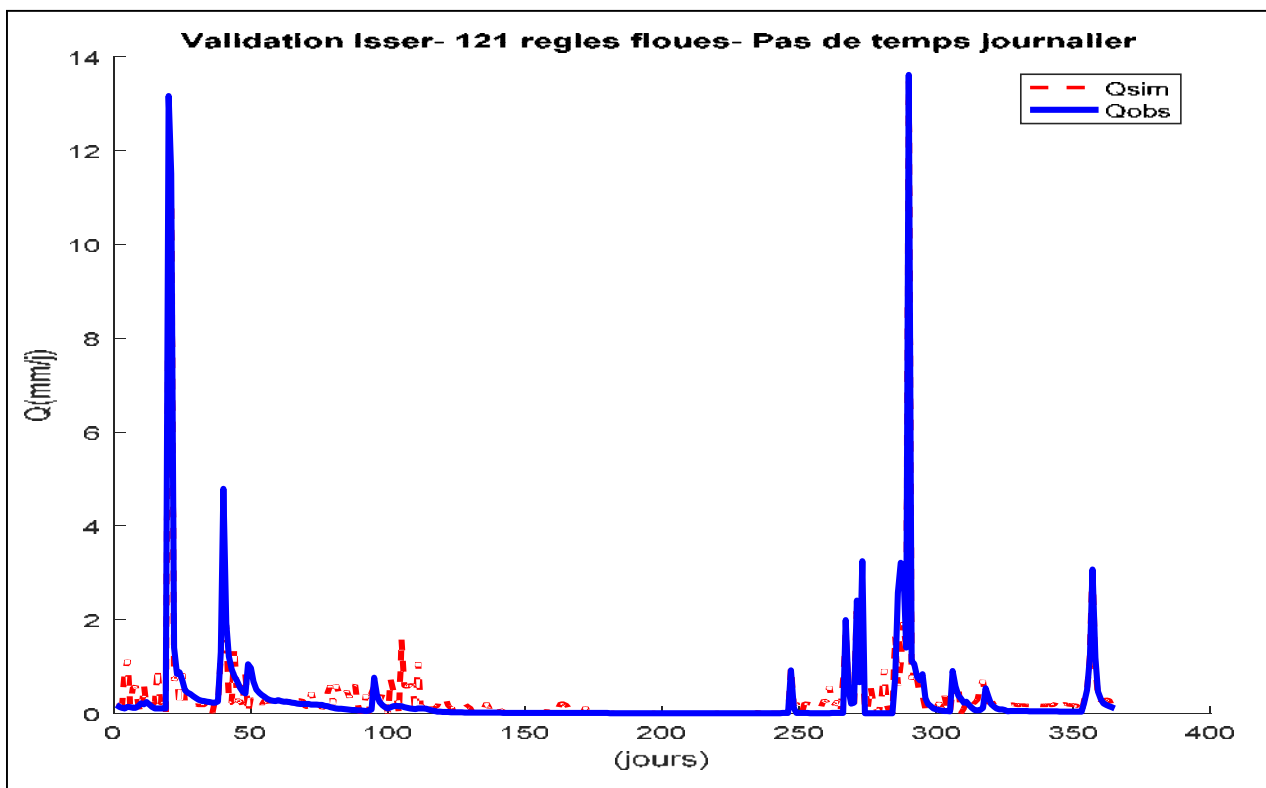


Figure (VI.50) : Validation Isser -121 règles floues-Pas de temps journalier

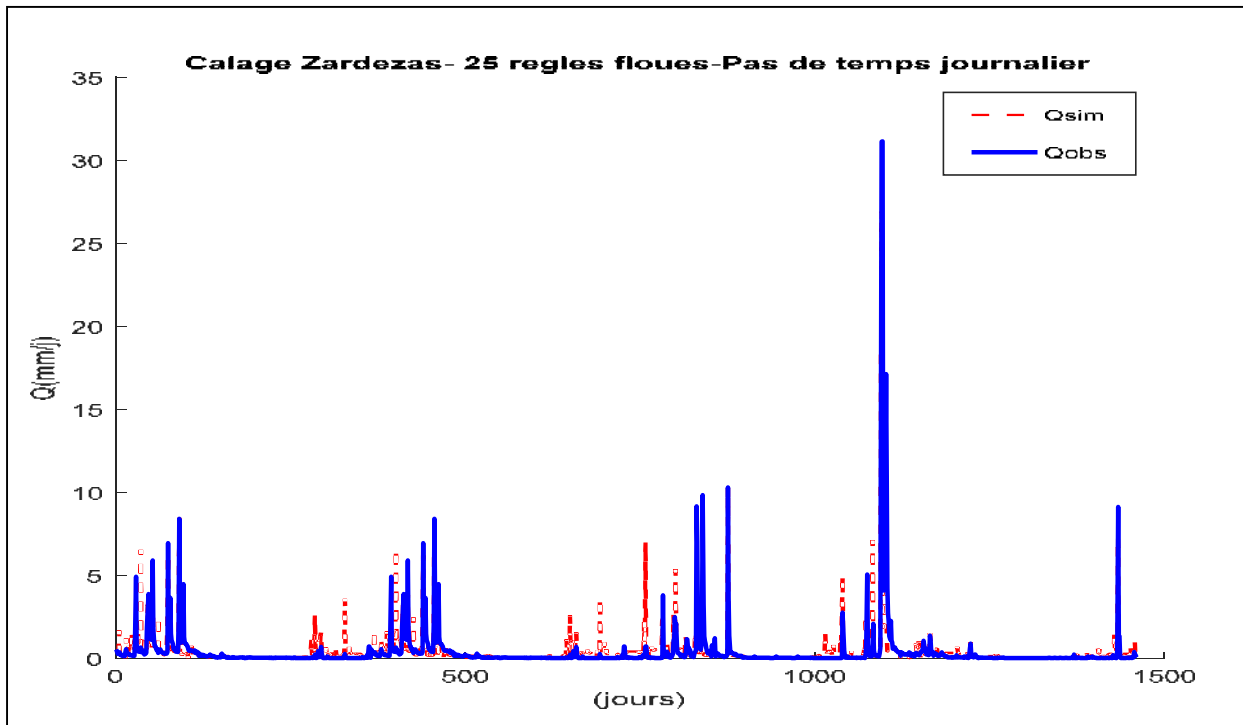


Figure (VI.51): Calage Zardezcas -25 règles floues-Pas de temps journalier

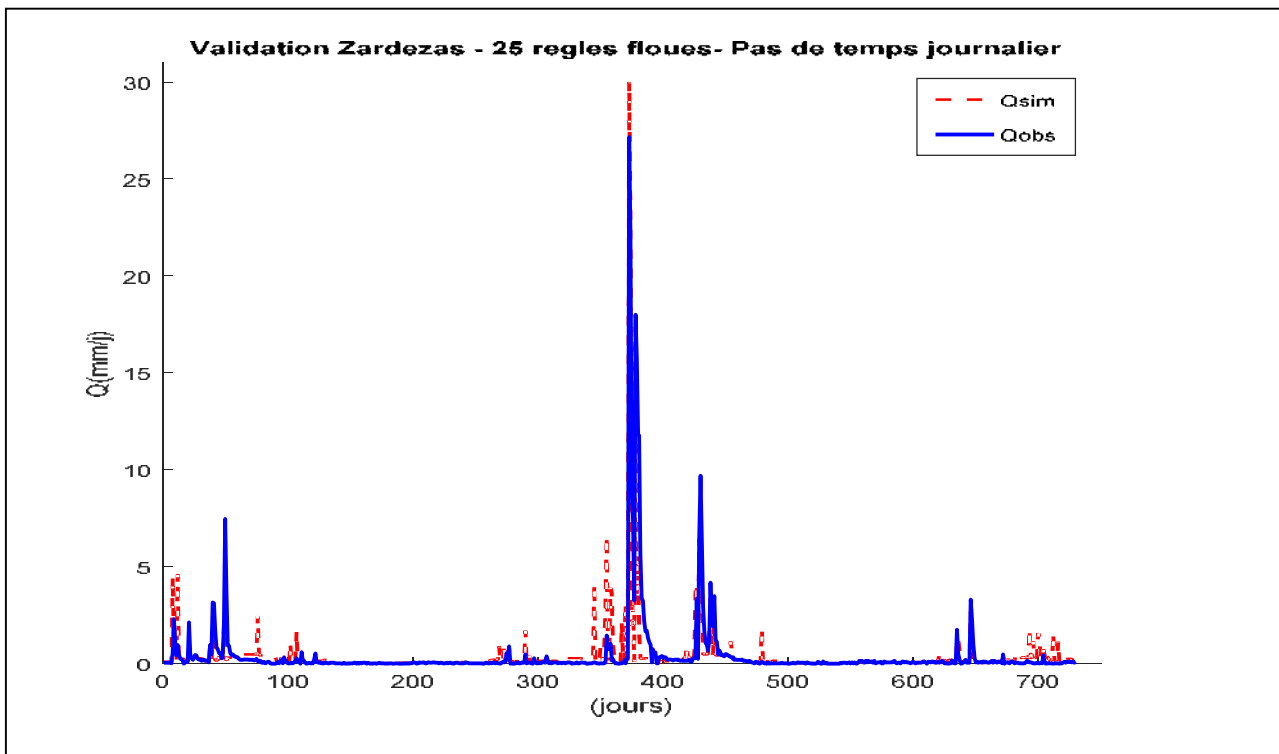


Figure (VI.52) : Validation Zardezcas -25 règles floues-Pas de temps journalier

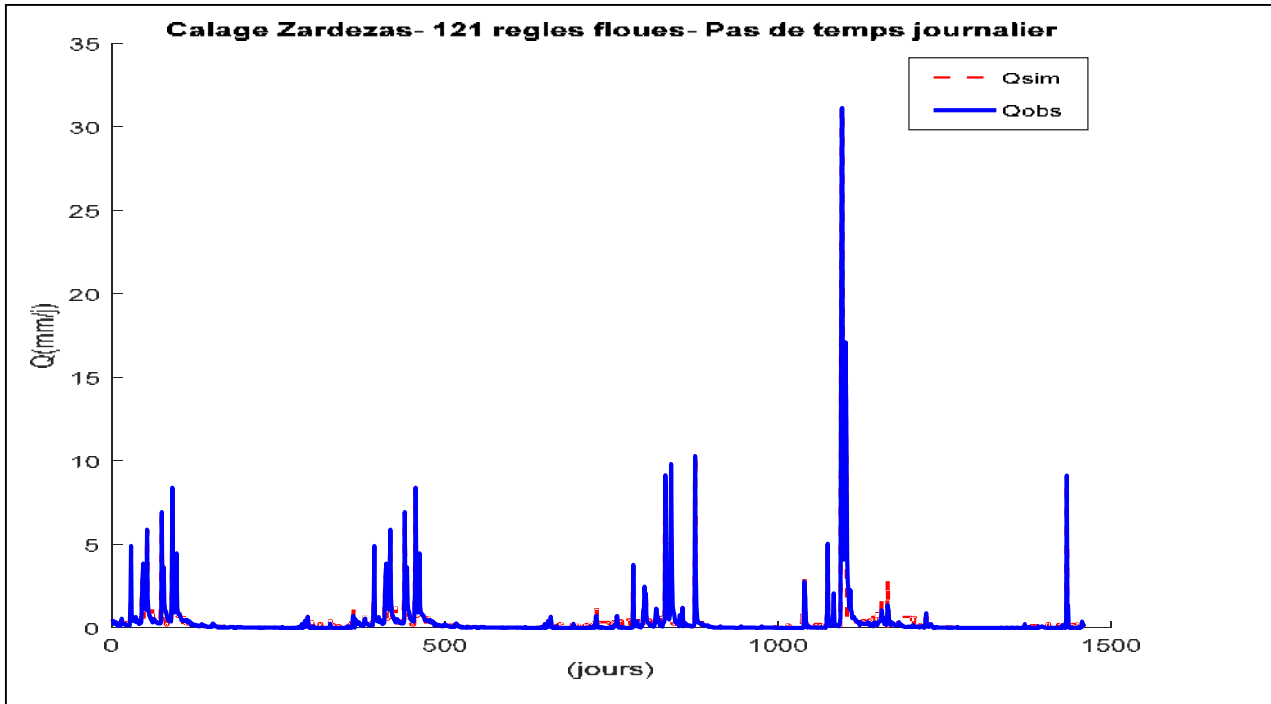


Figure (VI.53) : Calibration Zardezcas -121 règles floues-Pas de temps journalier

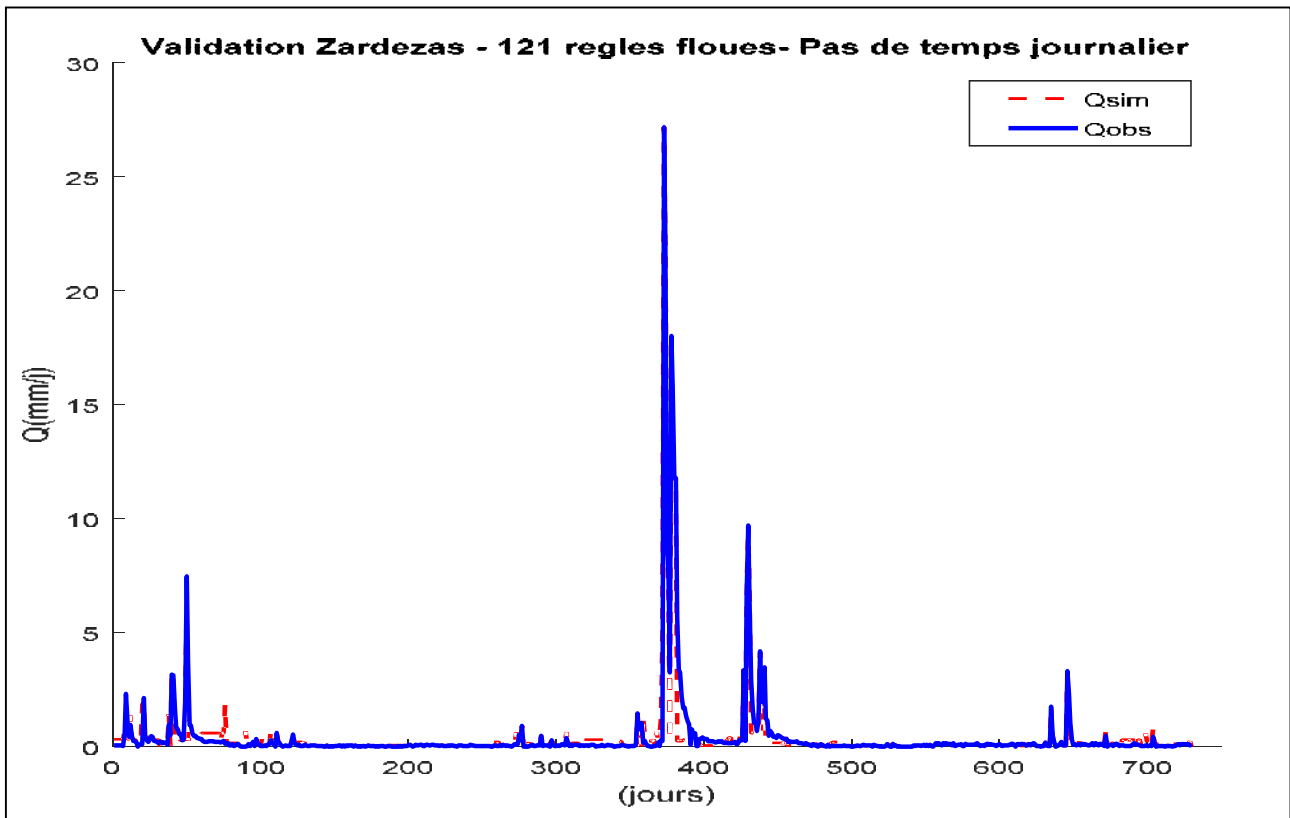


Figure (VI.54) : Validation Zardezcas -121 règles floues-Pas de temps journalier

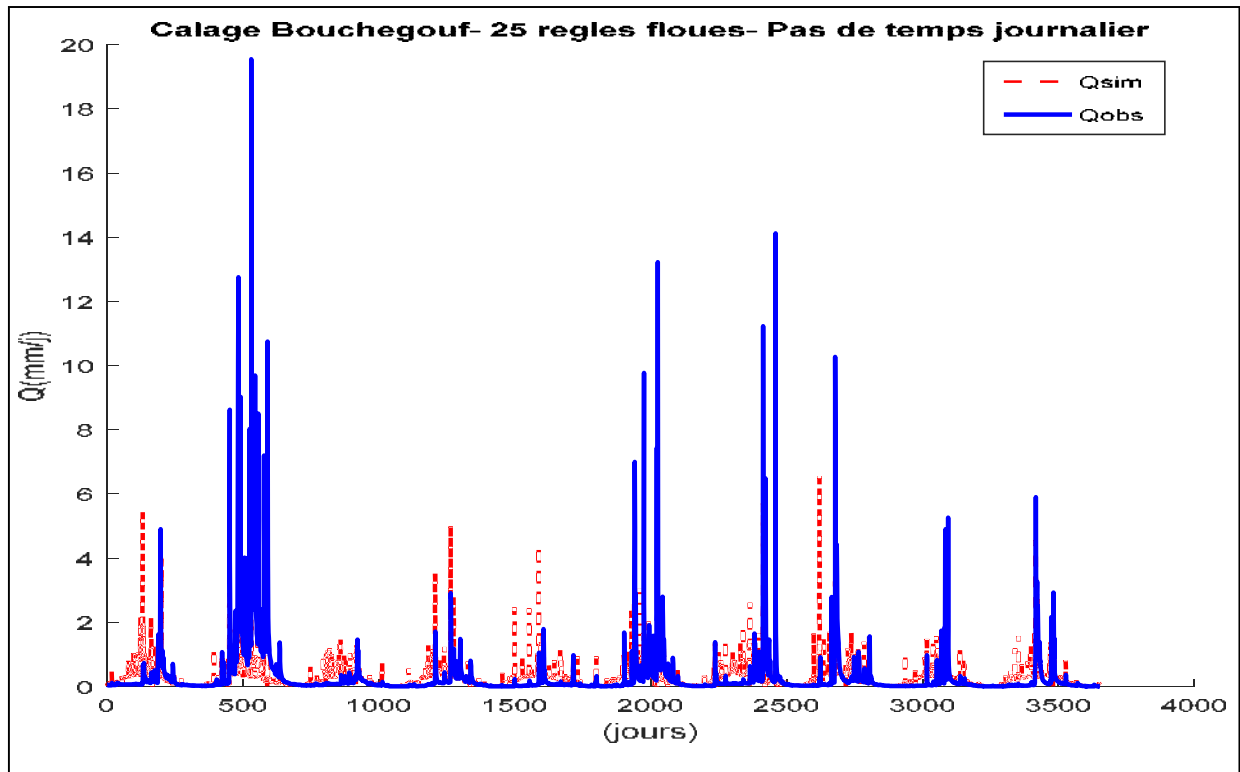


Figure (VI.55) : Calibration Bouchegouf-25 règles floues-Pas de temps journalier

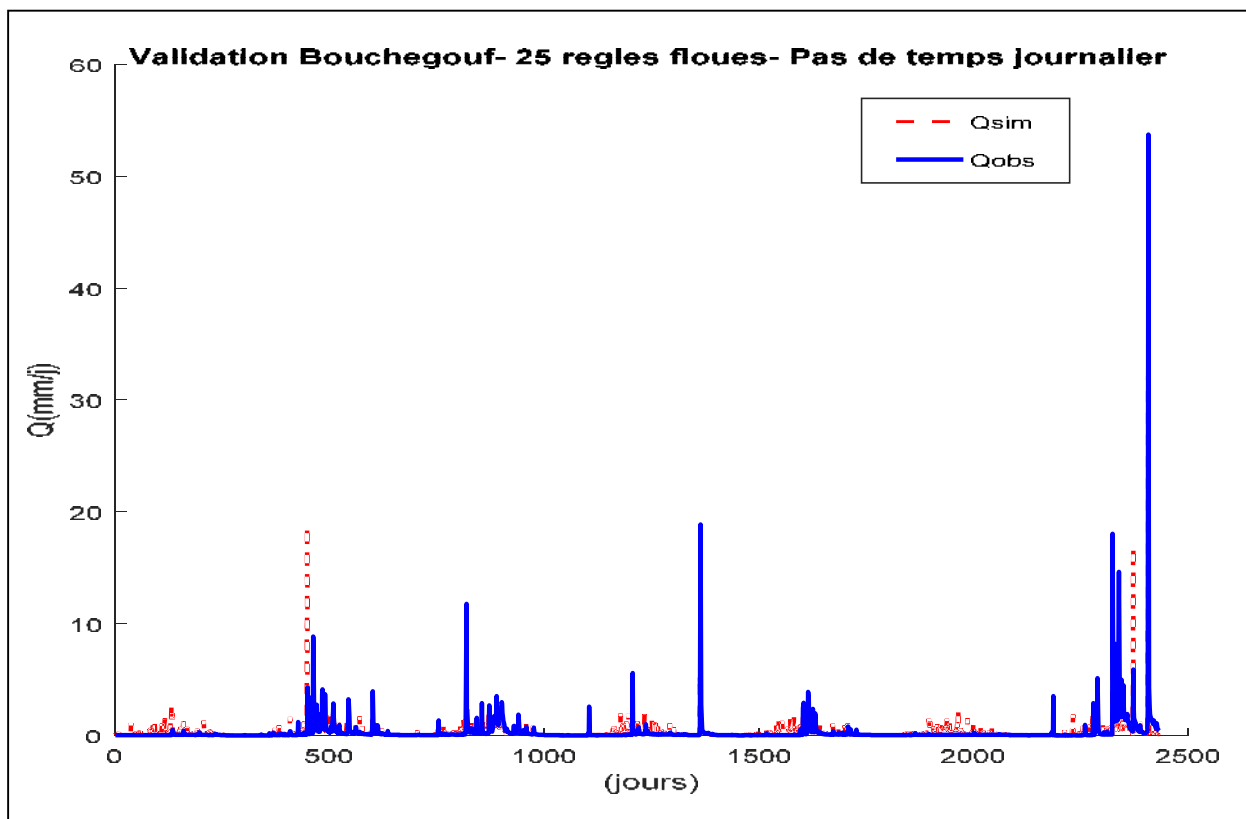


Figure (VI.56): Validation Bouchegouf-25 règles floues-Pas de temps journalier

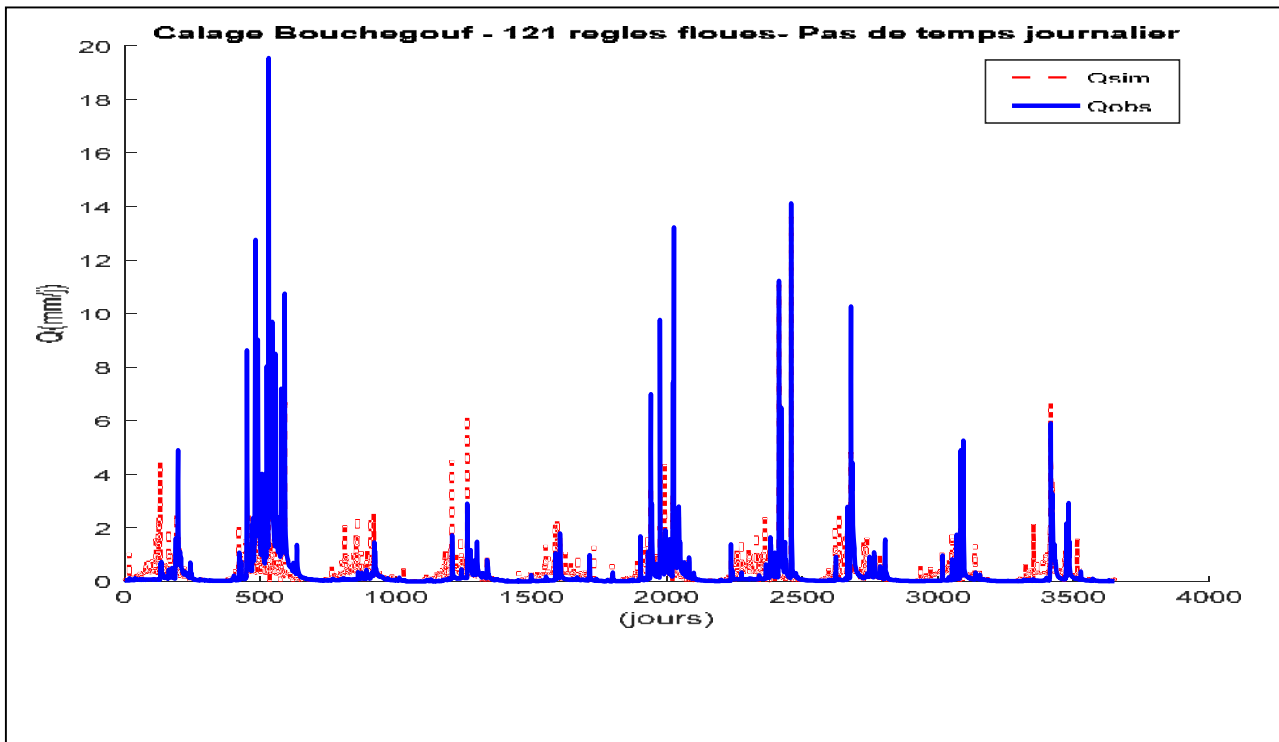


Figure (VI.57): Calibration Bouchegouf -121 règles floues-Pas de temps journalier

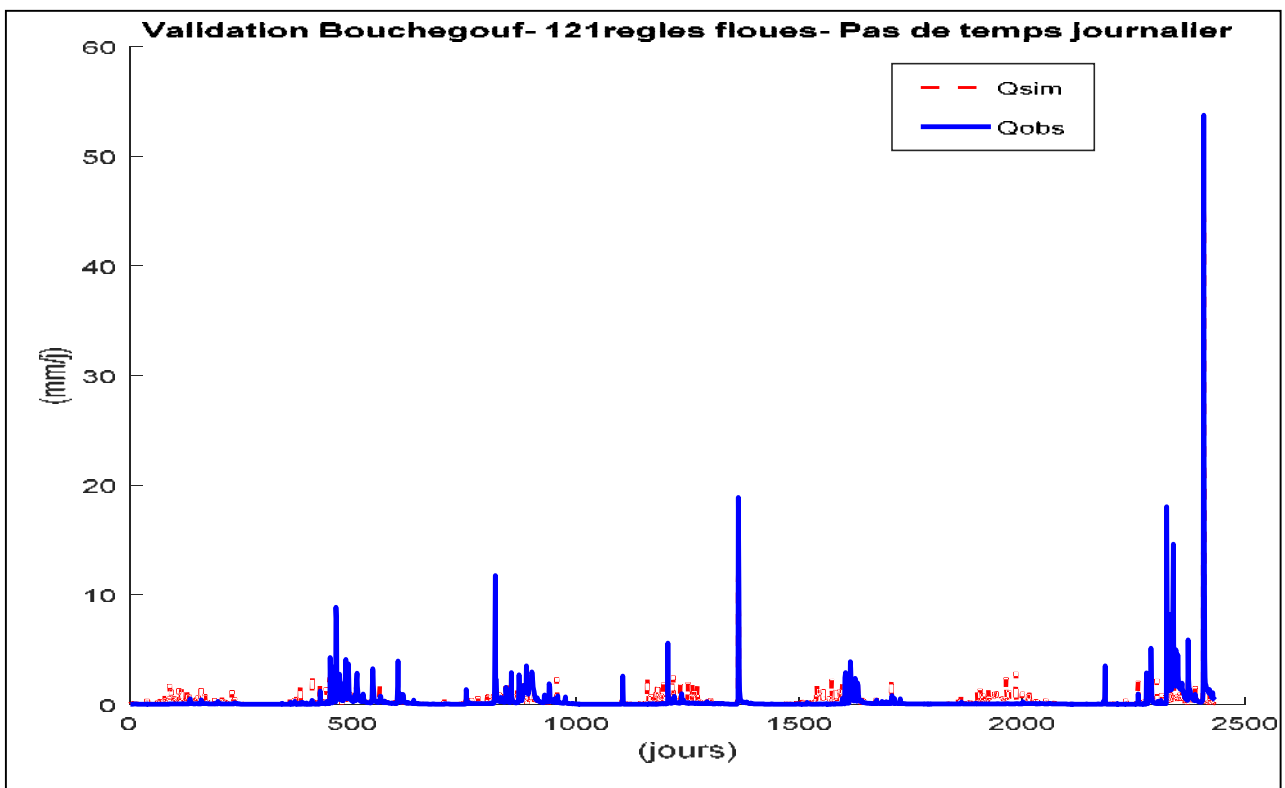


Figure (VI.58) : Validation Bouchegouf -121 règles floues-Pas de temps journalier

VI.6.2.3 Commentaires sur les résultats du Neuro flou (Pas de temps journalier):

Pour la modèle Neuro Flou au pas de temps journalier, le nombre de règles floues utilisé est variable, nous avons commencé par (5x5) ensuite (7x7) et enfin (11x11). Les mêmes remarques restent valables dans ce cas aussi, à savoir, l'amélioration des résultats quand le nombre de règles floues augmentent, et le temps d'exécution devient trop long, par rapport aux autres modèles déjà développés dans ce travail. En effet, pour le bassin de la Cheffia par exemple, le temps d'exécution pour 11² règles floues est de 6946 s, c'est à dire presque deux heures. (1.92 heures). Pour Zardezas, il est de 2 heures 02 min, et il est de 10.84 heures pour Bouchegouf et ce pour le même nombre de règles floues, vu le nombre de données à traiter.

Les résultats des critères numériques (NSE, R², et RSR), peuvent être considérés comme très bons, pour les bassins des Isser, de Zardezas et de la Cheffia (86% ≤ NSE ≤ 94% et 0,25 ≤ RSR ≤ 0,37), que ce soit en phase de calage ou de validation, et ce pour un nombre de règles floues de (11x11). Cependant les résultats sont médiocres pour le bassin de Bouchegouf (NSE = 27.80% pour la calibration) et moyens pour la validation (NSE = 75.21%).

Pour ce dernier bassin, le nombre de données utilisé, dans la phase de calibration dépasse les 3000 valeurs, ce qui a probablement constitué une difficulté majeure dans le processus d'apprentissage pour la méthode ANFIS développée.

Pour les critères graphiques, l'évolution des hydrogrammes observés et simulés est comparable pour les bassins des Isser, de Zardezas et de la Cheffia. Par contre pour le bassin de Bouchegouf, le report des pics et mêmes des hydrogrammes est médiocre et surtout lors de la phase de calibration.

VI.7- Discussion générale et résultats :

VI.7.1- Selon les fonctions «objectifs» :

Effectuons une comparaison entre les différentes méthodes utilisées dans ce travail de recherche sur la base de plusieurs critères. D'abord sur la base des critères d'évaluation ou fonctions objectifs pour avoir une idée sur l'efficacité de chaque méthode modéliser la relation pluie-débit dans un contexte bien déterminé.

VI.7.1.1. Pas de temps journalier :

a- Moyenne du GR4J :

Tableau VI.28: Récapitulatif des résultats moyens du GR4J sur les BV étudiés

	Nash(%)	R ²	Bilan(%)	PBIAS(%)
MoyenneGR4J (Calibration)	76.92	0.73	93.85	3.65
MoyenneGR4J (Validation)	58.685	0.645	106.93	-6.925

b- Moyenne TK_FK (standard)

Tableau VI.29: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Standard sur les BV étudiés

	Nash	R ²	PBIAS	RSR	RMSE
Moyenne TK_FK standard (Calibration)	0.9442	0.951325	8.3562	0.222025	0.397175
Moyenne TK_FK standard (Validation)	0.9455	0.9617	6.459325	0.19595	0.30885

c-Moyenne TK_FK (Etendu)-Formulation - Updating :

Tableau VI.30: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendu sur les BV étudiés

	Nash	R ²	RSR	RMSE	SDEV
Moyenne TK_FK Etendu (Calibration)	0.978	0.980	0.089	0.265	3.351
Moyenne TK_FK Etendu (Validation)	0.960	0.96025	0.13225	0.2585	2.28585

d-Moyenne TK_FK (Etendu)-Formulation – Not Updating:

Tableau VI.31: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendu sur les BV étudiés

	Nash	R ²	RSR	RMSE	SDEV
Moyenne TK_FK Etendu (Calibration)	0.9745	0.97475	0.09725	0.231525	3.2648
Moyenne TK_FK Etendu (Validation)	0.9735	0.97425	0.09525	0.1807	2.3185

e-Moyenne Neuro-floue (11x11 règles) :

Tableau VI.32: Récapitulatif des résultats moyens du Neuro-floue sur les BV étudiés

	Nash	RSR	R ²
Moyenne Neuro-flou (Calibration)	75.33	0.434	0.754
Moyenne Neuro-flou (Validation)	87.36	0.340	0.877

Selon ces tableaux récapitulatifs, la méthode Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu (formulation Updating et Not-Updating) est la méthode qui donne les meilleurs résultats pour

la modélisation de la relation Pluie – Débit pour les bassins étudiés. La méthode Tank Model couplé au Filtre de Kalman Standard vient en deuxième position, la méthode Neuro-Floue occupe la troisième position, par contre, pour les séries temporelles assez longue, cette méthode perd sa performance et les paramètres d'évaluation chutent. Enfin, la méthode GR4J vient en dernier lieu, malgré sa robustesse et sa simplicité, cette méthode trouve une difficulté majeure dans la reproduction des pics, par contre sa simplicité dans l'utilisation et son temps de calcul demeurent très remarquables.

VI.7.1.2.Pas de temps mensuel :

a-Moyenne du GR2M :

Tableau VI.33: Récapitulatif des résultats moyens du GR2M sur les BV étudiés

	Nash(%)	R ²	Bilan(%)	PBIAS(%)
MoyenneGR2M (Calibration)	67.315	0.65	93.15	6.85
MoyenneGR2M (Validation)	54.77	0.65	100.63	-0.63

b-Moyenne TK_FK (standard):

TableauVI.34: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Standard sur les BV étudiés

	Nash	R ²	PBIAS	RSR	RMSE
Moyenne TK_FK standard (Calibration)	0.9089	0.915175	6.4325	0.2947	5.6454
Moyenne TK_FK standard (Validation)	0.9272	0.9339	9.4351	0.2362	5.1197

c-Moyenne TK_FK (Etendu)- Updating :

TableauVI.35: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendu sur les BV étudiés

	Nash	R ²	RSR	RMSE	SDEV
Moyenne TK_FK Etendu (Calibration)	0.9918	0.9920	0.0055	1.7222	458.1465
Moyenne TK_FK Etendu (Validation)	0.989	0.9885	0.006	2.209	577.592

d-Moyenne TK_FK (Etendu)-Formulation - Not_Updating :

Tableau VI.36: Récapitulatif des résultats moyens du TK-FK-Etendu sur les BV étudiés

	Nash	R ²	RSR	RMSE	SDEV
Moyenne TK_FK Etendu (Calibration)	0.990	0.990	0.0055	1.95175	444.920
Moyenne TK_FK Etendu (Validation)	0.9925	0.99225	0.0045	1.89835	536.90825

e-Moyenne Neuro-floue (8x8 règles) :

Tableau VI.37: Récapitulatif des résultats moyens du Neuro-floue sur les BV étudiés

	Nash	RSR	R ²
Moyenne Neuro-flou (Calibration)	96.29	0.17	0.96
Moyenne Neuro-flou (Validation)	99.02	0.0895	0.989

Au pas de temps mensuel aussi, la méthode du Tank Model couplé au FK Etendu a donné les meilleurs résultats, alors que c'est la méthode Neuro-Floue qui arrive en deuxième position, avec une légère différence dans les résultats des fonctions objectifs, mais avec un temps de calcul très long et même incomparable (voir plusieurs heures contre plusieurs secondes), vient ensuite le Tank Model couplé au FK Standard, avec un excellent temps de calcul, et enfin la méthode GR2M, avec sa simplicité de deux paramètres seulement, et sa robustesse sur l'ensemble des bassins algériens et autres (KABOUYA,1990).

VI.7.2- Le TankModel de Sugawara adopté pour le cas algérien :

Le modèle de Sugawara est souvent connu par quatre réservoirs, appliqué au contexte algérien, nous avons pu dans cette étude diminuer le nombre de réservoirs à deux, sans qu'il y ait une influence sensible sur les résultats. Nous avons ainsi réduit le nombre de réservoirs à 2 (réservoirs supérieurs) ce qui réduit, le nombre de paramètres pour le pas journalier à 10 : (A11, A12, C11, C12, A21, C21, B1, B2, H1, H2), Figure(VI-59a) et à 08 paramètres pour le cas mensuel (B2 = 0, C21=0), Figure(VI-59b).

Ce modèle à 10 paramètres a été utilisé dans la formulation Tank Model couplé au Filtre de Kalman Standard et Etendu (Updating).

Les 08 premiers paramètres d'état peuvent être fixes et présentent les paramètres structurels des réservoirs, ainsi pour un bassin versant donné, les paramètres variables sont uniquement

réduits aux charges : H1 et H2, (Voir la formulation du Tank Model couplé au Filtre de Kalman Etendu (Not Updating)). En effet, ceci simplifie énormément le problème et constitue en soi, un résultat très utile.

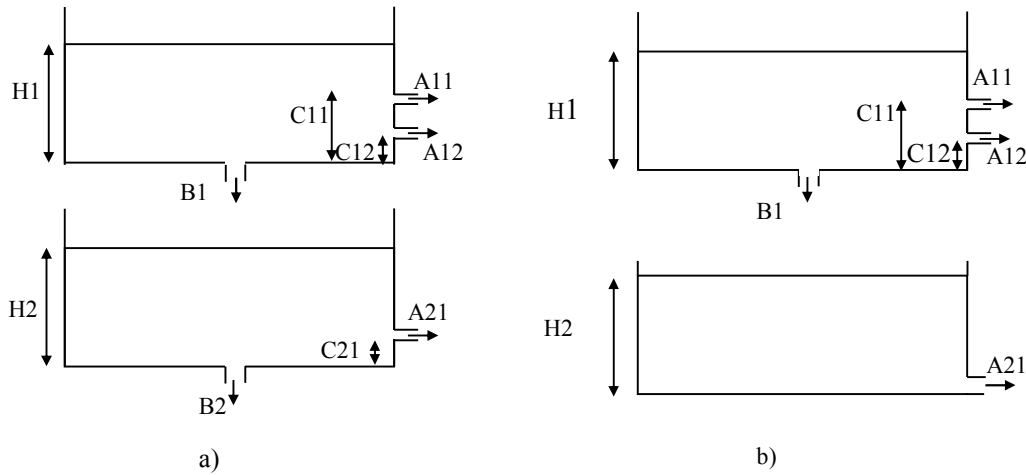


Figure (VI.59) : Structure adoptée pour le Tank Model en Algérie

VI.7.3- Temps de calcul

Le temps de calcul est un paramètre décisif pour le choix de la meilleure méthode qui doit être utilisée pour la modélisation de la relation Pluie- Débit.

Pour le cas des GR, la méthode « try and error » peut prendre un temps très long, pour trouver les meilleurs paramètres de calibration, et ensuite de validation. Les méthodes d'optimisation automatique ont réduit énormément le temps de calcul.

La méthode du Tank Model couplé au Filtre de Kalman enregistre le temps le plus court lors de l'exécution des programmes aux différents pas de temps.

Le modèle Neuro-Flou prend beaucoup de temps dans l'exécution, et surtout au pas de temps journalier, ce temps augmente lorsque le nombre de règles floues augmente, le cas le plus long dans notre cas a pris un peu plus de 10 heures.

Généralement les temps de calcul des modèles Neuro-Flous sont longs parfois même inadmissibles.

VI.7.4- Taille de l'échantillon :

La taille de l'échantillon, semble aussi avoir un impact direct sur la lenteur de calcul, et des résultats trouvés, par la méthode Neuro-Floue. En effet, le problème du temps de calcul se complique de plus en plus, quand le nombre de règles floues appliquées augmente, et ce à l'inverse de la qualité des résultats, qui eux s'améliorent davantage en augmentant le nombre de règles.

VI.8. CONCLUSION :

Dans cette partie de l'étude, nous avons modélisé la relation Pluie- Débit sur quatre bassins à savoir les Isser, la Cheffia, Zardezas et Bouchegouf via quatre modèles différents : les GR, le

Tank Model de Sugawara couplé au FK Standard et le Tank Model couplé au FK Etendu ainsi qu'au modèle boîte noire appelé : Neuro-Flou.

Les résultats trouvés montrent la supériorité du modèle dit : Tank Model de Sugawara couplé au FK Etendu (extended) sur le reste des modèles.

Une simplification de la structure du Tank Model et une réduction du nombre de ses paramètres a été adopté pour les bassins étudiés et restent à confirmer pour le reste des bassins de la zone semi-aride en Algérie.

CONCLUSION GENERALE

La connaissance du débit d'un cours d'eau est devenue indispensable à la gestion des systèmes hydrologiques. Plusieurs axes de recherche se sont développés dans ce sens, qui vise la quantification de cette ressource en partant de son origine première : la pluie, jusqu'à arriver au débit du cours d'eau.

Les modèles hydrologiques sont des outils numériques qui servent à représenter le fonctionnement d'un bassin versant. L'objectif de cette modélisation est de simuler l'une ou plusieurs de ces composantes pour une échelle de temps et d'espace.

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'améliorer le fonctionnement d'un modèle de simulation des débits, au travers d'une approche comparative pour apprécier les forces et les faiblesses de différentes représentations mathématiques existantes de la transformation pluie-débit.

Pour cela, une évaluation des qualités des modèles développés doit être effectuée, et testée sur différents bassins versants pour explorer les voies d'amélioration possibles de ces modèles.

La recherche de modèles plus satisfaisants a en effet, des enjeux importants. Elle permet tout d'abord une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant, et garantit ensuite une meilleure fiabilité aux applications qui utilisent les simulations du modèle dans un contexte opérationnel.

Toutefois, la performance des modèles pluie-débit dans la simulation des débits des cours d'eau et des autres flux du cycle hydrologique dépend du choix du modèle et certainement aussi de la qualité de l'estimation de leurs paramètres.

Dans ce travail de recherche, nous avons développés trois types de modèles :

- Le premier est le modèle conceptuel global appelés GR (Génie Rural), dans notre cas, il s'agit du GR4J, pour le pas de temps journalier, et GR2M, pour le pas de temps mensuel.
- Le second, est un modèle « boîte noire », appelé : Modèle Neuro-Flou : ANFIS.
- Le dernier enfin, est un couplage entre le Tank Model de Sugawara et le Filtre de Kalman, ce type de modèle a été choisi pour parer aux problèmes des erreurs qui peuvent entacher la mesure sachant que ce problème est très fréquent en Algérie.

Nous avons ensuite testé ces différents modèles développés, afin d'évaluer leur capacité dans la modélisation de la relation pluie-débit, sur quatre bassins versants Algériens (Isser, Zardezas, Cheffia et Bouchegouf) à climats variables, caractérisés par une forte variabilité annuelle et interannuelle, et des cycles de sécheresses qui sévissent d'une période à l'autre.

La comparaison entre ces différents modèles a été effectuée sur la base de nombreux critères :

Critères d'évaluations numérique et graphique, temps de calcul, pas de temps et taille de l'échantillon.

A la lumière des résultats obtenus, on peut conclure que les modèles GR donnent de bons résultats surtout à l'échelle mensuelle et paraissent assez stables dans la modélisation pluie-débit en Algérie du moins pour la zone semi-aride. Cependant leurs résultats restent inférieurs aux autres méthodes étudiées, la reproduction des pics des hydrogrammes est moins bonne pour l'échelle journalière et reste insuffisante.

Les modèles boîtes noires, ANFIS dans notre cas, bien qu'ils ne se basent pas sur une explication physique du phénomène, mais beaucoup plus sur un apprentissage d'un événement précédent, donnent des résultats meilleurs, et ce pour des pas de temps importants et pour des phénomènes plus cycliques, c'est pour cela que leurs résultats sont nettement meilleurs pour le pas de temps mensuel que journalier.

Par contre, l'aboutissement à de bons résultats avec cette méthode nécessite l'introduction d'un nombre élevé de règles floues et par conséquent un temps de calcul énorme, dépassant même plusieurs heures. L'absence des fondements physiques dans cette méthode et l'existence d'erreurs dans les valeurs observées du paramètre modélisé peut conduire à des résultats loin de la réalité.

Enfin, le couplage du Tank Model de Sugawara au Filtre de Kalman, semble donner les meilleurs résultats, et dans des temps de calcul plus courts.

Le Filtre de Kalman Extended a montré sa supériorité par rapport au filtre de Kalman Standard dans la modélisation des relations non linéaires et surtout quand le pas de temps devient de plus en plus important.

Le couplage Tank Model avec Filtre de Kalman, a montré aussi, sa conservation du caractère physique du phénomène, et qu'il est capable de combler les erreurs existantes dans le modèle d'une part, et dans les mesures d'autres part, en supprimant tout bruit blanc dans les deux systèmes, et aboutissant à une simulation plus fiable. Cet avantage peut faire de lui un outil de prédiction et de simulation très intéressant, et adapté à un ensemble de réalités locales.

Cette étude nous a permis aussi de déterminer, la structure du Tank Model s'adaptant aux bassins versants Algériens, en la simplifiant à deux réservoirs seulement.

En conclusion, on peut dire que ce travail de recherche, a abouti à d'excellents résultats, et permet de s'ouvrir sur d'intéressantes perspectives. Il confirme l'intérêt de la méthodologie et les outils utilisés qui, habilement employés et bien maîtrisés, conduisent à des résultats intéressants.

La détermination des paramètres des différents modèles et leurs structures finales a été un objectif primordial dans notre travail vu la spécificité des climats semi-arides comme il est le cas des bassins algériens étudiés.

Actuellement, l'utilisation du filtre de Kalman comme outil de prévision en temps réel est incontestable. C'est pour cela qu'en perspectives nous réfléchissons à chercher les meilleurs modèles pouvant être couplés au filtre de Kalman et répondre aux divers problèmes de prévision en hydrologie et notamment la prévision des crues pour les zones semi-arides en Algérie.

Aussi, il va falloir vérifier si le Tank model couplé au filtre de Kalman donne de bons résultats sur les zones arides en Algérie.

BIBLIOGRAPHIE

- Abbott M.B, Bathurst J.C, Cunge J.A, O'Connell P.E and Rasmusen J.L. (1986) An introduction to the European Hydrological System 'SHE'. Structure of a physically-based distributed Modelling system. Journal of hydrology, 87; 61-67.

- Abdi. I, Meddi.M.(2015) - Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°23, September 2015

- ABHCS-M, Agence des bassins hydrographique, Constantine, 2013.

- Alazard D Introduction au filtre de Kalman [Livre]. - [s.l.] : SUPAERO, 2006. - Université de Toulouse.

- Ambroise B. (1991) Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, Processus et Modèles. Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques. Université Louis Pasteur, Strasbourg. 33 p.

- Ambroise B, (1998a), Genese des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1- Processus et facteurs. Revue.Science de l'eau, 11 (4) , pp 471-495.

- Amireche M et al.(2017), Comparative assessment between GR Model and TankModel for rainfall-runoff analysis using Kalman filter - application to Algerian basins - MATEC Web of Conferences 120, 05006 , ASCMCES 17.

- Amraoui N., Golaz C., Mardhel V. and Pinault J. (2003) Evaluation du risque d'inondation dans le bassin de la Somme : apport de l'approche globale et de l'approche distribuée. SIRNAT (Orléans); 1-9.

- Anctil F., Michel C., Perrin C. and Andréassian V. (2004) A soil moisture index as an auxiliary ANN input for stream flow forecasting. Journal of hydrology, 286; 155-167.

- Andréassian, V., (2002). Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de PhD . Universite' Pierre et Marie Curie, Paris, 781 pp.

- Andre'assian, V., Parent, E., Michel, C., (2003). A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. Water Resources Research 39 (9), 1252.

- Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N. et Schaake, J., (2006). Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: Large sample basin

- experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°307, pp. 1-5.
- Andréassian V., Michel C., Perrin C. (2007), Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), Cemagref, 2007.
 - Arnell N. (1992) Factors controlling the effects of climate change on river Flow regimes in humid temperatures environments. Journal of hydrology, 132; 321-342.
 - Arnold J G., Bigner R L., Harmel R D., Moriasi D N., Van Liew M W., Veith T L., Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation, American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-23351, Vol. 50(3): 885-900, 2007.
 - Ayadi M. and Bargaoui Z. (1998). Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU. Hydrological Sciences Journal, 43(5); 741-758.
 - Bardossy A et Duckstein L (1995). Fuzzy rule based Modelling with applications to Geophysical; biological and Engineering systems. CRC Pres. Boca Raton. Florida. USA.
 - Båse F., Boyle D P., Krausse P., Comparison of different efficiency criteria for hydrological Model assessment, Advances in Geosciences, 5, 89-97, 2005, European Geosciences Union.
 - Baudez J.C., Loumagne C., Michel C., Palalgos B., Gomendy V. and Bartoli F. (1999) Modélisation hydrologique et hétérogénéité des bassins. Etude et gestion des sols, 6 (4); 165-184.
 - Benkaci T (2006), Modélisation pluie-débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous (Application aux bassins algériens), Thèse de doctorat, Institut National d'Agronomie- Algérie.
 - Benkaci Ali T. et Dechemi N. (2004) Modélisation pluie-débit journalière par les modèles conceptuels et 'boit noire', test d'un modèle neuroflou. Journal des sciences hydrologiques 4(21).
 - Benkaci T (2001) ,Contribution à la modélisation de la relation pluie-débit au pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les réseaux de neurones. These de Magister . Institut National agronomique d'Alger.
 - Bergstrom S. and Forsman A. (1973) Developed of a conceptual deterministic rainfall-runoff Model. Nordic hydrology, 4; 47-70.
 - Berthier E. (2008) . Digital elevation models and the monitoring of glacier elevation changes in North-West Canada and South-East Alaska. Remote sensing of environment, Vol

112 , issue 5, 15 Mai 2008, pp 2443- 2454.

- Beven K.,j. and Kirkby M.j. (1979) A physically based Model, variable contributing area Model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 43-69.
- Beven K., Calvert A., Morris E.M. (1987) *The Institute of Hydrology Distributed Model*. Institut d'hydrologie, rapport (8), Wallingford, Royaume uni, 30 p.
- Bierman G.J . (1974) Sequential square root filtering and smoothing of discrete linear systems ; *Automatica* ; Vol 10, Issue 2, March 1974, Pages 147-158.
- Bouabdallah F. (1997) Mise au point d'un modèle de transformation pluie-débit au pas de temps annuel. Rapport D.E.A, CEMAGREF, 45 p.
- Box G. & Jenkins G.M. (1976), *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden Day Inc. Oakland, CA. 575 p.
- Bras, R.L., and Rodrigueze-Iturbe, I., *Random Functions and Hydrology*, Addison-Wesley Pub (1985).
- Chahinian N. (2004) Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole. Thèse de doctorat Université Montpellier II, 260 p.
- Chambaz H. (1990) Contribution à l'étude de la méthode DPFT- différence première de la fonction de transfert- Application au bassin versant de l'oued Dis. Thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP), 200 p.
- Chiew F and Mc Mahon T. (1994) Application of the daily rainfall-runoff Model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments. *Journal of hydrology*, 153; 383-416.
- Chkir, N., (1994) Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris 327p.
- Clarke D L (1973), *Archeology : the loss of innocence*, *Antiquity*, vol 47 , pp 6-18
- Coulibaly P., Anctil F., Bobee B. (1999) Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels : Etat de l'art. *Journal of civil engineering*, 26; 293-301.
- Cormary Y. (1967), *Problèmes de représentation et d'interprétation des débits de basses eaux du bassin des Aillier*. EDF, CREC., Montpellier .
- Crawford N.H and Linsley, R.K. (1966) *Digital simulation in hydrology*. Stanford

Watershed Model IV. Technical report 39, université de Standford , Californie.

- Croke B.W and Jakeman A.J. (2004) A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff Model. *Environmental Modelling & Software*, 19; 1–5.
- Dechemi N. et Chambaz H. (1994) La prévision des crues du bassin versant de l’oued Dis (Sebbaou) par la méthode DPFT. *Revue Sciences de l’eau*, 7; 331-342.
- Dechemi N., T. Benkaci et A. Issolah (2003). Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Rev. Sci. Eau*, 16, 407-424.
- Degallier. R , (1972); Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. *Bulletin du BRGM (2ème série) section III*, pp 23-42.
- D’Herbes. J , Valentin. C. (1997), Land surface conditions of the Niamey region : ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 1997, 188-189, p. 18-42.
- Dimopoulos I., Lek S., Lauga J. (1996). Modélisation de la relation pluie-débit par les réseaux connexionnistes et le filtre de Kalman. *Journal des sciences hydrologiques*, 41; 177-193.
- Duband D. (1978) Fonctions de transfert pluie-débit sur des bassins versants de l’ordre de 1000 km² . Note interne, EDF-DTG, Grenoble.
- Edijatno. et Michel C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2; 113-121.
- Edijatno. (1991) Mise au point d’un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg. 220 p.
- Edijatno, Nascimento O., Yang X., Makhlof Z., & Michel C. (1999) GR3J : A daily watershedModel with three parameters. *Hydrological Sciences journal*, 2; 263-278.
- Enzo C, Kellya C et Thibaut D (2010). Etude de cas : Filtre de Kalman [Section du livre]. - Paris : Telecom ParisTech, 2010.
- Ewen J., Parkin G., O’Connell P.E (1998) SHETRAN : a coupled surface/subsurface Modelling system for 3D water flow and sediments and solute transport in river basins. *Water resources research*.
- Ferdinand Piette Le filtre de Kalman étendu : principe et exemple [Revue]. - [s.l.] : <http://www.ferdinandpiette.com>, 2011.
- Ferdinand Piette Le filtre de Kalman : intérêts et limites [Article]. - 2012. - <http://www.ferdinandpiette.com>.

- Freeze, R.A. and Harlan, R.L., 1969. Blueprint for a physically-based digitally-simulated hydrologic response Model. *Journal of Hydrology*, 9; 237-258.
- Freeze A.R. (1971) Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Research*, 32; 2161-2173.
- French M., Krajewski W., Cuykendall R. (1992) Rainfall forecasting in space and time using neural network. *Journal of hydrology*, 137; 1-31.
- Gaume E., Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit, Novembre 2000.
- Georgakakos KP . (1986) A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: 1. Formulation. *Water resources research*.Volume 22; issue 13; Décembre 1986 , p 2083-2095.
- Georgakakos KP et Smith G.F . (1990) On improved hydrologic forecasting — Results from a WMO real-time forecasting experiment. Volume 114, Issues 1–2, March 1990, Pages 17-45.
- Girard G., Morin G., Charbonneau R. (1972) Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, IX(4), 35-52.
- . Guenounou.O (2009). Methodologie de conception de controleurs intelligents par l'approche génétique-application a un bioprocédé. These de doctorat de l'université de Toulouse ,2009.
- Gupta HV; Sorooshian S et Yapo P O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of hydrologic engineering*.Vol (4) ; issue 2- April 1999.
- Hartani R. (1995). Modélisation de systèmes neuroflou, contributions théoriques et applications. Thèse de Doctorat ; université de Paris VI ; France.
- Hewlett J.D. (1961) Watershed Management. In : Annual Report 1961, USDA Forest Service, Asheville (INC, USA), 61-66.
- Higy C. (2000) Modélisation conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques : application du bassin versant de la haute Mentue. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 300 p.
- Hippert H.S, Pedreira C.E, Souza R.C (2001). Neural network for short term load forecasting: A review and evaluation. *IEEE -Transaction on Power systems*. 2001-16: p44-55.
- Hoteit I . (2001) Filtres de Kalman réduits et efficaces pour l'assimilation des données en océanographie , Modélisation et simulation , Thèse ; Université Joseph Fourier ; Grenoble I; France.

- Hreiche A., Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen, Thèse de doctorat, Université Montpellier et Université Saint-Joseph, 2003.
- Hsu K., Gupta H., Sorooshian S. (1995) Artificial neural network Modelling of the rainfall-runoff process. *Water resources research*, 31; 2517- 2530.
- Hursch C.R. (1936) Storm water and absorption. *Trans of American geophysical Union*, 17; 301- 302.
- Hursch C.R. & Brater E.F. (1941) Separating storms hydrographs from small drainage areas into surface and subsurface flow. *Trans of American geophysical Union*, 22; 863-870.
- Husain, T. (1985). Kalman filter estimation model in flood forecasting. *Advances in Water Resources.*, Vol (8), p15–21.
- Jakeman A.J., Littlewood I.G., Whitehead P.G. (1990) Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable components flows with application to two small upland catchments. *Journal of hydrology*, 117; 275-300.
- Jang J.S.R.(1993). ANFIS adaptive- Network-based Fuzzy Inference Systems. *IEEE, Man, and Cybermatics* 23. p 665-685.
- Jermar M.K, (1987) : Water resources and water management, *Development in water science*, **28**,pp. 33-40, 1987.
- Kabouya, M., 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris SudOrsay, 347 pp.
- Kabouya, M. et Michel, C., 1991. Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau* .
- Kalman. R.E. (1960); A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [Revue] -*Transactions of the ASME*. - [s.l.] : *Journal of Basic Engineering* Vol. 82, 1960. - pp. 35-45.
- Kalman, R. E., and Bucy, R. S. (1961). New results in linear filtering and prediction theory. *Trans. ASME, J. Basic Engrg.*, 83, p 95–107.
- Kitanidis, P.K., and Bras, R.L.,: Real-time forecasting with a conceptual hydrologic Model, 1.Analysis of uncertainty, *Water Resour. Res.*, **16(6)**, pp. 1025-1033(1980).
- Knapp R.M et al (1975) , Development and field testing of a basin hydrology simulator , *water resources research* , Vol(II), N°6. pp(879-888).
- Laborde. J, (2010) - *Current science* , VOL. 98, N°: 8, 25 APRIL 2010.

- Lapeds R F, Forber R. (1988) - information processing systems, American Institut, 1988
- Lee Y. H et Singh V. P TankModel Using Kalman Filter - Korea : JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING, 1999. - 344-349.
- Lee.G et Wang J.S , (2000). Self-adaptive Neuro - Fuzzy Systems: Structure and learning, IEE/RSJ, International Conference on intelligent Robots and Systems.
- Legates D R; Gregory J et McCabe Jr. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water resources research; Vol.35;N°1; january 1999; p 233-241.
- Lescieux M. (2013), Introduction à la logique floue. Application à la commande floue. cours 2013.
- Li C. , Cheng K.H, Recurrent neuro-fuzzy hybrid- learning approach to accurate system Modeling.Fuzzy Sets and systems, 158: 194-212, 2007.
- Lisika L K, Muamba V.L , and Kimilita P.D (2016). Etalonnage du modèle conceptuel TANK dans le bassin versant Oubanguien. International Journal of Innovation and Applied Studies ; Vol. 17 No. 2 Jul. 2016, pp. 364-372
- Liu J, Doan C D et Liong S, (2010). Conceptual Rainfall-Runoff ModelWith Kalman Filter For Parameter And Outflow Updating- World Scientific Publishing Company. - Singapore : Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore.
- Littlewood I.G., Down K., Parker J.R. Post D.A. (1997) The PC version of IHACRES for catchments-scale rainfall-streamflow Modelling. Version 1.0. User Guide. Institute of Hydrology Ed., 89 p.
- Loumagne, C., Chkir, N., Normand, M., Otlé, C., et Vidal-Madjar, D. (1996) Introduction of the soil-vegetation-atmosphere continuum in a rainfall-runoff Model for remote sensing data assimilation. Hydrological Sciences Journal, (41), 889-902.
- Makhoul Z. (1994) Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, CEMAGREF, 426 p
- Mamdani E.H. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies. Volume 7, Issue 1, January 1975, p 1-13.
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- Mazenc B., Sanchez M., Thiery D. (1984) Analyse de l'influence de la physiographie d'un bassin versant sur les paramètres d'un modèle hydrologique global et sur les débits

- caractéristiques à l'exutoire. *Journal of Hydrology*, 69; 97-118.
- Mebarki A , (2005), hydrologie des bassins de l'Est algerien : ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat , université mentouri de Constantine, Algeria.
 - Merabtene, T., Jinno, K., Kawamura, A., and Matsunaga, T., (1997a): Interactive user interface for rainfall-runoff analysis by TankModel, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, **57(3)**, 107-120.
 - Merabtene, T., Jinno, K., and Kawamura, A., (1997b): Decision support system for the water resources management, *Proc. of the 5th Symposium on Water Resources of the Japan Society of Civil Engineers*, Tokyo, pp. 461-466
 - Merabtene T ; JINNO K; Kawamura A. (1999).Decision support system for optimal drought management of Fukuoka City water resources : Application to the 1994/95 drought conditions. *Proceedings of hydraulic engin. 1999 . Volume 43 p 157-162*
 - Michel C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche* (1), pp39-44.
 - Minns A. and Hall J. (1996) Artificial neural network as rainfall-runoff Models. *HydrologicalSciences journal*, 41; 399-417.
 - Moraisi D.N et al; (2007) , Model evaluation guidelines for systematic quantification of occuracy in watershed simulations; Association of Agricultural and biological Engineers ISSN 0001-2351, Vol 50 (3) ; p 885-900.
 - Moraisi D.N et al; (2015) ,Hydrologic and water quality models : Performance measures and evaluation criteria; American society of Agricultural and biological Engineers, ISSN 2151-0032 , DOI 10.13031/trans 58.10715 ; p 1763-1785.
 - Morel-Seytout H.J. and Al Hasoun S. (1989) The unsaturated components of Swatch. *Theoryand practice. NATO ASI series, Kluwer Academy publication*, 275; 413,433.
 - 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. 16.
 - Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V., (2006a). Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.

- Mouelhi.S, Michel C., Perrin C., Andreassian.V. (2006b).Stepwise development of a two-parameter monthly water balance Model, J.Hydrol., Vol.318, Issues 1-4, 200-214.
- Moussa R, Voltz M, Andrieux P. (2002) Effects of spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of farmed catchment during flood events. Hydrological Processes 16(2): 393-412.
- Nascimento N.O. (1995) Appréciation d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, Cergrene-ENPC, 550 p.
- Nash J.E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. International Association of Scientific Hydrology, Wallingford; 114-121.
- Nash, J.E.& Sutcliffe, J.V.(1970): Riverflow forecasting through conceptual Model,J.Hydrol 10,pp. 282-290.
- Nauck D and Kruse R (1997). What are Neuro-fuzzy Classifiers?, University of Madenburg.
- Ndjeng A Localisation robuste multi-capteurs et multi-modèles - Thèse de Doctorat. - Université D'evry Val d'Essonne. France.
- OMM (Organisation mondiale de la météorologique) et PMRC , Bulletin de l'OMM , Janvier 1986 ;Vol 35 , N° 1.
- Ouachani R, Bargaoui Z et Ouarda T, (2007). Intégration d'un filtre de Kalman dans le modèle hydrologique HBV pour la prévision des débits - Hydrological Sciences Journal. - 2007. - 318-337.
- Özelkan E. and Duckstein L. (2001) Fuzzy conceptual rainfall-runoff Models. Journal of hydrology, 253, 41-68
- Penman H.L. (1963) Vegetation and Hydrology. Commonwealth bureau of soil Technical communication (53), Farnham Royal (U.K) 124 p.
- Perrin C., (Octobre 2000) ,Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de doctorat, de l'INPG, Institut National Polytechnique de Grenoble, Octobre 2000.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279(1-4), 275-289.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2007) , Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), Cemagref, Juin 2007.

- Prasad, R: A non-linear hydrologic system response Model, J. of the Hydr. Div., ASCE, 4, pp. 201-221, (1967).
- Puente C.E , Bras R.L (1987) . Application of nonlinear filtering in the real time forecasting of river flows. Water resources research ; Volume23, Issue4 , April 1987, p 675-682.
- Quesney A. (1999) Assimilation de mesures d'humidité de surface dans un modèle hydrologique conceptuel global. Apport de la télédétection radar ERS/SAR. Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 350 p.
- Rutter A.J. (1971) A predictive Model of rainfall interception in forests. Derivation of the Model form observations in a plantation of corsicane pine. Agricultural Meteorology, 9; 367-384.
- Racoceanu D, (2006). Contribution à la surveillance des systemes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle. Habilitation à diriger des recherches. Université de Franche comté. Besancom.
- Roche P. A. (1971) Les divers types de modèles déterministes. La Houille Blanche 2; 111-129.
- Rodriguez. J.Y. (1989) Modélisation pluie-débit par la méthode DPFT. Thèse de Doctorat. INPG, Grenoble
- Schmidt .S.F. (1966). Application of state-space methods to navigation problems. Advances in control systems , Volume 3, 1966, p 293-340.
- Schreider S.Y ; Young P.C; Jakeman A.J . (2001). An applied of Kalman filtering technique for streamflow forecasting in the upper Murray basin. Mathematical and computer Modelling, 33, (2001), p 733- 743.
- Setra. (2010), Calage et validation des modèles de trafic, Juillet 2010, Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.
- Shamseldin Y. (1996) Application of neural network technique to rainfall-runoff Modeling. Journal of hydrology, 272-294.
- Sherman L.K. (1932) Streamflow from rainfall by the unit-hydrograph method engineering news record, 108; 501-505.
- Singh V.P. (1995) Computer Models of watershed hydrology. 1130 p.

- Sivapalan M (2003) . Prediction in ungauged basins : a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes* 17, pp 3163 - 3170.
- Sugawara, M., Watanabe, E. Ozaki, E., and Katsuyama, Y. (1984). TankModel with snow component. The National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency, Japan.
- Sugawara, M. (1961). Automatic callibration of TankModel. *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*, 24(3): 375-388.
- Sugawara M. (1979), Automatic calibration of the TankModel - Tokyo 157, Japan : *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979. - 0303-6936.
- Sugawara M, (1961): An analysis of runoff structure about several Japanese rivers”, *J. of Geophys., JSCE*, 2, in Japanese,
- Sugawara, M.(1974). Runoff analysis, Kyoritsu Edition, in Japanese.
- Sugawara M. (1979) ,Tank Model [Livre]. - Tokyo : *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979.
- Swerling P. (1958). A proposed stage wise differential correction procedure for satellite tracking and prediciton.
- Thomas H.A. (1981) Improved methods for rational water assessments. US Water Resources Council. Report Number.
- Todini E. (1996) The ARNO rainfall-runoff Model. *Journal of hydrology*, 175; 339- 382.
- Turc L . (1955). Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agr.* 6, 5-131.
- Valentin C. , Poesen J et Yong Li (2005). Gully erosion : impacts, factors and control, *Catena* 63 , 132-153.
- Vakkilainen P. and Karvonen T. (1982) Adaptive rainfall-runoff Models SATT-I. Civil engineering and building construction series. Université de Helsinki, 54 p.
- Vandewiele G.and Xu C. (1992) Methodology and comparative study monthly water balance Model in Belgium. *Journal of hydrology*, 134; 315-347.
- Vasile O E. (2008), Contribution au pronostic de défaillances par réseau neuro-flou: Maîtraise de l'erreur de prédiction, Thèse de doctorat en automatique, Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques, 2008.
- Wang W.Q , Goldnaraghi M.F, Ismail F- Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems. *Mechanical Systems and signal Processing*. 18:813-831, 2004.

- Weeks D. & Boughton W. C. (1987) Tests of ARMA Model forms for rainfall-runoff Modelling. *Journal of hydrology*, 91; 29-47.
- Willmot CJ (1981) . On the validation of models. *Physical Geography*; Vol 2; issue 2; pp184–194.
- Willmot CJ (1984) On the evaluation of model performance in physical geography. In: Gaile GL, Willmot CJ (eds) *Spatial statistics and models*. Springer, Dordrecht, pp 443–460.
- Wood, E. F., and Szollosi-Nagy, A. (1978). An adaptive algorithm for analyzing short-term structural and parameter changes in hydrologic prediction models. *Water Resources Research.*, 14(4), p 577–581.
- Wood E.F et O'Connell P.E. (1985). Real time forecasting. *hydrological Forecasting* (ed. by M.G. Anderson de T.P.Burt), chapter 15. Wiley, Chichester.
- World Meteorological Organisation (Organisation météorologique mondiale). WMO (2009)- N 168. Edition 2009.
- Xiang X , Smith E. (1997) ; Feasibility of simultaneous surface temperature-emissivity retrieval using SSM/I measurements from HAPEX-SAHEL ; *journal of Hydrology* 188-186 (1997), 330-360.
- Yam and al. Intelligent predictive decision support system for condition- based maintenance. *The international journal of advenced manufacturing technology*, 17(5) : 383-391-2001
- Yang, X., Parent, E., Michel, C. et Roche, P.A., (1991). Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. *La Houille Blanche*(6), p 433-440.
- Yang X. (1993) Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 350 p.
- Yasunobu S et S Myamoto. (1985). Automatic Train operation system by predictive Fuzzy Control. *Industrial Applications of Fuzzy Control*.
- Young P. & Wallis S. (1985) Recursive estimation : a unified approach to the identification, estimation and forecasting of hydrological sytem. *Appl. Math. Computer*, 17; 299-334.
- Zadeh L. (1965) Fuzzy sets. *Information and control*, 8; 338-353.
- Zhao R J., (1980) , The Xinanjiang Model; *Proceedings of the Oxford Symposium*, 1980.

- Zhao R.J., Zhang Y.L., Fang L.R., Xiu X.R. and Zhang Q.S. (1991) The Xinanjiang Model, Hydrological Forecasting. IAHS Publication, 129; 351-356.
- Zoch R.T. (1934) On the relation between rainfall and streamflow. Monthly weather review, 62; 315-322.
- Zhang G, Patuwo B.E, Hu M.Y , Foracasting with artificial neural networks: the state of the art. International Journal of Forecasting , 14:35-62, 1998
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_math%C3%A9matique