



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

## Département Hydraulique

**Mémoire de projet de fin d'études**  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

---

Modélisation de la relation Pluie-Débit par les modèles: GR4J, Tank et Multi-Tank couplé au filtre de Kalman (Application à deux bassins versants de climats différents).

---

**Idris BOUHOUN**

Sous la direction de **Pr. Abdelmalek BERMAD**

Codirigé par **Dr. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu le 06/10/2020

Composition du Jury :

<b>Président</b>	Mr Abderrahim BALI	Professeur	ENP
<b>Promoteurs</b>	Mr Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
	Mr Mohamed AMIRECHE	MCB	U-OEB
<b>Examineurs</b>	Mr Abdelouahab LEFKIR	MCA	ENSTP
	Mme Naoual CHENITI	MAA	ENSTP
	Mr Rafik OULEBSIR	Doctorant	USTHB





المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

## Département Hydraulique

**Mémoire de projet de fin d'études**  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

---

Modélisation de la relation Pluie-Débit par les modèles: GR4J, Tank et Multi-Tank couplé au filtre de Kalman (Application à deux bassins versants de climats différents).

---

**Idris BOUHOUN**

Sous la direction de **Pr. Abdelmalek BERMAD**

Codirigé par **Dr. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu le 06/10/2020

Composition du Jury :

<b>Président</b>	Mr Abderrahim BALI	Professeur	ENP
<b>Promoteurs</b>	Mr Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
	Mr Mohamed AMIRECHE	MCB	U-OEB
<b>Examineurs</b>	Mr Abdelouahab LEFKIR	MCA	ENSTP
	Mme Naoual CHENITI	MAA	ENSTP
	Mr Rafik OULEBSIR	Doctorant	USTHB

### ملخص:

نظرًا لأهمية نمذجة علاقة هطول الأمطار بمنسوب السيول، أجرى علماء الهيدرولوجيا العديد من الأعمال البحثية لإنتاج نماذج عالية الأداء تولد بشكل فعال استجابة مستجمعات المياه لهطول الأمطار. في هذه الدراسة، تم نمذجة مستجمعين مائيين من مناخات مختلفة في التراب الجزائري على خطوات زمنية يومية بواسطة: نموذج الهندسة الريفية، نموذج الخزان، نموذج متعدد الخزانات واقتران الأخيرين بمرشح "كالمان".

الكلمات الدالة: النمذجة، علاقة الأمطار-السيول، مستجمعات المياه، نموذج الهندسة الريفية، نموذج الخزان، نموذج متعدد الخزانات، مرشح "كالمان".

### Abstract:

Given the importance of modelling the rainfall runoff relationship, several research works have been carried out by hydrologists to produce high-performance models that effectively generate the response of watersheds to precipitation.

In this study, two watersheds from different climates in Algeria, were modelled on a daily time steps by the models: GR, Tank Model, Multi-Tank Model and the coupling of the latter two to the Kalman filter.

Key words: Modelling, rainfall runoff relationship, watershed, GR model, Tank Model, Multi-Tank Model, Kalman filter.

### Résumé:

Compte tenu de l'importance de la modélisation de la relation pluie-débit, plusieurs travaux de recherche ont été menés par des hydrologues pour produire des modèles performants générant efficacement la réponse des bassins versants aux précipitations.

Dans cette étude, deux bassins versants Algériens de différents climats ont été modélisés au pas de temps journalier par les modèles : GR « génie rurale », Tank Model, Multi-Tank Model et le couplage de ces deux derniers au filtre de Kalman.

Mots-clés: Modélisation, relation pluie-Débit, bassin versant, modèle GR, Tank Model, Multi-Tank Model, filtre de Kalman.

# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, l'intelligence et la patience d'accomplir ce travail et de terminer mon cursus des études.*

*Je tiens à exprimer mes sincères reconnaissances à mon encadreur **Pr. Abdelmalek BERMAD**. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. L'occasion de lui présenter mon respect et ma profonde gratitude.*

*J'adresse mes remerciements au **Dr. Mohamed AMIRECHE** pour son temps, son aide et l'apport des outils méthodologiques indispensables à la conduite de ce travail.*

*Je remercie les membres de jury d'avoir pris le temps et la patience d'examiner le présent travail et pour toutes leurs remarques qui aideront à améliorer mon mémoire.*

*Mes remerciements à tous les enseignants qui œuvrent durement et honorablement chaque jour afin de nous fournir les meilleures connaissances et outils techniques afin de nous améliorer.*

*Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi ; mes frères et sœur pour leurs encouragements.*

*À toutes les personnes qui m'ont aidé à arriver à la fin de mon parcours, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie :*

*Ma mère et Mon père*

*Ma sœur, mes frères et mon neveu Aymen.*

*Mes grands-mères, grands-pères, tantes et oncles.*

*Mes amis proches et amis de l'Ecole Nationale Polytechnique Alger*

# Table des Matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des notations	
Introduction Générale .....	12
Chapitre I.....	14
I. Modélisation Hydrologique .....	14
I.1 Introduction.....	14
I.2 Définition de modèle hydrologique .....	15
I.3 Processus de transformation pluie débit .....	15
I.4 Classification des modèles hydrologiques .....	17
I.4.1 Classification selon le mécanisme.....	18
I.4.2 Classification selon l'approche mathématique.....	19
I.4.3 Classification spatial .....	19
I.4.4 Classification temporelle.....	20
I.5 Développement d'un modèle hydrologique :.....	20
I.5.1 Principe de la construction du modèle .....	21
I.5.2 Principe de calibration du modèle .....	21
I.5.3 Principe de validation du modèle .....	22
I.5.4 Précautions à prendre .....	23
I.6 Variables d'hydro système.....	23
I.7 Critères d'évaluation d'un modèle Pluie-Débit .....	24
I.7.1 Critères graphiques.....	24
I.7.2 Critères numériques.....	25
I.7.3 Intervalles d'appréciation des critères de validation .....	27
I.8 Conclusion .....	28
Chapitre II .....	29
II. Modélisation par les Modèles: GR, Tank Model et Multi-Tank Model	29
II.1 Introduction à la modélisation conceptuelle .....	29
II.2 Les modèles du GR (Génie Rurale).....	29
II.2.1 Principales caractéristiques .....	30
II.2.2 Description du modèles GR4J.....	30
II.3 Tank Model et Multi-Tank Model .....	36

II.3.1	Tank Model simple pour les régions humides : .....	36
II.3.2	Tank Model composé (Multi-Tank) pour les régions arides.....	38
II.3.3	Calibration du Tank Model et Multi-Tank Model .....	41
II.3.4	La formulation Mathématique du Tank Model .....	43
II.3.1	La formulation Mathématique du Multi-Tank Model.....	44
II.4	Conclusion .....	45
Chapitre III .....		46
III.	Couplage des Tank Model et Multi Tank au Filtre de Kalman.....	46
III.1	Introduction .....	46
III.2	Fonctionnement du Filtre de Kalman .....	47
III.2.1	Modèle de Système .....	47
III.2.2	Modèle de Mesure.....	47
III.2.3	Procédure de Filtre de Kalman Standard.....	48
III.2.4	Etapes du Filtre de Kalman .....	49
III.3	Formulation du Tank Model couplé au Filtre de Kalman .....	50
III.3.1	Modèle de Système .....	50
III.3.2	Modèle de Mesure .....	50
III.4	Formulation du Multi-Tank Model couplé au Filtre de Kalman.....	51
III.4.1	Modèle de Système .....	51
III.4.2	Modèle de Mesure .....	51
III.5	Algorithme récursif du couplage .....	52
III.6	Conclusion .....	52
Chapitre IV .....		54
IV.	Présentation des zones d'étude .....	54
IV.1	Présentation du bassin versant de Zardezas : .....	54
IV.1.1	Climat.....	55
IV.1.2	Caractéristiques morphologique du bassin versant .....	56
IV.1.3	Données Utilisées .....	57
IV.2	Présentation du bassin versant de Djemorah : .....	59
IV.2.1	Climat.....	59
IV.2.2	Caractéristiques morphologiques du bassin versant.....	61
IV.2.3	Données Utilisées .....	61
IV.3	Conclusion .....	65
Chapitre V .....		66



V.	Résultats et Discussions.....	66
V.1	Introduction.....	66
V.2	Application au bassin versant de Zardezas .....	66
V.2.1	Modèle GR4J.....	66
V.2.2	Tank Model (TM).....	69
V.2.3	Tank Model Couplé au filtre de Kalman (TM-FK).....	71
V.2.4	Multi-Tank Model (MTM).....	74
V.2.5	Multi-Tank Model couplé au filtre de Kalman (MTM-FK).....	77
V.3	Application au bassin versant de Djemorah .....	80
V.3.1	Modèle GR4J.....	80
V.4	Récapitulation et Conclusion .....	88
	Conclusion Générale.....	90
	BIBLIOGRAPHIE.....	91

# Liste des Figures

Figure I-1: Cycle d'eau et les processus hydrologiques.....	14
Figure I-2: Relations entre les modèles Pluit-Débit selon (Berthier and Toutin 2008).....	17
Figure II-1 : Structure du modèle GR4J .....	31
Figure II-2 : Schéma de représentation générale du Tank Model simple.....	36
Figure II-3: Différents cas du Tank Model.....	37
Figure II-4: Le Tank Model pour l'étude des crues .....	38
Figure II-5 : Structure du Tank Model .....	38
Figure II-6: Schéma de division du Tank Model (Multi-Tank) en zones.....	39
Figure II-7: Structure du Tank Model (Multi-Tank) pour les régions arides .....	40
Figure II-8: Tank Model initial proposé par (Sugawara 1985) .....	41
Figure III-1: Etapes du filtre de Kalman .....	49
Figure III-2: Organigramme du Couplage de Tank Model et Multi-Tank Model au Filtre de Kalman .....	53
Figure IV-1: Situation du bassin versant Zardezas.....	54
Figure IV-2: Température moyenne annuelle environ Zardezas.....	55
Figure IV-3: Données de l'évaporation (mm) de barrage Zardezas .....	58
Figure IV-4: Situation du bassin versant Djemorah.....	59
Figure IV-5: Température moyenne annuelle environ Djemorah .....	60
Figure IV-6: Données de l'évapotranspiration (mm) de bassin Djemorah.....	64
Figure V-1: Evolution du débit en période de calage du modèle GR4J -Zardezas-.....	67
Figure V-2: Evolution du débit en période de validation du modèle GR4J -Zardezas- .....	68
Figure V-3 : Q-Q plot en période de calage du modèle GR4J, -Zardezas- .....	68
Figure V-4 : Q-Q plot en période de validation du modèle GR4J, -Zardezas- .....	68
Figure V-5: Evolution du débit en période de calage Tank Model -Zardezas- .....	70
Figure V-6: Evolution du débit en période de validation du Tank Model -Zardezas- .....	70
Figure V-7: Q-Q plot en période de calage du Tank Model, -Zardezas- .....	71
Figure V-8: Q-Q plot en période de validation du Tank Model, -Zardezas-.....	71
Figure V-9: Evolution du débit en estimation de(TM-FK), -Zardezas- .....	73
Figure V-10: Evolution du débit en prédiction de(TM-FK), -Zardezas-.....	73
Figure V-11: Q-Q plot en estimation (TM-FK), -Zardezas- .....	74
Figure V-12: Q-Q plot en prédiction (TM-FK), -Zardezas-.....	74
Figure V-13: Evolution du débit en période de calage du Multi-Tank Model -Zardezas-... ..	75
Figure V-14: Evolution du débit en période de validation du Multi-Tank Model-Zardezas- .....	76
Figure V-15: Q-Q plot en période de calage du MTM, - Zardezas-.....	76
Figure V-16: Q-Q plot en phase de validation du MTM, - Zardezas-.....	76
Figure V-17: Evolution du débit en estimation de (MTM-FK), -Zardezas-.....	78
Figure V-18: Evolution du débit en prédiction de (MTM-FK), -Zardezas- .....	79
Figure V-19 : Q-Q plot estimation (MTM-FK), -Zardezas-.....	79
Figure V-20 : Q-Q plot en prédiction (MTM-FK), -Zardezas- .....	79
Figure V-21: Evolution du débit en période de calage du modèle GR4J -Djemorah- .....	80
Figure V-22: Evolution du débit en période de validation du modèle GR4J -Djemorah- ...	81
Figure V-23: Q-Q plot en période de calage du modèle GR4J, -Djemorah-.....	81
Figure V-24: Q-Q plot en période de validation du modèle GR4J, -Djemorah- .....	81
Figure V-25: Evolution du débit en période de calage du TM -Djemorah- .....	82
Figure V-26 : Evolution du débit en période de validation du TM -Djemorah- .....	83
Figure V-27 : Evolution du débit en période de calage du MTM -Djemorah-.....	83

Figure V-28: Evolution du débit en période de validation du MTM -Djemorah-.....	83
Figure V-29: Q-Q plot en période de calage du TM, - Djemorah-.....	84
Figure V-30: Q-Q plot en période de validation du TM, - Djemorah-.....	84
Figure V-31: Q-Q plot en période de calage du MTM, -Djemorah-.....	84
Figure V-32: Q-Q plot en période de validation du MTM, -Djemorah-.....	84
Figure V-33 : Evolution du débit en estimation du (TM-FK) -Djemorah-.....	85
Figure V-34 : Evolution du débit en prédiction du (TM-FK) -Djemorah-.....	86
Figure V-35 : Evolution du débit en estimation de (MTM-FK), - Djemorah-.....	86
Figure V-36 : Evolution du débit en prédiction de (MTM-FK), - Djemorah-.....	86
Figure V-37 : Q-Q plot en estimation (TM-FK), - Djemorah-.....	87
Figure V-38 : Q-Q plot en prédiction (TM-FK), - Djemorah-.....	87
Figure V-39 : Q-Q plot en estimation (MTM-FK), - Djemorah-.....	87
Figure V-40 : Q-Q plot en prédiction (MTM-FK), - Djemorah-.....	87
Figure V-41 : Evolution de Débit et Pluie (80-86) - Djemorah-.....	89
Figure V-42 : Evolution de Débit et Pluie (88-92) - Djemorah-.....	89

# Liste des Tableaux

Tableau I.1: Intervalles d'appréciation des critères d'évaluation.....	28
Tableau II.1: Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants. ....	35
Tableau IV.1: Type du climat selon DE MARTONNE .....	56
Tableau IV.2: Indice annuel d'aridité de la station de Zardezas.....	56
Tableau IV.3: Caractéristiques morphologiques bu bassin Zardezas à la station de KHEMAKHEM d'après A.N.R.H.....	56
Tableau IV.4: Les coordonnées de la station hydrométrique de Zardezas.....	57
Tableau IV.5: Caractéristiques statistiques des données hydrométriques - Zardezas-.....	57
Tableau IV.6: Caractéristiques statistiques des données pluviométriques - Zardezas-.....	57
Tableau IV.7: Caractéristiques statistiques des données ETP - Zardezas-.....	58
Tableau IV.8: Indice annuel d'aridité de la station de Djemorah .....	60
Tableau IV.9: Caractéristiques morphologiques bu bassin Djemorah, .....	61
Tableau IV.10: Les coordonnées des stations hydrométriques de Djemorah et Kantara .....	61
Tableau IV.11: Caractéristiques statistiques des données hydrométriques de la station de Djemorah et de la station de Kantara .....	62
Tableau IV.12: Caractéristiques statistiques des données pluviométriques des stations de bassin de Djemorah .....	63
Tableau IV.13: Caractéristiques statistiques des données ETP - Djemorah- .....	64
Tableau V.1: résultats des performances du modèle GR4J (Zardezas).....	67
Tableau V.2: Valeurs des paramètres optimisés du Tank Model, (Zardezas).....	69
Tableau V.3 : Résultats des performances du Tank Model (Zardezas).....	69
Tableau V.4: Valeurs des paramètres optimisés du (TM-FK), (Zardezas) .....	72
Tableau V.5: Résultats des performances du (TM-FK), (Zardezas) .....	72
Tableau V.6: Les proportions des séries de MTM (Zardezas) .....	74
Tableau V.7: Résultats des performances du Multi-Tank Model (Zardezas) .....	75
Tableau V.8: Les proportions des séries de MTM pour bassin de Zardezas.....	78
Tableau V.9: Résultats des performances du (MTM-FK), (Zardezas).....	78
Tableau V.10: Résultats des performances du modèle GR4J (Djemorah).....	80
Tableau V.11 : Résultats des performances des modèles TM et MTM .....	82
Tableau V.12: Résultats des performances des modèles TM-FK et MTM-FK .....	85
Tableau V.13: Récapitulation des performances des modèles développés par le critère NSE .....	88

# Liste des Notations

ANRH: Agence National des Ressources Hydriques

ANBT: Agence National des Barrages et Transfert

ETP: évapotranspiration potentielle

Q-Q plot: Quantile-Quantile plot

NSE: NASH-SUTCLIEFFE

MAE: mean absolute error

MSE: mean squared error

RMSE: root mean squared error

RSR: RMSE-observations Standard deviation Ratio

GR: Génie Rurale

GR4J: Génie Rural à 4 paramètres Journalier

TM: Tank Model

TM-FK: Tank Model couplé au Filtre de Kalman

MTM: Multi-Tank Model

MTM-FK: Multi-Tank Model couplé au Filtre de Kalman

# Introduction Générale

L'eau est une composante fondamentale sur la planète. Elle assure la vie aux êtres vivants, comme il arrive qu'elle les mette en danger par des crues et des inondations. Elle a aussi un rôle fondamental dans le fonctionnement du système climatique.

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.

Le bassin versant, étant une entité hydrologique de production et de concentration des écoulements, plusieurs études ont été élaborées afin de comprendre les processus de génération de ces écoulements. Ainsi, des simulations nécessaires et adéquates ont été établies en remontant jusqu'aux pluies, la cause source. Des modèles ont été créés afin de pouvoir facilement utiliser une représentation simplifiée entre la pluie et le débit.

Les modèles Pluie-Débit de prédiction des écoulements dans les cours d'eau, sont 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.

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

Cependant, la réussite des modèles Pluie-Débit dans la simulation des débits des cours d'eau dépend du bon choix du modèle, du climat de bassin étudié, et de la qualité d'optimisation des paramètres.

Le travail réalisé dans ce mémoire de fin d'études, consiste à proposer 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, le Singapour, ...etc, dans le but de modéliser la relation Pluie – Débit pour les différents climats auxquels est soumis notre pays.

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

Ce mémoire est scindé en cinq chapitres dans lesquels nous avons exposé l'ensemble du travail réalisé.

Le premier chapitre présente la modélisation hydrologique dans son sens global, la classification des modèles et les différents critères d'évaluation.

Dans le deuxième chapitre, les différents modèles hydrologiques utilisés sont décrits, à savoir le modèle GR, le Tank Model et le Multi-Tank Model.

Le Filtre de Kalman, l'algorithme de couplage au Tank Model et au Multi-Tank Model font l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre présente les bassins versants objet de l'étude, leurs caractéristiques climatiques, hydrologiques ainsi qu'une identification des données hydro climatiques utilisées.

Dans le dernier chapitre, sont exposés les résultats parachevés. Des critères d'évaluations numériques et graphiques avec interprétations et commentaires sont présentés.

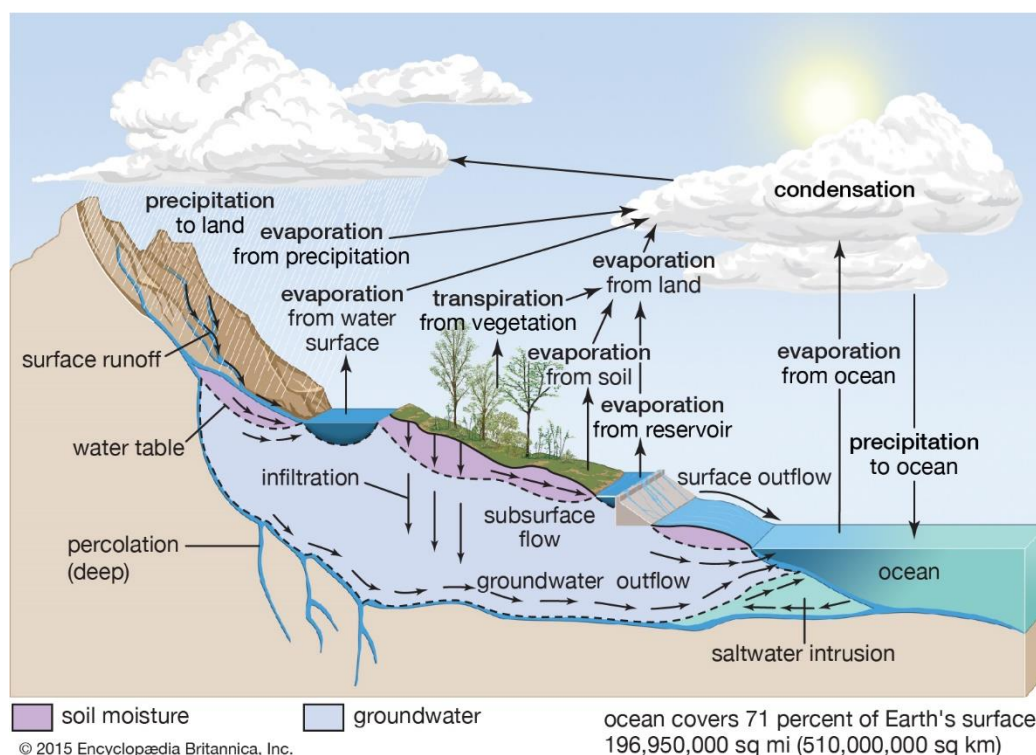
Enfin, une conclusion générale qui récapitule les principaux résultats obtenus, dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, et des perspectives d'amélioration des modèles Pluie-Débit sont proposées.

# Chapitre I

## Modélisation Hydrologique

### I.1 Introduction

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau sur la terre. Elle a pour objet d'étudier les événements hydrologiques, le transport, la distribution, les déplacements et les propriétés des eaux, et leurs relations avec l'environnement.



**Figure I-1: Cycle d'eau et les processus hydrologiques (encyclopaedia Britannica 2015)**

En étudiant les processus hydrologiques (précipitation, fonte des neiges, évaporation, infiltration, percolation, débit liquide, débit solide), on peut analyser et prévoir les événements pour concevoir les projets de gestion et de l'utilisation de la ressource en eau de la région étudiée.

L'analyse et la prévision des données d'évènements nous donnent une idée sur le comportement des eaux. Cette analyse nous amène à développer plusieurs approches afin de mieux comprendre les phénomènes hydrologiques.

Cette connaissance se résume sous le concept de la modélisation hydrologique.



## **I.2 Définition de modèle hydrologique**

Un modèle est défini comme étant une représentation mathématique d'un phénomène, ou en prenant en considération les entités ou les processus élémentaires qui sont censés être à leur origine, ou qui permettent de les reconstituer par combinaison et par assemblages (Amireche 2019).

Un modèle donc, est une image de la réalité, une simplification des phénomènes naturels avec un certain nombre de paramètres.

Son développement repose généralement sur (Ytoui 2012):

- L'objectif du développement de ce modèle.
- Le système observé, sa discrétisation spatiale et temporelle.
- Le choix d'une formulation de la réalité.

La modélisation hydrologique permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat du bassin versant (précipitations et températures) en une série de débits pour plusieurs buts :

- prévisions des crues et des étiages
- prédétermination de débits extrêmes
- protection contre les inondations
- gestion des ressources en eau
- simulation de débits pour reconstituer des séries de débits historiques ou pour combler des lacunes des données
- dimensionnement des ouvrages hydrauliques
- études d'impact de changements climatiques sur les ressources en eau.

## **I.3 Processus de transformation pluie débit**

Le fonctionnement hydrologique des bassins versants reste assez mal connu à cause de la complexité des processus hydrologiques.

Les études de terrain menées depuis une cinquantaine d'années sur de petits bassins de recherches ont permis d'apporter des réponses partielles à deux des questions fondamentales qui se posent à l'hydrologue (Ytoui 2012) :

- Que devient l'eau de pluie ?
- D'où provient l'eau des ruisseaux ?

La représentation la plus connue de la formation des débits, est celle proposée par Horton, d'un partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol après interception éventuelle par la végétation et les dépressions du sol.

Dès que l'intensité de pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, il y a saturation des couches hypodermiques, et l'eau en excès participe au ruissellement direct pour former l'écoulement rapide de crue.

La fraction infiltrée contribue par un écoulement beaucoup plus lent à travers les couches superficielles au débit de base et la recharge des nappes.

Cette théorie nous permet de distinguer quatre cheminements de l'eau des rivières (Ytoui 2012):

- Précipitations directes sur la surface des cours d'eau.
- Ecoulement de surface (ruissellement direct).
- Ecoulement de sub-surface (hypodermique).
- Ecoulement souterrain.

La transformation de la pluie en débit est influencée par un certain nombre de mécanismes intervenant simultanément à différentes échelles spatio-temporelles (Ytoui 2012):

- La précipitation : source principale de tout écoulement superficiel.
- L'évaporation et l'évapotranspiration : première transformation que peut subir une précipitation avant qu'elle n'atteigne la surface du sol.
- L'état hydrique et hydrologique initial du bassin.
- La couverture végétale : qui a une influence sur l'interception de la pluie, en diminuant son intensité.
- La pédologie, l'infiltration et les conditions initiales du sol : conditionnent la réponse hydrologique du bassin.
- Le climat et les saisons : conditionnent l'évolution des phénomènes hydrologiques.
- La morphologie et la topographie du système : influencent les conditions d'écoulement, donc la vitesse d'apparition de la réponse hydrologique et la propagation des crues.

## I.4 Classification des modèles hydrologiques

Plusieurs modèles Pluie-Débit sont apparus après la première conception de modèles en 1850 par Mulvany (Singh 2018), et au vu des objectifs différents de la modélisation, ceux-ci se sont diversifiés, et leur classification peut se faire selon les critères suivants (Amireche 2019; Higy 2000) :

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

Il existe plusieurs classifications des modèles, celle proposée par Clarke en 1973 et Ambroise en 1998 est présentée ci-dessous (Amireche 2019) :

- **Selon l'approche mathématique** : déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables et les relations entre elles.
- **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.
- **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 (éventuellement des sous-bassins, ou qu'il est finement discrétisé en mailles).

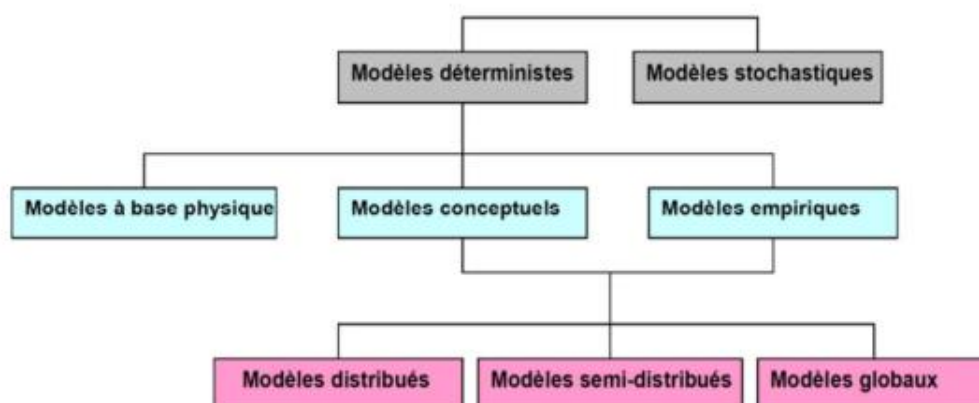


Figure I-2: Relations entre les modèles Pluit-Débit selon (Berthier and Toutin 2008).

### **I.4.1 Classification selon le mécanisme**

Suivant les relations et les algorithmes utilisés pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé 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 (Moulaoum 2016) :

- Les modèles empiriques ou dits « boîte noire ».
- les modèles conceptuels, ou à réservoir.
- les modèles physiques.

#### **i Modèles empiriques**

Ce sont des modèles basés sur les observations de la pluie et du débit d'un bassin versant décrit par une relation purement mathématique (Moulaoum 2016). Celui-ci est traité comme une « boîte noire » sans faire d'hypothèses sur les processus internes qui contrôlent la transformation des précipitations en ruissellement (Moulaoum 2016). Cette catégorie regroupe les modèles fondés sur les fonctions de transfert comme l'hydrogramme unitaire. Relativement simple à mettre en œuvre, ce type de modèle peut être utilisé pour la prévision des crues (Moulaoum 2016).

#### **ii 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 (Moulaoum 2016).

#### **iii Modèles physiques**

Ces modèles s'appuient sur des lois de physiques validés indépendamment du modèle hydrologique dont les paramètres sont issus du terrain. 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 utilisations même dans les bassins versants non-jaugés (Moulaoum 2016).

## **I.4.2 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 Modèles déterministes**

Ce sont des modèles mathématiques dont le résultat est obtenu à travers des relations connues entre les événements et les états du modèle. Ils permettent donc une seule sortie de simulation avec le même ensemble de paramètres d'entrée (Moulaoum 2016).

### **ii Modèles stochastiques**

Les paramètres sont représentés par une distribution statistique, ce qui fait que le modèle donne des intervalles aux variables de sortie du modèle en conséquence des intervalles des variables d'entrée, les conditions aux limites ou les paramètres du modèle (Moulaoum 2016).

## **I.4.3 Classification spatiale**

Selon la distribution spatiale des variables et paramètres du modèle Pluie-Débit, il est possible de classer les modèles en modèles globaux et modèles semi-distribués ou distribués (Moulaoum 2016).

### **i Modèles globaux**

Les modèles globaux traitent le bassin versant comme une entité unique représenté par des variables d'état moyennées sur sa surface (Moulaoum 2016). On applique à leurs entrées la pluie moyenne, la température moyenne, etc.

### **ii 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 autorisées à varier dans l'espace en divisant le bassin en petits sous-bassins qui sont aussi traités comme une seule unité (Moulaoum 2016).

#### **I.4.4 Classification temporelle.**

La classification temporelle différencie les modèles entre ceux qui sont utilisés pour reproduire le comportement du bassin versant pour des événements particuliers (typiquement des épisodes de crues), et ceux qui le font en période continue plus ou moins longue englobant les périodes entre évènements. Nous distinguons ainsi les modèles événementiels et les modèles continus (Amireche 2019).

##### **i Les modèles événementiels (event-based model)**

Ils visent à reproduire la réponse du bassin en termes de débit lors d'un épisode pluvieux. Ce genre de modèle, qui n'est activé qu'au moment des pluies, nécessite de faire très attention aux conditions de saturation et d'humidité initiales qui doivent être fixées d'une façon externe au modèle en fonction des conditions climatiques antécédentes. Ils simulent les événements de précipitations-ruissellement en se concentrant sur l'infiltration et le ruissellement de surface. La calibration des paramètres est facile en nécessitant peu de données. Ils sont très utilisés pour la prévision des crues en temps réel (Amireche 2019).

##### **ii Les modèles continus (continuous-time model)**

Ils permettent de suivre l'évolution des variables d'état et / ou de sortie à plus long terme. Par conséquent, certains processus ne peuvent plus être négligés dans les modèles continus, en particulier l'évaporation et l'évapotranspiration. Ces modèles nécessitent donc des variables de conditions aux limites supplémentaires (précipitations, température, rayonnement solaire, vent, etc.) par rapport aux modèles d'événements pour expliquer l'évolution des stocks d'eau dans le bassin pendant une ou plusieurs années hydrologiques. Ils sont très fragilisés par le risque de lacunes dans les séries temporelles de données, on peut considérer une période de mise en route (warm up) à partir de laquelle le processus hydrologique devient indépendant de la condition initiale (Amireche 2019).

### **I.5 Développement d'un modèle hydrologique :**

Pour toute démarche de modélisation, on identifie avant toute : l'objectif et le cadre de la modélisation, l'hydro système et la nature des phénomènes hydrologiques à varier, les données disponibles pour décrire le milieu et les variables météorologiques d'intérêt. Ceci conditionne les processus hydrologiques à considérer, les résolutions spatiales et temporelles possibles de même que les concepts réalistes et les simplifications raisonnables qu'il est possible d'envisager.

Lorsque le cadre de la modélisation est précisé, la démarche générale à suivre pour le développement du modèle peut se résumer en trois étapes :

- La construction du modèle.
- La calibration ou calage du modèle.
- L'évaluation du modèle ou la validation.

### **I.5.1 Principe de la construction du modèle**

La construction du modèle consiste à effectuer la schématisation de l'hydro système, et à formuler le problème mathématique et numérique, et aux concepts retenus pour la représentation du milieu et des processus pris en compte. Cette construction s'accompagne nécessairement du développement d'un programme informatique, permettant de résoudre les problèmes mathématiques, et numériques associés. La construction du modèle et le développement du code correspondant, se basent souvent sur un système de modélisation existant. Dans ce cas les concepts de la modélisation de même que les outils numériques nécessaires à la résolution du problème mathématique sont réutilisés.

### **I.5.2 Principe de calibration du modèle**

La calibration du modèle vise l'optimisation de la structure du modèle et l'estimation des paramètres du modèle. Certains de ces paramètres sont parfois dérivables de données mesurées ou de cartes thématiques disponibles sur le bassin versant. La plupart des paramètres doivent cependant être déterminé par calage en optimisant l'erreur d'ajustement des variables mesurées à leurs variables observées. Le but du calage est de rapprocher le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé.

#### **i Calage manuel**

Il consiste à déterminer un jeu de paramètres par tâtonnement, qui lui permet d'obtenir un optimum, ce dernier est réalisé 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 prend énormément de temps. 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. Cependant cette méthode peut devenir très vite délicate, voire fastidieuse, si le modèle présente plus de

trois à cinq paramètres. La calibration manuelle est, dans la pratique, l'approche la plus couramment utilisée par les hydrologues (Amireche 2019; Hingray et al. 2009; Ytoui 2012).

## ii **Calage automatique**

Les données simulées, sont rapprochées aux données observées, au moyen d'un programme informatique qui a pour but de minimiser une fonction « objectif » représentant l'erreur du modèle à travers un ajustement itératif représenté par un algorithme d'optimisation, cet algorithme est plus avantageux que le calage manuel en terme de temps, peu d'intervention par l'opérateur, et il ne nécessite pas une expertise par l'opérateur (Amireche 2019; Ytoui 2012).

Cependant, il présente certains inconvénients, d'être influencé par quelques contraintes (Amireche 2019; Ytoui 2012):

- Indépendance des paramètres (autocorrélation) : le changement de valeur d'un paramètre peut être compensé par la modification d'autres paramètres.
- La sensibilité considérable de fonctions « objectif ».
- Le choix des extremums locaux sur plusieurs zones.
- Les paramètres peuvent prendre des valeurs qui n'ont pas un sens physique.

## iii **Calage semi-automatique**

Dans l'idéal, la calibration d'un modèle hydrologique est très recommandée d'être du type semi-automatique, c'est-à-dire, utiliser de façon combinée des méthodes de calage automatiques et manuelles. Cette méthode débute par un tâtonnement pour s'approcher d'une zone de convergence, ensuite on donne la main à l'optimisateur automatique local (ex : solveur d'Excel), pour chercher l'optimum dans cette zone, on répète cette manipulation pour avoir plusieurs optimums. A la fin on choisit le max des optimums physiquement accepté (Hingray, Picouet and Musy 2009).

### **1.5.3 Principe de validation du modèle**

L'évaluation concerne les différents critères de qualité que doit respecter le modèle.

- La validité signifie que la représentation du milieu et des processus hydrologiques par le modèle, est convaincante ou acceptable. La validation est généralement effectuée en comparant, sur la base de critères choisis, et pour diverses variables hydrologiques, les données observées et les résultats obtenus par simulation en sortie du modèle (Hingray, Picouet and Musy 2009). La validation consiste à s'assurer que le modèle, une fois calibré,



réagit correctement à des variations des données d'entrée autres que celles utilisées pour la calibration du modèle.

- Elle permet également de vérifier la sensibilité du système aux changements à analyser afin de s'assurer que les écarts entre les résultats obtenus et observés sont raisonnables (Amireche 2019; Ytoui 2012).

#### **1.5.4 Précautions à prendre**

Pour assurer sa tâche de calibration et de validation du modèle, le modélisateur a des précautions et des contraintes à prendre en considération :

- Il doit s'assurer que les mesures de pluie, de débit ou d'évapotranspiration soient de bonne qualité, pour éviter que le comportement du modèle suit une logique complètement erronée, ce qui conduit à des outputs erronés ou même à des difficultés liées à la calibration.
- Plus les échantillons représentent une large gamme d'événements différents, plus le modèle sera représentatif du fonctionnement du bassin versant.
- Le choix des périodes de mise en route, de calibration, et de validation est crucial, en particulier, dans le cas de l'insuffisance de la longueur de l'échantillon.
- Les paramètres calibrés dépendants de la période choisie, ne donnent pas un jeu de paramètres représentatif des caractéristiques du bassin versant.
- Le choix du type de calage du modèle (manuel ou automatique), et l'expertise de l'opérateur sont importants.
- La fonction objectif doit être choisie pour qu'elle résume l'information de l'erreur entre les simulations et les observations adéquatement (Amireche 2019).

### **1.6 Variables d'hydro système**

La variable du système qui conditionne principalement le cycle hydrologique du bassin versant est la précipitation à différents pas de temps. La série des précipitations est constituée de pluies totales mensuelles, journalières ou horaires du modèle étudié.

En pratique, il faut prendre en considération la moyenne de toutes les stations pluviométriques existantes sur l'hydro system étudié. Cependant, il est rare de trouver toutes les 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 (Ytoui 2012).

La seconde variable, qui conditionne le cycle hydrologique du bassin versant, représente une perte du système, c'est l'évapotranspiration potentielle (ETP) (Ytoui 2012).

L'ETP mensuelle peut être calculée par la méthode de Thornthwaite à partir de la température moyenne du mois de façon relativement précise.

L'ETP journalier peut être estimé par la formulation d'Oudin en utilisant la température moyenne journalière et la latitude (en degré). Cette méthode a donné beaucoup plus d'efficacité aux modèles Pluie-Débit.

L'ETP horaire est considérée comme nulle, suite à la quantité négligeable d'évaporation, pour un pas de temps court.

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 non précise, par des appareils spécifiques, ou bien calculée à partir des hauteurs limnimétriques observées, projetées sur des courbes de tarage de chaque station hydrométrique (Ytoui 2012).

La série de débits est constituée du cumul des lames ruisselées par pas de temps. L'utilisation de la pluviométrie totale, par pas de temps, génère une lame ruisselée totale, pour le même pas de temps. Le débit moyen mensuel simulé peut être calculé par la suite (Ytoui 2012).

## **I.7 Critères d'évaluation d'un modèle Pluie-Débit**

L'estimation des performances et de robustesse de la simulation des débits d'un bassin est une tâche très délicate dans l'étude d'un modèle Pluie-Débit. Toutefois, la qualité de simulation nécessite la comparaison entre les débits simulés par le modèle et les débits observés.

Pour cela, on utilise un échantillon, qui consiste à caler le modèle sur une période donnée (période de calibration), et de le tester sur une autre période (période de validation), pour juger son adaptabilité face à des situations dans lesquelles il est censé fonctionner.

### **I.7.1 Critères graphiques**

L'évaluation graphique nous donne un premier aperçu sur la tendance de la variable simulée par rapport à la variable observée. Elle permet de détecter certaines anomalies mal détectées par les critères numériques. Elle permet un jugement visuel, et donc d'apprécier la qualité du modèle à reproduire l'allure des événements observés.

### i Courbe d'évolution des variables :

On compare l'allure de la courbe des débits simulés ( $Q_{sim}$ ) à celle des débits observés ( $Q_{obs}$ ), tracés dans le même graphe pour apprécier la différence entre les valeurs simulées et observées.

### ii Courbe de corrélation (Q - Q plot):

On représente les couples des points correspondants aux débits simulés ( $Q_{sim}$ ) et observés ( $Q_{obs}$ ), et on évalue le nuage de points obtenu, s'il est bien réparti de part et d'autre de la première bissectrice, on peut conclure que le modèle développé est parfait, sinon il sera considéré comme médiocre.

## I.7.2 Critères numériques

Pour juger l'efficacité des modèles, plusieurs critères numériques ont été développés dans le domaine de la modélisation hydrologique. Ceux-ci font la comparaison entre les débits simulés et observés (Ytoui 2012).

Les critères globaux d'évaluation des modèles de simulation des débits diffèrent sur trois points essentiels (Ytoui 2012):

- la forme analytique de l'erreur (quadratique, absolue, cumulée...)
- la forme de la variable cible (transformée ou non)
- le choix d'un modèle de référence (pour avoir une mesure relative)

### i Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination  $R^2$ , évalue la relation linéaire existant entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Il est défini comme étant le carré du coefficient de corrélation :

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{obs}^{moy})(Q_{sim}^i - Q_{sim}^{moy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{obs}^{moy})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}^i - Q_{sim}^{moy})^2}} \right)^2 \quad (I.1)$$

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

On dit que les deux séries sont fortement corrélées en se rapprochant de plus en plus à 1.  
 $0 < R^2 < 1$

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.

## ii Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE

Proposé par Nash et Sutcliffe en 1970, c'est un critère, adimensionnel qui est considéré comme la base des critères de performance des modèles Pluie-Débit. Il est défini par :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{obs\ moy})^2} \quad (I.2)$$

Le NSE varie entre  $-\infty$  et 1. Un NSE =1 représente une simulation parfaite, et un NSE < 0 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. Ce qui conduit à la surestimation de la performance du modèle lors des pics et sa sous-estimation lors des étiages. Le NSE n'indique pas les sous estimations ou les surestimations des modèles.

## iii Les indices d'erreurs

### ➤ MAE, MSE, RMSE

L'erreur moyenne absolue (MAE), l'erreur quadratique moyenne (MSE), et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), sont les indices d'erreurs les plus utilisés. Ils sont intéressants car ils indiquent l'erreur dans les unités des variables étudiées. Une valeur de « 0 » de ces indices indique que le modèle simule bien la variable étudiée.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{sim}| \quad (I.3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2 \quad (I.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad (I.5)$$

### ➤ RSR

Le RSR est l'indice d'erreur le plus utilisé en modélisation Pluie-Débit. Lorsque la valeur de ce dernier est petite, le modèle est plus performant.

Un critère d'évaluation statistique a été développé par (Singh et al, 2004).

$$RSR = \frac{RMSE}{ST\ DEV\ obs} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{obs\ moy})^2}} \quad (I.6)$$

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.

### ➤ Percent Bias (PBIAS)

Il mesure la tendance moyenne des valeurs simulées (plus grande ou plus petite) par rapport aux valeurs observées, donc estime la sous/surestimation de la simulation. Sa valeur optimale est le «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.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \quad (I.7)$$

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.

## I.7.3 Intervalles d'appréciation des critères de validation

Dans notre étude, on va utiliser l'évaluation graphique et l'évaluation numérique, les indices d'erreurs et les critères adimensionnels plus précisément, jugés les plus performants pour évaluer les modèles hydrologiques : le R<sup>2</sup>, NSE, PBIAS, et RSR.

En fonction de la valeur de ces critères, on peut définir les performances des modèles Pluie-Débit aux pas de temps retenus.

Les intervalles d'appréciation des critères d'évaluation sont mis en évidence par (N. Moriasi et al. 2007) confirmés et complétés par (N. Moriasi et al. 2015). Pour la modélisation du ruissellement de surface (Tableau I.1).

**Tableau I.1: Intervalles d’appréciation des critères d’évaluation**  
(N. Moriasi et al. 2007, 2015)

Indice de Performance	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS (%)	RSR
<b>Très bon</b>	$R^2 > 0.85$	$NSE > 0.80$	$ PBIAS  < 5$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
<b>Bon</b>	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$5 \leq  PBIAS  < 10$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
<b>Satisfaisant</b>	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$10 \leq  PBIAS  < 15$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
<b>Insatisfaisant</b>	$R^2 \leq 0.60$	$NSE \leq 0.50$	$ PBIAS  \geq 15$	$RSR > 0.70$

## I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le contexte général de la modélisation hydrologique, et plus précisément la modélisation Pluie-Débit, qui met en valeur la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit dans le bassin versant.

On a découvert les enjeux et les objectifs de la modélisation hydrologique, on a catégorisé ces modèles sur plusieurs classements, et à la fin de ce chapitre on a donné quelques critères d’évaluation de performance des modèles Pluie-Débit qui seront utilisés dans les chapitres suivants.

# Chapitre II

## Modélisation par les Modèles: GR, Tank Model et Multi-Tank Model

### II.1 Introduction à la modélisation conceptuelle

Les modèles conceptuels et empiriques journaliers sont nombreux et très utilisés en hydrologie. Ils ont été développés pour estimer les débits à l'exutoire dans les moyens et petits bassins versants 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. Cependant, ces modèles présentent des particularités liées aux caractéristiques hydrologiques et climatiques des pays où ils ont été conçus, et 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 (Moulahoum 2016):

- 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;
- On recherche les structures les plus générales possibles;
- Le test en calage-contrôle, sur de grands échantillons de bassins, est le mode d'évaluation standard des modèles;

Pour notre cas d'étude, on s'intéressera au modèle « GR » et aux modèles conceptuels à réservoirs « Tank Model » et « Multi-Tank Model ».

### II.2 Les modèles du GR (Génie Rural)

Au début des années 1980 le **Cemagref** a commencé à développer des modèles hydrologiques (du Génie Rural GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire. Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont

soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (Perrin et al. 2007).

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). (Amireche 2019; Perrin, Michel and Andréassian 2007)

### II.2.1 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), journalier (GR4J) et horaire (GR3H). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

Dans ce qui suit, 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, Michel and Andréassian 2007).

### II.2.2 Description du modèles GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle Pluie-Débit global à quatre paramètres. Il 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



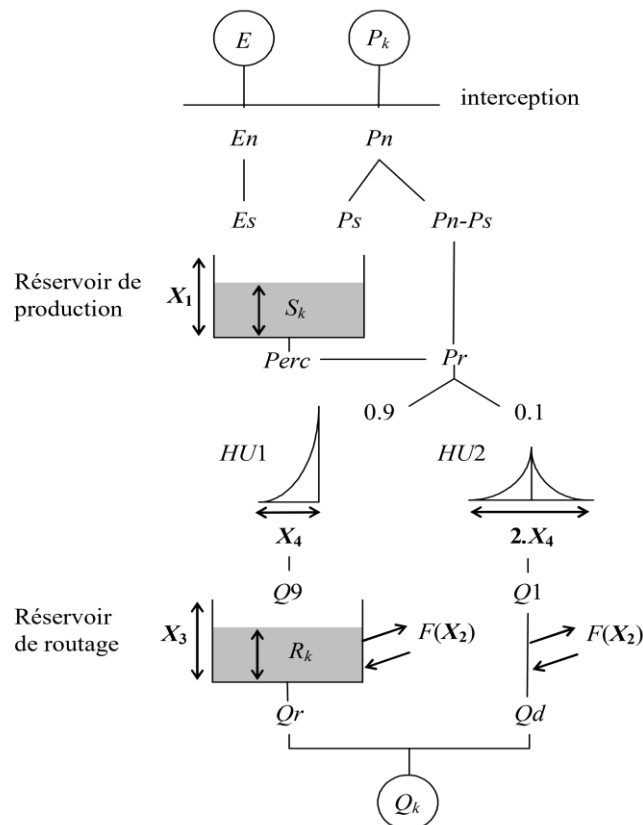
simulation Pluie-Débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement qui ont permis d'améliorer progressivement ses performances. 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 (Perrin, Michel and Andréassian 2007).

### i La formulation mathématique du modèle GR

Un schéma de la structure est donné à la Figure II-1.  $P_k$  est la pluie journalière du jour  $k$  et  $E$  l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.



**Figure II-1 : Structure du modèle GR4J (Perrin, Michel and Andréassian 2007)**

➤ 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

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ alors } P_n = P_k - E \text{ et } E_n = 0 \quad (\text{II.1})$$

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

• 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 :

$$P_s = \frac{X_1 \left( 1 - \left( \frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (\text{II.3})$$

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 :

$$E_s = \frac{S_k \left( 2 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left( 1 - \frac{S_k}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \quad (\text{II.4})$$

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

$$S' = S_k + P_k - E_s \quad (\text{II.5})$$

• Percolation :

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

$$Perc = S' \left[ 1 - \left( 1 + \left( \frac{4}{9} \cdot \frac{S'}{X_1} \right)^4 \right)^{-\frac{1}{4}} \right] \quad (\text{II.6})$$

Ensuite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad (\text{II.7})$$

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

$$Pr = Perc + (P_n - P_s) \quad (\text{II.8})$$

➤ **Fonction transfert**

• **Hydrogrammes unitaires :**

$Pr$  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:

$$\text{Pour } t \leq 0 \quad SH1(t) = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Pour } t \geq X_4 \quad SH1(t) = 1 \quad (\text{II.11})$$

SH2 est définie de façon similaire par:

$$\text{Pour } t \leq 0 \quad SH2(t) = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X_4 \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Pour } X_4 < t < 2X_4 \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Pour } t \geq 2X_4 \quad SH2(t) = 1 \quad (\text{II.15})$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par:

$$\begin{cases} UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \\ UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \end{cases}, \text{ où } j \in N \quad (\text{II.16})$$

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 :

$$Q9(k) = 0.9 \sum_{j=1}^l UH1(j).Pr(k - j + 1) \quad (\text{II.17})$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^m UH2(j).Pr(k - j + 1) \quad (\text{II.18})$$

Où  $l = E(X_4) + 1$ , et  $m = E(2X_4) + 1$ .

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

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \left( \frac{R_k}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (\text{II.19})$$

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  $F$  :

$$R' = \max(0 ; R_k + Q9(k) + F) \quad (\text{II.20})$$

Il se vidange ensuite en une sortie  $Qr$  donnée par :

$$Qr = R' \left[ 1 - \left( 1 + \left( \frac{R'}{X_3} \right)^4 \right)^{-\frac{1}{4}} \right] \quad (\text{II.21})$$

Le niveau dans le réservoir devient:

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad (\text{II.22})$$

- Ecoulement total :

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

$$Qd = \max(0 ; Q1(k) + F) \quad (\text{II.23})$$

Le débit total  $Q$  est alors donné par :

$$Q_k = Qr + Qd \quad (\text{II.24})$$

## ii 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.1: Valeurs des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.(Perrin, Michel and Andréassian 2007)**

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.3 Tank Model et Multi-Tank Model

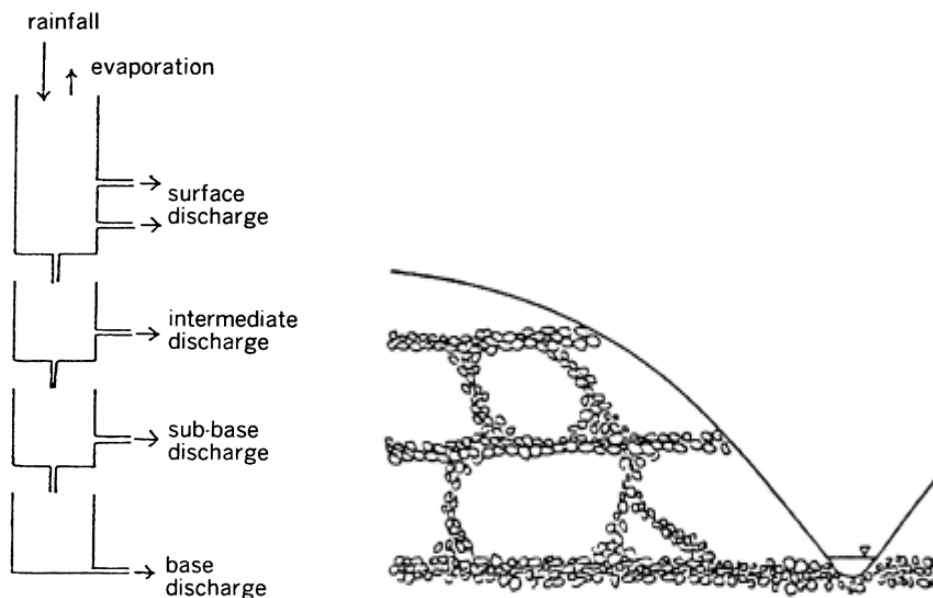
Les Tank Models ont été développés par Masami Sugawara (1979, 1995). Ils sont populaires au Japon, en Corée du Sud, et plusieurs autres pays de l'Asie, et sont utilisés pour les prévisions des crues, la modélisation des bassins hydrographiques, etc.

### II.3.1 Tank Model simple pour les régions humides :

Le Tank Model est très simple, composé en général, de quatre réservoirs posés verticalement en série, avec des sorties latérales où les débits sont 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, la sortie du troisième réservoir en tant que ruissellement sous basique (sub-base), et la sortie du quatrième réservoir en tant qu'écoulement de base (base flow), comme le montre la Figure II-2.

Les précipitations entrent dans le réservoir supérieur et l'évaporation est soustraite de ce dernier, s'il est vide, l'évaporation est soustraite du deuxième réservoir, si le premier et le deuxième sont vides, l'évaporation est soustraite du troisième réservoir, etc. (Sugawara 1985).



**Figure II-2 : Schéma de représentation générale du Tank Model simple (Sugawara 1985)**

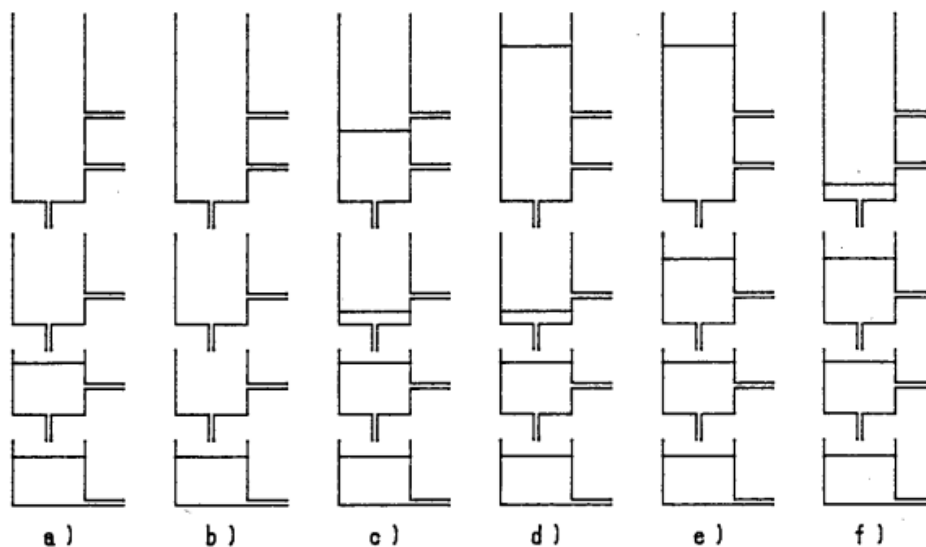
Malgré ses simples perspectives, le comportement du Tank Model n'est pas tellement simple.

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 II-3a ou la Figure II-3b.

Dans le cas de la Figure II-3a, la décharge diminuera très lentement, et dans le cas de la Figure II-3b la décharge sera presque constante.

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 Figure II-3e et II-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 II-3e. Lorsque la pluie s'arrête, l'eau du réservoir supérieur se déplace rapidement et le Tank Model prendra la forme de la Figure II-3f. Ensuite, le débit de sortie du deuxième réservoir diminuera lentement, formant la typique pente descendante de l'hydrogramme suivant une grande décharge (Sugawara 1985).



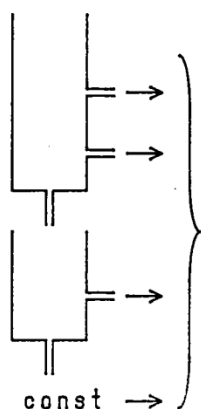
**Figure II-3: Différents cas du Tank Model (Sugawara 1985)**

Le Tank Model peut représenter de nombreux types d'hydrogrammes en raison de sa structure non linéaire, causée par les hauteurs des sorties latérales de chaque réservoir (à l'exception du réservoir le plus bas).

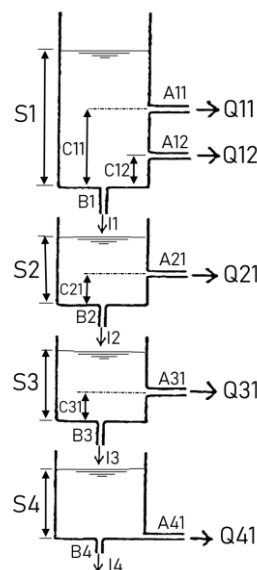
Le Tank Model décrit ci-dessus est appliqué pour analyser les décharges journalières à partir des précipitations journalières et d'évaporation. Le concept de la perte initiale de précipitation n'est pas nécessaire, car son effet est inclus dans la structure non-linéaire du Tank Model.

Pour l'analyse des crues, le Tank Model indiqué à la Figure II-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 II-4: Le Tank Model pour l'étude des crues (Sugawara 1985)**



**Figure II-5 : Structure du Tank Model (Sugawara 1985)**

Les paramètres du Tank Model :

Ce sont les paramètres du modèle qui vont être déterminés dans la phase de calage. Dans notre cas d'étude le Tank Model comporte 17 paramètres à initialiser :

- Les coefficients de débit des orifices latéraux :  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{31}$ ,  $A_{41}$  ;
- Les coefficients d'infiltration :  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_4$  ;
- Le stockage dans les réservoirs :  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  ;
- Les hauteurs des sorties latérales :  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{31}$ .

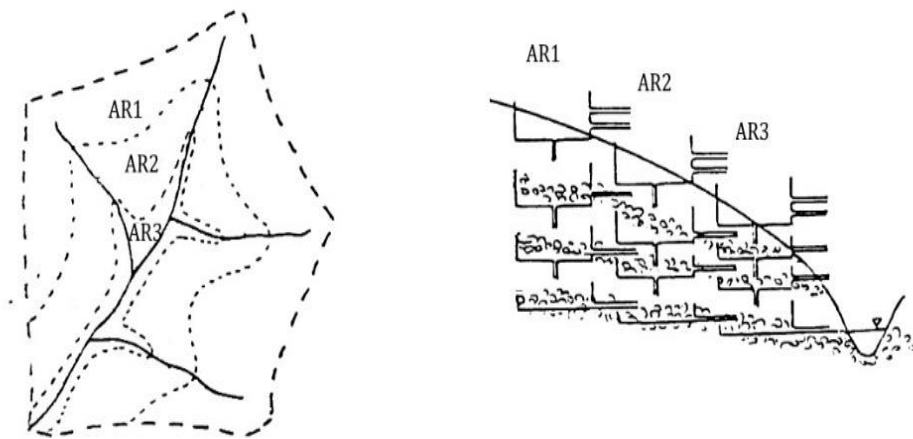
### II.3.2 Tank Model composé (Multi-Tank) pour les régions arides

Dans les régions arides où l'évapotranspiration annuelle est supérieure à la précipitation annuelle, les zones montagneuses deviennent sèches dans une saison sèche parce que l'eau souterraine se déplace vers le bas gravitairement. D'autre part, les zones basses au long de la rivière restent humides car elles reçoivent des eaux souterraines venant des zones supérieures. Lorsque la saison humide revient et donc il pleut, un écoulement de surface se produit à partir des zones le long de la rivière, car elles sont encore humides. Dans les zones sèches de la montagne, cependant, l'eau de pluie est absorbée en l'humidité du sol et donc il n'y aura pas de ruissellement de surface (Sugawara 1985).



Pendant la saison humide, le pourcentage de zone humide augmente avec le temps et le ruissellement de surface augmente. Contrairement à la saison sèche, le pourcentage de zone sèche augmente avec le temps et le ruissellement diminue. Et comme l'évaporation ne se produit pas à partir des zones sèches, l'évaporation actuelle de tout le bassin est plus petite que l'évaporation potentielle. Par conséquent, même si l'évaporation potentielle annuelle est supérieure à la précipitation annuelle, il y a la possibilité du ruissellement (Sugawara 1985).

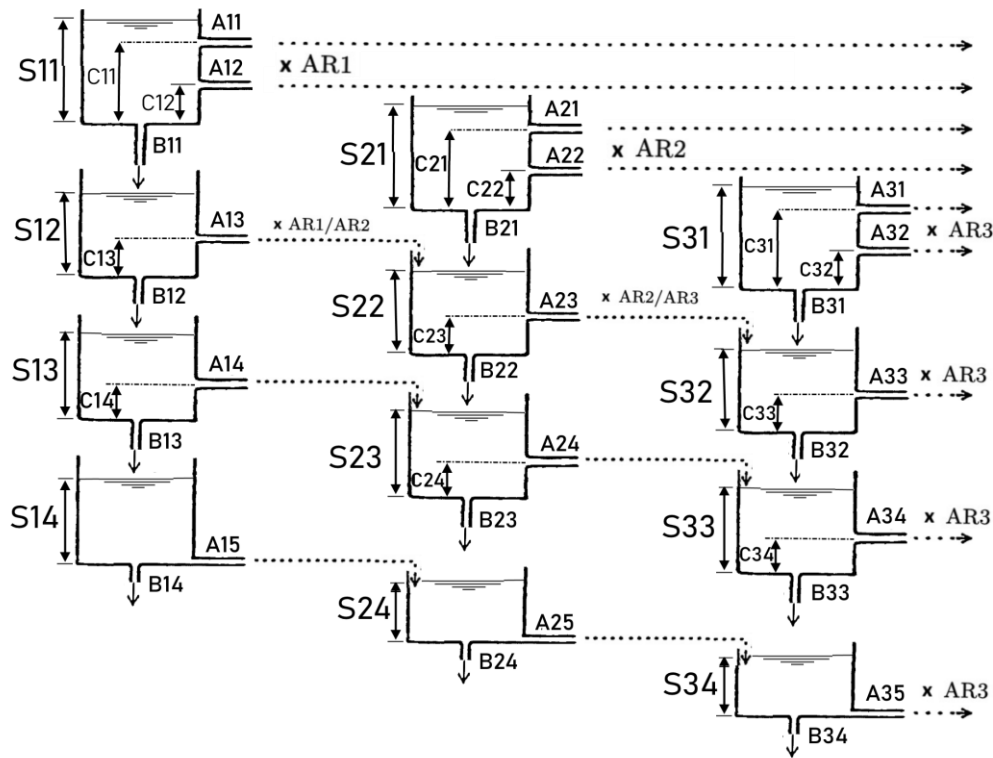
Suivant ces considérations, on divise le bassin en zones, par exemple, en trois zones représentées dans la Figure II-6. Les surfaces proportionnelles des zones sont AR1, AR2 et AR3, où  $AR1 + AR2 + AR3 = 1$ , on applique un Tank Model de la même structure à chaque zone comme dans les Figure II-6 (Sugawara 1985).



**Figure II-6: Schéma de division du Tank Model (Multi-Tank) en zones (Sugawara 1985)**

Dans ce modèle, on suppose que lorsque le ruissellement de surface se produit dans une zone, les zones basses sont déjà humides et le ruissellement de surface du réservoir supérieur de chaque zone va directement au canal de la rivière.

Pour le deuxième, le troisième et le quatrième réservoir, cependant, le débit de sortie passe au réservoir correspondant de la prochaine zone basse, comme le montre la Figure II-7, car chaque réservoir correspond à une couche d'eau souterraine (Sugawara 1985).



**Figure II-7: Structure du Tank Model (Multi-Tank) pour les régions arides**

En effet, l'entrée et la sortie à partir du modèle (précipitation et évaporation) sont mesurées et calculées en unités de profondeur d'eau (mm), mais pour transférer l'eau d'une zone à l'autre on doit convertir en unités de volume, en multipliant les sorties de chaque réservoir, par le coefficient de proportion de surface  $AR_i$ . Les sorties des réservoirs de la première zone, sont transférées en volumes dans les réservoirs correspondants de la deuxième zone, et reconvertis en unités de profondeur en divisant par le coefficient de proportion de surface  $AR_{i+1}$ . Par conséquent, les débits en sorties des réservoirs basses de la première zone sont multipliés par  $AR_i/AR_{i+1}$ , avant qu'ils ne soient mis dans les réservoirs de la deuxième zone. Les sorties des réservoirs supérieurs, sont multipliés juste par le coefficient de proportion de surface  $AR_i$  et déversées directement au canal de la rivière (Sugawara 1985).

Dans la dernière zone, toutes ses sorties vont directement au canal de la rivière, après avoir été multipliées par le coefficient de proportion de surface  $AR_i$ . Le système de calcul est représenté sur la Figure II-7. Le facteur important dans ce type de modèle à réservoirs (Tank Model) est le coefficient de proportion de surface de la zone,  $AR_1: AR_2: AR_3$ . On peut les déterminer à partir de plusieurs critères (classes de pente, classes des hauteurs, végétation,

géologie du terrain, etc.). S'il n'y a pas assez de données pour déterminer ces coefficients, on doit les avoir par la méthode Trial and Error (Sugawara 1985).

### II.3.3 Calibration du Tank Model et Multi-Tank Model

Il existe trois méthodes pour calibrer le modèle Tank, la première manuelle, et se fait par la méthode Trial & Error, la deuxième automatique par un programme numérique et la troisième semi-automatique est une combinaison de méthodes manuelles avec un programme automatique.

Il faut noter que le Multi-Tank Model et une série de Tank Models, de ce fait le principe de calibration et le même.

#### i Calibration manuelle (Trial and Error)

Le Tank Model est non linéaire, de ce fait, l'hydrologue ne peut pas utiliser les mathématiques pour sa calibration, et la seule solution est d'utiliser la méthode par tâtonnement (Trial & Error) du calcul numérique qui nécessite un travail long et fastidieux (Sugawara 1985).

Habituellement, la calibration du Tank Model ne donne pas de bons résultats aux premiers tâtonnements, et donc on peut apporter des modifications audacieuses et importantes aux paramètres du modèle. Après plusieurs essais, le résultat devrait devenir assez bon.

#### Le modèle initial

Pour le premier essai, on suppose un Tank Model initial proposé par (Sugawara 1985) comme le montre la Figure II-8.

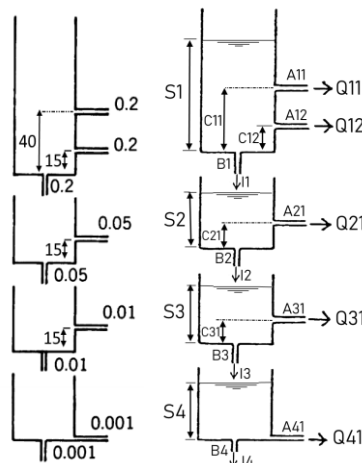


Figure II-8: Tank Model initial proposé par (Sugawara 1985)

### Initialisation des 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 de réservoir supérieur,  $C12 = 15$ , et est déterminée à partir de cette expérience (Sugawara 1985).

On sait aussi que quand il pleut environ 50 mm, la décharge augmentera considérablement. La position de la sortie latérale haute du réservoir supérieur,  $C11 = 40$ , 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 (Sugawara 1985).

Dans le Tank Model de la Figure II-8, les hauteurs des sorties latérales du deuxième et du troisième réservoir sont fixées  $C21 = C31 = 15$ . Celles-ci sont déterminées comme étant similaires à  $C12 = 15$ , mais sans un bon raisonnement, car  $C21$  et  $C31$  ne sont pas aussi efficaces que  $C12$  (Sugawara 1985).

## ii Calibration automatique

La calibration automatique est effectuée automatiquement par un programme numérique. Ce programme proposé par Sugawara est basé sur la méthode par tâtonnement (Trial & Error) exécutée par ordinateur.

Les grandes lignes du programme sont les suivantes (Sugawara 1979) :

- 1) Commencer avec un modèle initial.
- 2) Diviser la période entière en cinq sous-périodes, chaque sous-période correspond à l'une des cinq composantes de ruissellement.
- 3) Comparer l'hydrogramme calculé avec l'hydrogramme observé pour chaque sous-période, et définir les critères du volume et de la forme hydrographique de la sous-période.
- 4) Ajuster les coefficients du modèle de réservoir en fonction des deux critères.
- 5) L'hydrogramme dérivé du modèle de réservoir ajusté, est comparé avec l'observé avec un critère d'évaluation.
- 6) Le prochain essai est effectué, en utilisant le modèle ajusté.
- 7) La procédure d'étalonnage automatique se termine généralement après plusieurs itérations de quelques essais, et le modèle qui donne le meilleur critère d'évaluation est considéré comme le meilleur modèle.

### iii Calibration semi-automatique

La calibration semi-automatique est une procédure d'accompagnement par un programme numérique. Il existe des programmes qui convergent vers des optimums locaux suivant le point de départ qui est introduit par l'utilisateur.

Pour la calibration, on débute par le Tank Model initial, après, on manipule les paramètres par tâtonnement, pour s'approcher d'une zone de convergence, ensuite, on donne la main à l'optimisateur automatique local (ex : Solveur d'Excel) pour chercher l'optimum dans cette zone. On répète cette manipulation pour avoir plusieurs optimums. Après plusieurs itérations, le modèle qui donne le meilleur critère d'évaluation avec des paramètres physiquement acceptables, est considéré comme le meilleur modèle (Hingray, Picouet and Musy 2009).

#### II.3.4 La formulation Mathématique du Tank Model

Supposant qu'au temps  $t$ , les stockages dans chaque réservoir sont respectivement  $S1(t)$ ,  $S2(t)$ ,  $S3(t)$ ,  $S4(t)$ , et les débits sortant de chaque réservoirs sont  $Q11(t)$ ,  $Q12(t)$ ,  $Q21(t)$ ,  $Q31(t)$ ,  $Q41(t)$  et la somme de ces cinq débits représente le débit ruisselé  $Q(t)$  au temps  $t$ . L'infiltration à partir de chaque réservoir est  $I1(t)$ ,  $I2(t)$ ,  $I3(t)$ , et  $I4(t)$ , et  $P(t)$  et  $ETP(t)$  représentent la pluie et l'évapotranspiration au temps  $t$ .

On calcule le stockage  $S$  dans chaque réservoir au temps  $t + 1$  :

$$S1(t + 1) = S1(t) - ETP(t + 1) + P(t + 1) - Q11(t) - Q12(t) - I1(t) \quad (\text{II.25})$$

$$S2(t + 1) = S2(t) - Q21(t) + I1(t) - I2(t) \quad (\text{II.26})$$

$$S3(t + 1) = S3(t) - Q31(t) + I2(t) - I3(t) \quad (\text{II.27})$$

$$S4(t + 1) = S4(t) - Q41(t) + I3(t) - I4(t) \quad (\text{II.28})$$

L'infiltration à partir de chaque réservoir au temps  $t$  :

$$I1(t) = S1(t) \times B1 \quad (\text{II.29})$$

$$I2(t) = S2(t) \times B2 \quad (\text{II.30})$$

$$I3(t) = S3(t) \times B3 \quad (\text{II.31})$$

$$I4(t) = S4(t) \times B4 \quad (\text{II.32})$$

Pour calculer le débit sortant de chaque sortie latérale nous allons établir une relation entre le stockage et la hauteur de l'orifice :

$$Q_{11}(t) = \begin{cases} A_{11} \times (S_1(t) - C_{11}) & \text{Si } S_1(t) > C_{11} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

$$Q_{12}(t) = \begin{cases} A_{12} \times (S_1(t) - C_{12}) & \text{Si } S_1(t) > C_{12} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

$$Q_{21}(t) = \begin{cases} A_{21} \times (S_2(t) - C_{21}) & \text{Si } S_2(t) > C_{21} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$$Q_{31}(t) = \begin{cases} A_{31} \times (S_3(t) - C_{31}) & \text{Si } S_3(t) > C_{31} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$Q_{41}(t) = A_{41} \times S_4(t) \quad (\text{II.37})$$

Le débit total ruisselé dans le cours d'eau au temps t est :

$$Q(t) = Q_{11}(t) + Q_{12}(t) + Q_{21}(t) + Q_{31}(t) + Q_{41}(t) \quad (\text{II.38})$$

### II.3.1 La formulation Mathématique du Multi-Tank Model

Pour le Multi-Tank Model, on suit le même raisonnement que celui du Tank Model avec des petits changements, en suivant la structure comme l'indique la Figure II-7.

Le calcul des débits latéraux et des débits d'infiltration est identique à celui du Tank Model. Sauf le stockage change à cause du transfert, et le débit total.

Le stockage dans chaque réservoir au temps t + 1 :

Pour la 1ère série, ça sera exactement comme les formule du Tank Model.

On prend comme notation *i* pour indiquer la série (zone).

$$S_{i,1}(t + 1) = S_{i,1}(t) - ETP(t + 1) + P(t + 1) - Q_{i,1}(t) - Q_{i,2}(t) - I_{i,1}(t) \quad (\text{II.39})$$

$$S_{i,2}(t + 1) = S_{i,2}(t) - Q_{i,3}(t) + I_{i,1}(t) - I_{i,2}(t) + Q_{i-1,3}(t) \cdot \frac{AR_{i-1}}{AR_i} \quad (\text{II.40})$$

$$S_{i,3}(t + 1) = S_{i,3}(t) - Q_{i,4}(t) + I_{i,2}(t) - I_{i,3}(t) + Q_{i-1,4}(t) \cdot \frac{AR_{i-1}}{AR_i} \quad (\text{II.41})$$

$$S_{i,4}(t + 1) = S_{i,4}(t) - Q_{i,5}(t) + I_{i,3}(t) - I_{i,4}(t) + Q_{i-1,5}(t) \cdot \frac{AR_{i-1}}{AR_i} \quad (\text{II.42})$$

Le débit total ruisselé dans le cours d'eau au temps t est :

$$Q(t) = (Q_{11} + Q_{12})AR_1 + (Q_{21} + Q_{22})AR_2 + \left( \sum_{j=1}^5 Q_{3,j} \right) AR_3 \quad (\text{II.43})$$

## II.4 Conclusion

Les Modèles conceptuels présentés, sont des modèles de construction simple, malgré les nombreux paramètres à caler dans le Tank Model et Multi-Tank Model. En effet, cette simplicité a contribué énormément au développement de nombreux modèles conceptuels, pour différentes régions humides et arides.

Le Tank Model, développé par Sugawara (1979, 1995) contient quatre réservoirs, et prend en considération les échanges atmosphériques vers l'extérieur. Il est adapté pour les régions humides, arides et semi-arides.

Contrairement à la grande majorité des modèles conceptuels, le modèle GR prend les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin comme indispensables à tous les pas de temps (Amireche 2019).

Notons également que le Tank Model et Multi-Tank ont été testés sur des bassins versants à des contextes climatiques très variés, en Asie (Japon, Indonésie, Corée du sud, Singapour, etc.), en Afrique (Congo, Côte d'Ivoire, et République Centrafricaine), mais aussi dans d'autres pays (France, Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, etc.) (Amireche 2019).

Applicables donc à l'échelle d'un bassin, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km<sup>2</sup> à plus de 100 000 km<sup>2</sup> (Amireche 2019).

# Chapitre III

## Couplage des Tank Model et Multi Tank au Filtre de Kalman

### III.1 Introduction

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 mathématiques utilisés dans le domaine de la transformation Pluie-Débit depuis 1980 (Amireche 2019).

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 (Amireche 2019).

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) (Amireche 2019).

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 (Amireche 2019) :

- 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 (Amireche 2019).

## III.2 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 and Singh 1999).

### III.2.1 Modèle de Système

Le modèle de système à temps discret peut être obtenu dans les termes de matrice comme le suivant (Lee and Singh 1999):

$$X(k) = \phi(k|k-1) \cdot X(k-1) + \Gamma(k|k-1) \cdot w(k-1) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

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

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

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

$w(k-1)$  : Vecteur de bruit blanc Gaussien de système au temps k-1.

### III.2.2 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  $v(k)$ :

$$Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

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

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

$v(k) \in \mathcal{R}^n$  : 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 (Amireche 2019) :

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

$M(k)$  et  $R(k)$  sont la covariance de bruit de processus et la covariance de bruit de mesure, respectivement (Amireche 2019).

### III.2.3 Procédure de Filtre de Kalman Standard

Le fonctionnement du Filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes (Amireche 2019):

- 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.

#### i 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 (Amireche 2019):

$$\bar{X}(k|k-1) = \phi(k|k-1) \cdot X(k-1|k-1) \quad (\text{III.3})$$

Et la prédiction de la covariance  $\bar{P}(k|k-1)$  est donnée comme suit :

$$\bar{P}(k|k-1) = \phi(k|k-1) \cdot P(k-1|k-1) \cdot \phi(k|k-1)^T + M(k-1) \quad (\text{III.4})$$

#### ii 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 :

$$X(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + K(k) \cdot \bar{Y}(k) \quad (\text{III.5})$$

Où  $\bar{Y}(k)$  c'est l'innovation (bruit de mesure), tel que :

$$\bar{Y}(k) = Z(k) - H(k) \cdot \bar{X}(k|k-1) \quad (\text{III.6})$$

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

$$K(k) = \bar{P}(k|k-1) \cdot H(k)^T \cdot S(k)^{-1} \quad (\text{III.7})$$

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

$$S(k) = H(k) \cdot \bar{P}(k|k-1) \cdot H(k)^T + R(k) \quad (\text{III.8})$$

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

$$P(k|k) = (I - K(k) \cdot H(k)) \cdot \bar{P}(k|k-1) \quad (\text{III.9})$$

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.2.4 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-1).

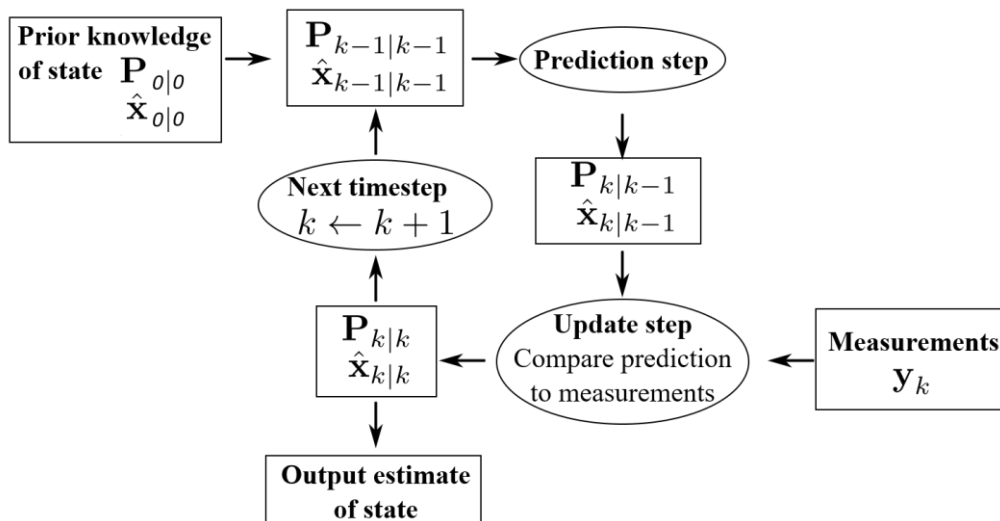


Figure III-1: Etapes du filtre de Kalman

### III.3 Formulation du Tank Model couplé au Filtre de Kalman

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 (Amireche 2019).

#### III.3.1 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  $X(k)$  :  $(13 \times 1)$  est donné comme suit (Lee and Singh 1999):

$$X(k) = [A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{31}, A_{41}, B_1, B_2, B_3, B_4, C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{31}]^T \quad (\text{III.10})$$

La matrice de transition d'état  $\phi(k)$  :  $(13 \times 13)$ , et la matrice de transition de bruit de système  $\Gamma(k|k-1)$  :  $(13 \times 13)$  sont supposées comme matrices d'identités  $I$ , ensuite le modèle du système s'écrit (Lee and Singh 1999):

$$X(k) = X(k-1) + w(k); \quad w(k) \sim N(0, M(k)) \quad (\text{III.11})$$

#### III.3.2 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 and Singh 1999):

$$Q(k) = Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k); \quad v(k) \sim N(0, R(k)) \quad (\text{III.12})$$

Où  $H(k)$  :  $(1 \times 13)$  est la matrice de transition de mesure (observation) définie par :

$$H(k) = [h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{31}, h_{41}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (\text{III.13})$$

Où  $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{31}, h_{41}$  sont les hauteurs d'eau au niveau des orifices. Ces hauteurs sont définies par :  $h_{ij} = S_i - C_{ij}$

## III.4 Formulation du Multi-Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Comme le Tank Model, cette partie établit le couplage du Multi-Tank Model au filtre de Kalman. Le vecteur d'état du Filtre de Kalman est défini comme le jeu de paramètres du Multi-Tank Model. Les paramètres sont mis à jours chaque pas de temps, permettant de modifier le comportement du modèle (Amireche 2019).

### III.4.1 Modèle de Système

Le vecteur d'état du modèle de système est composé par les paramètres du Multi-Tank Model. Par conséquent, le vecteur d'état  $X(k) : (39 \times 1)$  est donné comme suit:

$$X(k) = [A11, A21, A31, \dots, I11, I21, I31, \dots, C14, C24, C34, C44]^T \quad (\text{III.14})$$

La matrice de transition d'état  $\phi(k) : (39 \times 39)$ , et la matrice de transition de bruit de système  $\Gamma(k|k-1) : (39 \times 39)$  sont supposées comme matrices d'identités  $I$ , ensuite le modèle du système s'écrit:

$$X(k) = X(k-1) + w(k); \quad w(k) \sim N(0, M(k)) \quad (\text{III.15})$$

### III.4.2 Modèle de Mesure

La variable d'observation appliquée au Multi-Tank Model est le débit  $Q$ . Pour cela, le modèle de mesure peut être écrit comme suit :

$$Q(k) = Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k); \quad v(k) \sim N(0, R(k)) \quad (\text{III.16})$$

Où  $H(k) : (1 \times 39)$  est la matrice de transition de mesure (observation) définie par :

$$H(k) = [h_{11}, h_{21}, h_{31}, h_{12}, h_{22}, h_{32}, 0, 0, h_{33}, 0, 0, h_{34}, 0, 0, h_{35}, 0 \dots 0] \quad (\text{III.17})$$

Où  $h_{ij}$  sont les hauteurs d'eau au niveau de l'orifice  $j$  dans le réservoir  $i$ .

### III.5 Algorithme récursif du couplage

Pour coupler le Tank Model et le Multi-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  $\bar{X}(k|k-1)$  et la prédiction de la covariance  $\bar{P}(k|k-1)$ . En deuxième lieu, on calcule le gain de Kalman ; ensuite, on trouve l'estimation d'état  $X(k|k)$  et la covariance du bruit de système  $X(k|k)$ .

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 au Filtre de Kalman est donné par la Figure III-2.

### III.6 Conclusion

Le Filtre de Kalman est donc un ensemble d'équations très efficaces qui permettent d'obtenir des solutions optimales aux problèmes. Son efficacité vient de son adaptabilité suivant le nombre de source de données, la qualité des informations recueillies ou la modélisation du système.

Ce type de filtre a déjà été utilisé en hydrologie par plusieurs chercheurs (Lee & Singh). En général il est couplé au Tank Model.

Le Filtre de Kalman est un filtre très puissant, cependant, il diverge parfois, 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.

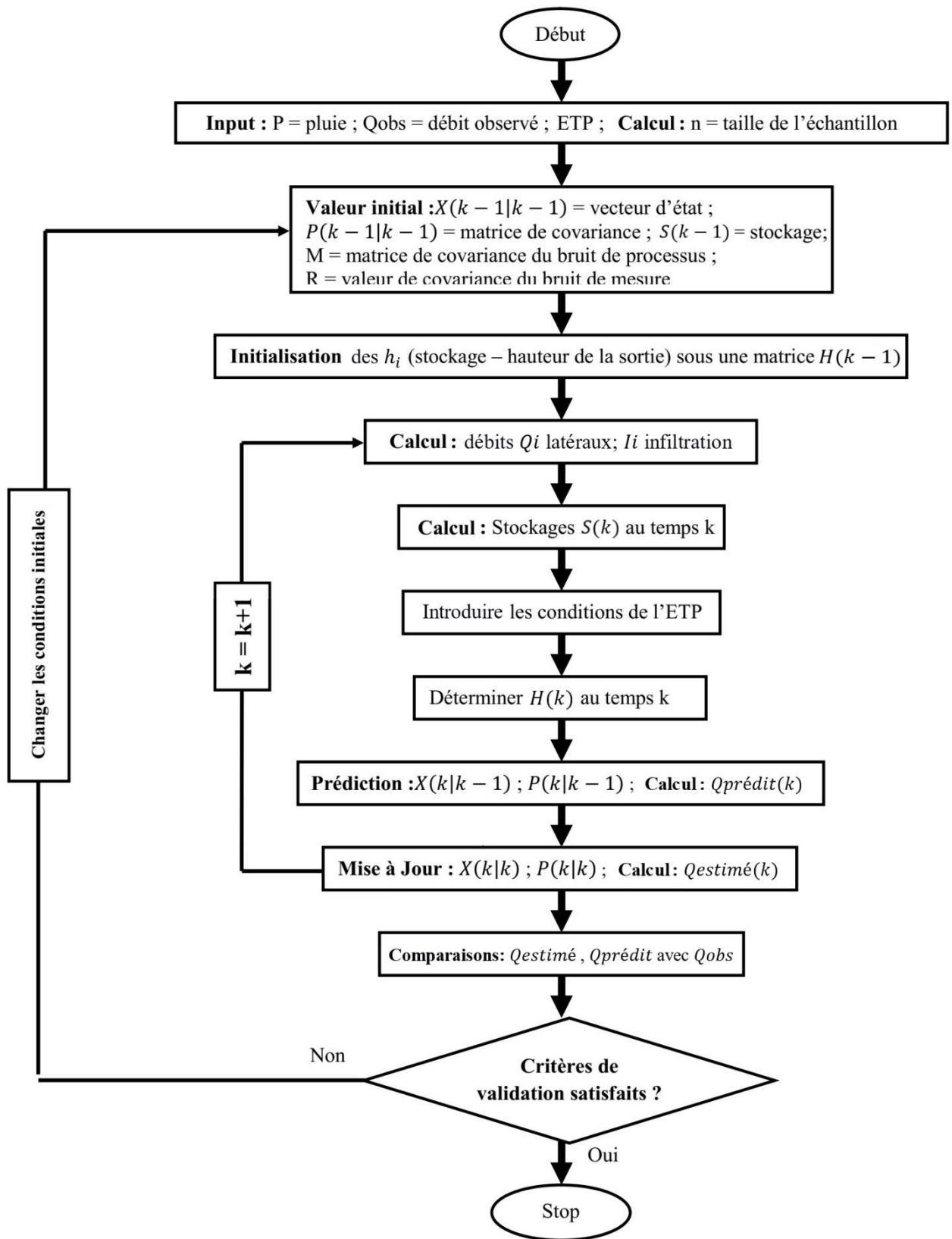


Figure III-2: Organigramme du Couplage de Tank Model et Multi-Tank Model au Filtre de Kalman (Amireche 2019)





### IV.1.1 Climat

La région est soumise à un climat méditerranéen, froid et relativement humide en Hiver, et chaud en Été.

Le bassin présente une forte densité de drainage (3.8 km/km<sup>2</sup>), 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 2019)

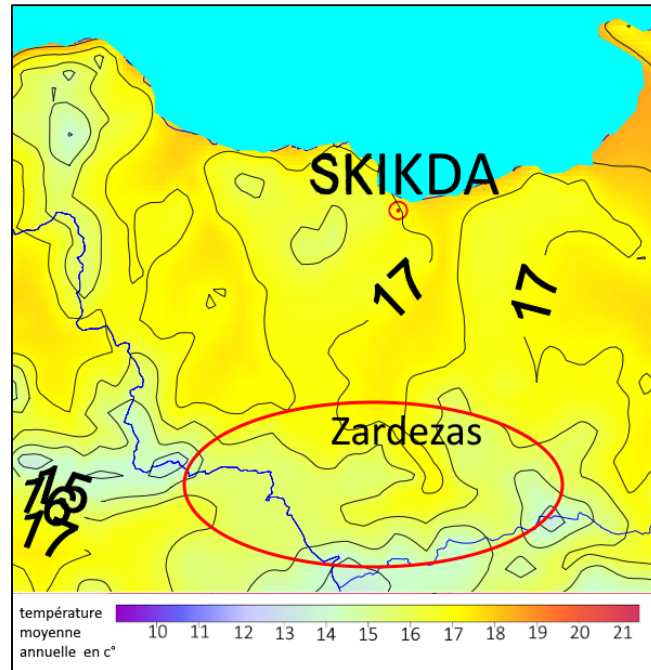


Figure IV-2: Température moyenne annuelle environ Zardezas (Mebarki 2005)

#### i L'indice climatique de DE MARTONNE (1923)

C'est un indice qui détermine le type du climat, appelé aussi l'indice d'aridité « A » de DE MARTONNE. Il est en fonction de la température et la précipitation :

$$A = \frac{P}{T + 10} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en mm,

T : température moyenne annuelle en °C,

A : indice d'aridité de DE MARTONNE annuelle,

**Tableau IV.1: Type du climat selon DE MARTONNE**

<b>Indice de DE MARTONNE</b>	<b>Type de climat</b>
$A < 5$	hyper aride
$5 < A < 7.5$	désertique
$7.5 < A < 10$	steppique
$10 < A < 20$	semi-aride
$20 < A < 30$	tempéré
$A > 30$	humide

**Tableau IV.2: Indice annuel d'aridité de la station de Zardezas**

<b>P (mm)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>A</b>	<b>Observation</b>
633	18	22.6	Climat Tempéré

#### IV.1.2 Caractéristiques morphologique du bassin versant

Les indices morphologiques élaborés par différents organismes dont l'ORSTOM et certains auteurs permettent de donner des informations essentielles pour interpréter le ruissellement et pour la comparaison entre les bassins. Les caractéristiques physiques des bassins versants dont celles liées à la topographie et la forme du bassin versant influent sur les caractéristiques des écoulements résultants des pluies. Cependant, l'utilisation des indices morphologiques qui ont une valeur globale doit être complétée par l'analyse à partir des cartes.

Les différents indices morphologiques de nature surfacique (forme, pentes) ou linéaire (réseau hydrographique) sont très souvent dérivés des Modèles Numériques d'Altitude.

**Tableau IV.3: Caractéristiques morphologiques bu bassin Zardezas à la station de KHEMAKHEM d'après A.N.R.H, (Mebarki 2005)**

<b>Paramètres</b>	<b>Bassin de Zardezas</b>
Superficie (km <sup>2</sup> )	345
Périmètre (km)	81
Longueur du rectangle équivalent (km)	29.6
Longueur du Thalweg principal (km)	24
Altitude max. (m)	1220
Altitude min. (m)	206
Altitude moyenne (m)	628
Coefficient de compacité Kc	1.26
Indice de pente de Roche Ip	0.18
Coefficient de torrentialité	22.1
Temps de concentration (h)	6.56
Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	3.4

### IV.1.3 Données Utilisées

Les modèles Pluie-Débit intègrent généralement trois types de variables hydrométéorologiques, à savoir les précipitations (P), l'évapotranspiration (ETP), et le débit observé d'une station hydrométrique (Qobs).

#### i Données hydrométriques

Nous disposons des données de débit de la station hydrométrique codée (030901) par l'ANRH, elle se situe dans l'exutoire du bassin étudié.

**Tableau IV.4: Les coordonnées de la station hydrométrique de Zardezas**

Station (code)	Bassin	Coordonnées	Date d'installation	Superficie (km <sup>2</sup> )
Zardezas (030901)	Zardezas	Latitude 36.566299° Longitude 6.933026°	1989	345 km <sup>2</sup>

Les données hydrométriques journalières recueillies auprès de l'ANRH ne présentent pas des lacunes. La période d'observations s'étend de janvier 1990 à fin décembre 1995, soit une période de six ans.

**Tableau IV.5: Caractéristiques statistiques des données hydrométriques - Zardezas-**

min (m <sup>3</sup> /s)	0.00
max (m <sup>3</sup> /s)	124.30
écart type (m <sup>3</sup> /s)	6.81
moyenne (m <sup>3</sup> /s)	1.56

#### ii Données pluviométriques

Nous disposons des données de pluies de la station pluviométrique codée (030903) par l'ANRH, elle se situe près du barrage de Zardezas.

**Tableau IV.6: Caractéristiques statistiques des données pluviométriques - Zardezas-**

min (mm/j)	0.00
max (mm/j)	76.70
écart type (mm/j)	5.56
moyenne (mm/j)	1.58

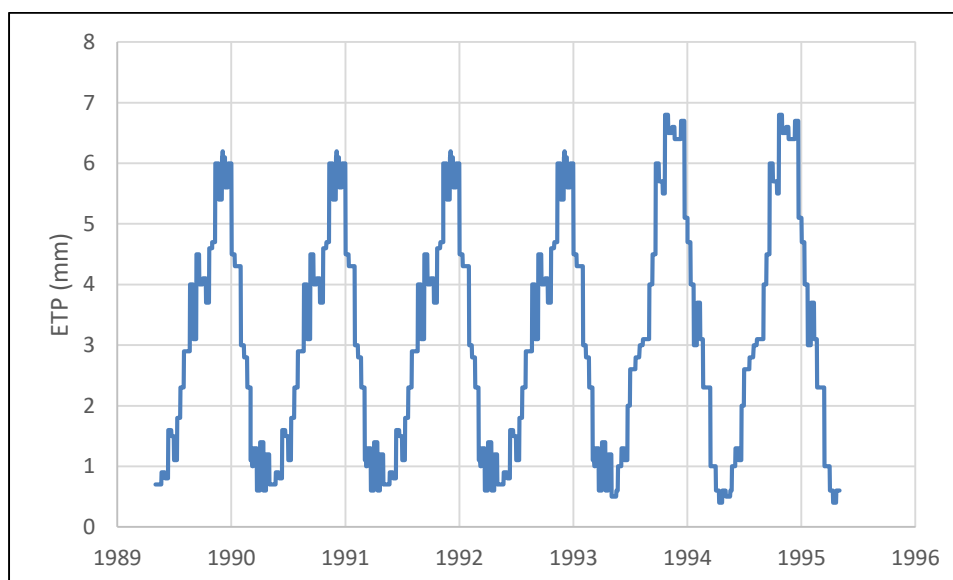
Le bassin versant étudié, est caractérisé par une petite superficie, et le choix d'une seule station n'influencera donc pas la qualité des résultats, en supposant que la précipitation est homogène sur le bassin.

Les données pluviométriques journalières recueillies auprès de l'ANRH ne présentent pas des lacunes. La période d'observation utilisée s'étend de janvier 1990 à fin décembre 1995, soit une période de six ans.

### iii Données de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration représente une donnée climatique importante pour caractériser l'état du sol, elle agit comme la quantité d'eau susceptible d'être perdue dans l'atmosphère sous forme d'évaporation à partir de la surface et du couvert végétal. (BENKACI 2006).

Les évaporations journalières du bassin de Zardezas sont calculées par un bac BPI Colorado sur site du barrage Zardezas (coefficient  $K=0.7$ ).



**Figure IV-3: Données de l'évaporation (mm) de barrage Zardezas**

**Tableau IV.7: Caractéristiques statistiques des données ETP - Zardezas-**

min (mm/j)	0.4
max (mm/j)	6.8
écart type (mm/j)	1.89
moyenne (mm/j)	3.10

## IV.2 Présentation du bassin versant de Djemorah :

Le bassin versant de Djemorah codé (06-13) par l'ANRH, est situé au Sud-Est de l'Algérie dans les territoires des wilayas de Batna et Biskra. Voir Figure IV-4

L'Oued de Djemorah résulte de la conjonction de deux cours d'eau : Oued Abdi et Oued Bouzina. Il est limité par le bassin de Kantara du Nord et d'Ouest, le bassin de M'Chouneche de Sud-Est, et le bassin de la Biskra de Sud.

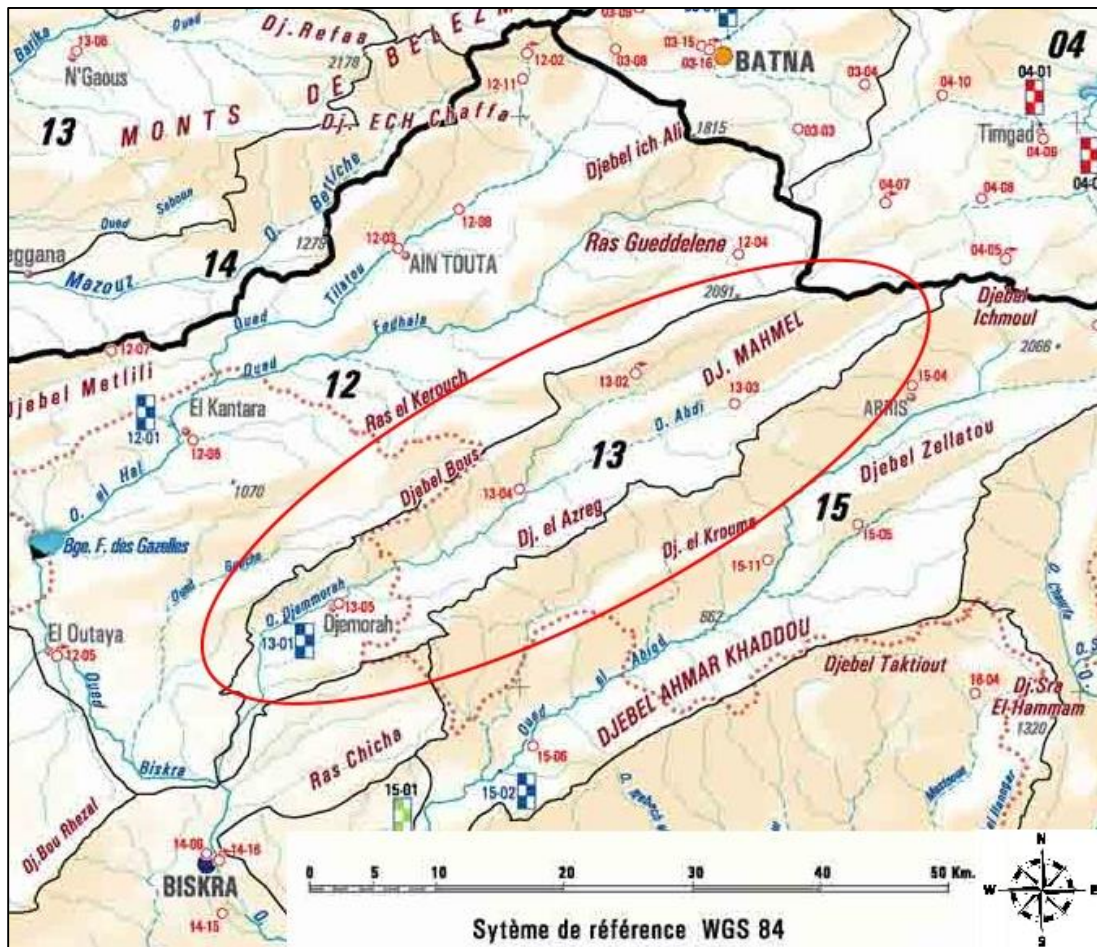


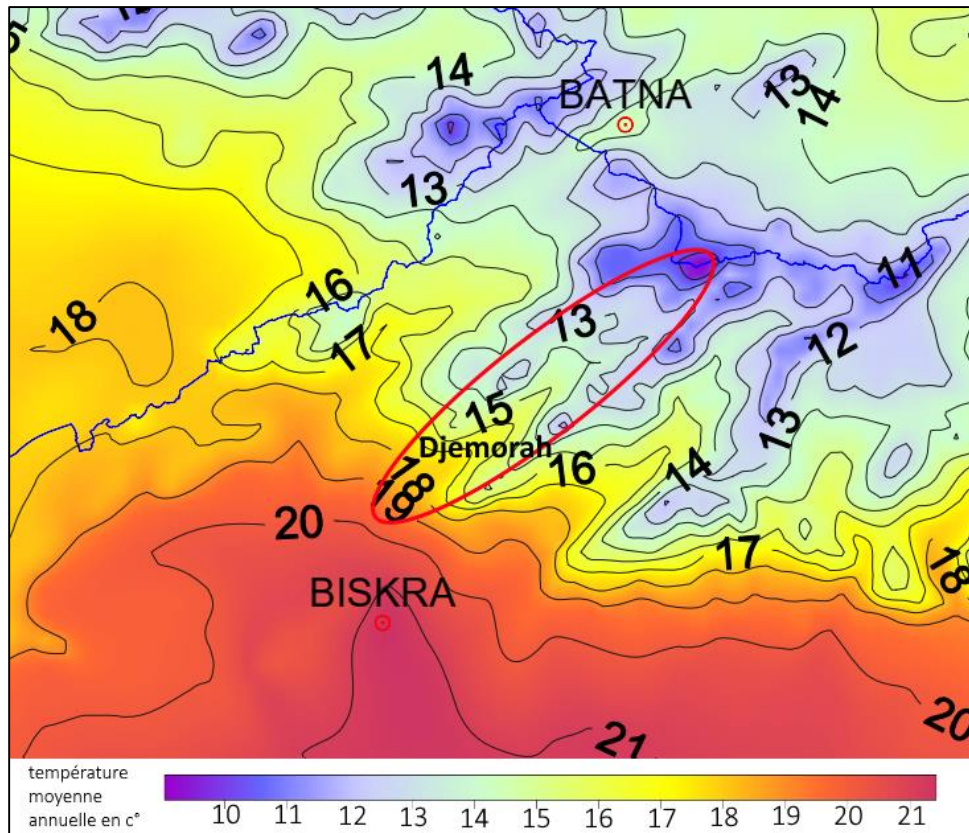
Figure IV-4: Situation du bassin versant Djemorah (ANRH, 2005)

### IV.2.1 Climat

La région est soumise à un climat méditerranéen, froid et relativement humide en Hiver, et chaud en été.

Le bassin présente une forte densité de drainage ( $30 \text{ km/km}^2$ ), son relief est assez élevé et accidenté. En effet, cette région est considérée comme une zone de transition de point de vue morphologique et bioclimatique, de massifs montagneux de l'Aurès en amont à des plateaux

légèrement incliné en aval. Djemorah dispose d'une station hydrométrique et quatre stations pluviométriques contrôlées par l'ANBT.



**Figure IV-5: Température moyenne annuelle environ Djemorah (Mebarki 2005)**

**i L'indice climatique de DE MARTONNE**

Le calcul de l'indice d'aridité du bassin versant de Djemorah (Mebarki 2005), est présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.8: Indice annuel d'aridité de la station de Djemorah**

<b>P (mm)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>A</b>	<b>Observation</b>
213	15	8.52	Climat steppique



## IV.2.2 Caractéristiques morphologiques du bassin versant

Les indices morphologiques de bassin de Djemorah sont exposés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.9: Caractéristiques morphologiques du bassin Djemorah, (Mebarki 2005)**

Paramètres	Bassin de Djemorah
Superficie (km <sup>2</sup> )	589.5
Périmètre (km)	135
Longueur du rectangle équivalent (km)	57.1
Longueur du Thalweg principal (km)	80
Altitude max. (m)	2312
Altitude min. (m)	420
Altitude moyenne (m)	1308
Coefficient de compacité Kc	1.55
Coefficient de torrencialité	23.5
Temps de concentration (h)	9.11
Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	30

## IV.2.3 Données Utilisées

Les données retenues pour l'étude du bassin de Djemorah sont les suivantes :

### i Données hydrométriques

Nous disposons des données de débits des stations hydrométriques : Djemorah codée (061301), et celles du bassin voisin Kantara codée (061201) par l'ANRH. Voir Figure IV-4.

**Tableau IV.10: Les coordonnées des stations hydrométriques de Djemorah et Kantara**

Station (code)	Bassin	Coordonnées	Superficie (km <sup>2</sup> )
Djemorah (061301)	Djemorah	latitude 35.063592° longitude 5.811792°	589.5 km <sup>2</sup>
Kantara (061201)	Kantara	latitude 35.231955° longitude 5.700516°	1170 km <sup>2</sup>

Ces données hydrométriques journalières, de la station de Djemorah, recueillies auprès de l'ANRH, présente quelques lacunes. Pour cela, on a utilisé l'une des stations voisines pour combler ces lacunes. Les périodes d'observations ont été choisies, de sorte que, les séries temporelles soient complètes. Le premier échantillon s'étend de Septembre 1980 à Août 1986, soit une période de six ans, avec 67 valeurs manquantes (3%), alors que le deuxième échantillon s'étend de Septembre 1988 à Août 1992, soit une période de quatre ans, avec seulement 6 valeurs manquantes (0.4%).

Le comblement de lacunes a été effectué par la méthode de régression linéaire avec les données de la station voisine de Kantara.

**Tableau IV.11: Caractéristiques statistiques des données hydrométriques de la station de Djemorah et de la station de Kantara**

échantillon	Djemorah (80-86)	Djemorah (88-92)	Kantara (78-96)
min (m <sup>3</sup> /s)	0.00	0.00	0.001
max (m <sup>3</sup> /s)	40.41	43.71	37.32
écart type (m <sup>3</sup> /s)	2.04	1.52	1.30
moyenne (m <sup>3</sup> /s)	0.495	0.308	0.322
Lacunes (%)	3%	0.4%	5.1%

Nous avons opté pour l'utilisation de l'échantillon de Djemorah qui date de 1988 à 1992, car il présente le pourcentage de lacunes le plus faible.

## ii Données pluviométriques

Nous disposons des données de pluies de trois stations pluviométriques : Djemorah, Mena, et Bouzina codée respectivement (061305), (061304), et (061302) par l'ANRH, et sont situées de manière à bien représenter la pluviométrie du bassin comme le montre la Figure IV-4 .

Ces données pluviométriques journalières recueillies auprès de l'ANRH présentent quelques lacunes, comblées par la méthode de la distance inverse pondérée entre les trois stations. La période d'observation s'étend de Septembre 1972 à Août 1997.

Le tableau suivant présente les caractéristiques statistiques des données concomitantes avec les données de débits (de Septembre 1980 à Août 1986 et de Septembre 1988 à Août 1992).



**Tableau IV.12: Caractéristiques statistiques des données pluviométriques des stations de bassin de Djemorah**

Station Période	Bouzina (061302)		Menaâ (061304)		Djemorah (061305)	
	(80-86)	(88-92)	(80-86)	(88-92)	(80-86)	(88-92)
min (mm/j)	0	0	0	0	0	0
max (mm/j)	38.99	46.00	50.20	38.80	29.95	43.40
écart type (mm/j)	2.89	3.44	3.34	2.91	2.14	2.32
moyenne (mm/j)	0.64	0.83	0.61	0.62	0.37	0.42
Lacunes (%)	33.3%	0%	0%	0%	4.15%	4.18%

### iii Données de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration représente une donnée climatique importante pour caractériser l'état du sol, elle agit comme la quantité d'eau susceptible d'être perdue dans l'atmosphère sous forme d'évaporation à partir de la surface et du couvert végétal. (BENKACI 2006).

Vu l'inexistence des données de mesure de l'ETP dans la région, on a utilisé le modèle d'Oudin pour le calcul de l'ETP qui est fonction de la température et de la latitude.

Les données de la température utilisées sont celles de la station météorologique: 605250 (DAUB- Aéroport de Biskra)

**La formule d'Oudin** : celle-ci calcule l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) à partir de la température T et la latitude L.

$$ETP = \max\left(0; \frac{Gr(T+5)}{28.5 \times 100}\right) \quad (IV.2)$$

$$Gr = 446 \times OM \times \cos(PZ) \times Eta \quad (IV.3)$$

$$\cos(PZ) = \cos(GZ) + \cos\left(\frac{L}{57.3}\right) \times \cos(teta) \times \frac{\sin(OM)}{(OM - 1)} \quad (IV.4)$$

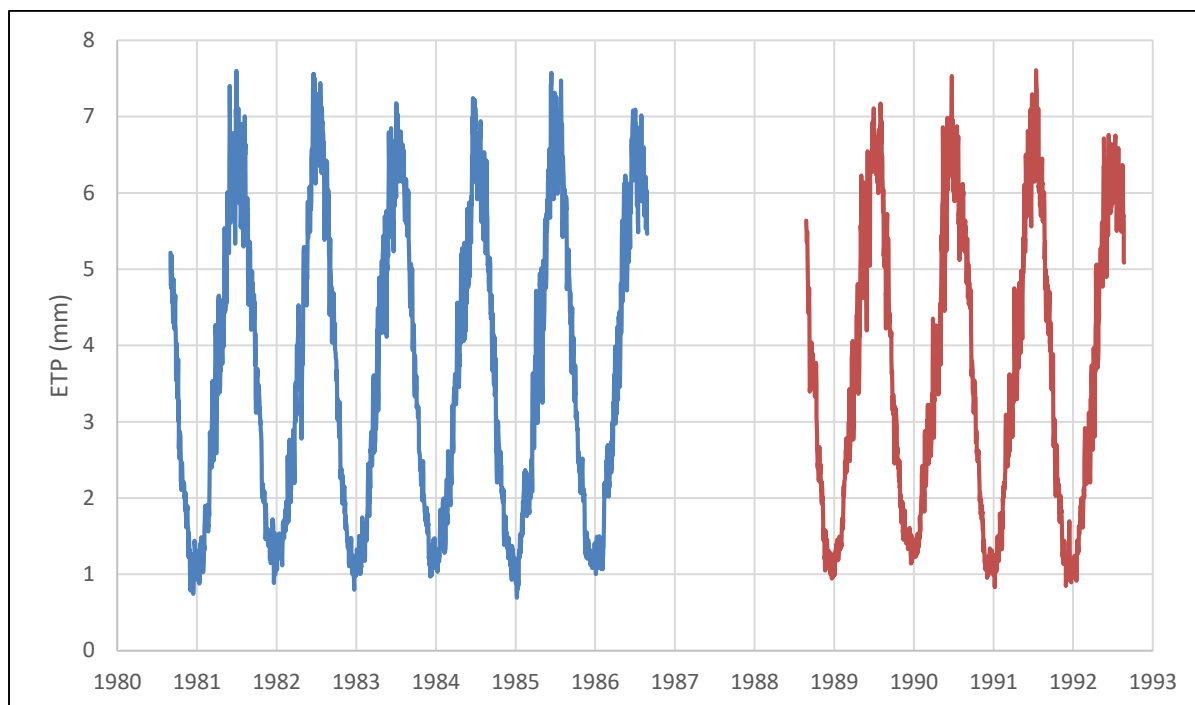
$$Eta = 1 + \cos\left(\frac{n}{58.1}\right)/30 \quad (IV.5)$$

$$\cos(OM) = \max\left(-1; \min\left(1 - \frac{\cos(GZ)}{\cos(L/57.3)/\cos(teta)}; 1\right)\right) \quad (IV.6)$$

$$\cos(GZ) = \max\left(0.001; \cos\left(\frac{L}{57.3} - teta\right)\right) \quad (IV.7)$$

$$teta = 0.4093 \sin\left(\frac{n}{58.3} - 1.405\right) \quad (IV.8)$$

Avec :     n : le rang du jour dans l'année  
           L : degré de latitude  
           Gr : radiation globale



**Figure IV-6: Données de l'évapotranspiration (mm) de bassin Djemorah**

D'après le graphe de l'évolution de l'évapotranspiration, on remarque que celle-ci est un phénomène cyclique dans le temps et que ces valeurs sont importantes durant les saisons sèches (Été) et faibles durant les saisons humides (Hiver).

**Tableau IV.13: Caractéristiques statistiques des données ETP  
 - Djemorah-**

min (mm/j)	0.69
max (mm/j)	7.61
écart type (mm/j)	1.94
moyenne (mm/j)	3.63

Les données de température comportent des lacunes, dans le premier échantillon (80-86) le pourcentage des lacunes est 1.7%, et dans le deuxième (88-92) les lacunes sont de 3.5%.

Ces lacunes sont comblées par la moyenne des températures des jours de même date d'autres années.

### **IV.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, une description plus ou moins détaillée, des bassins versants étudiés (Zardezas et Djemorah), ainsi que de leurs caractéristiques morphologiques, a été effectuée. D'autre part, nous avons déterminés les différents types de climat (humide et semi-aride) auxquels sont soumis les bassins de Zardezas et de Djemorah, et l'importance de tester les modèles proposés pour ces différents types de climat.

Nous avons ensuite, présentés les données hydrométéorologiques utilisées en précisant leurs sources, leurs caractéristiques statistiques ainsi que les méthodes de comblement des lacunes.

Pour la suite du travail, on a retenu la totalité des données de pluies, de débits, et d'évaporations recueillies au niveau du bassin versant de Zardezas.

Par contre, pour le bassin de Djemorah, on a retenu la période d'observation 1988-1992 comme période d'études, car celle-ci présente le pourcentage de lacunes le plus faible.

# Chapitre V

## Résultats et Discussions

### V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus par les modèles développés et appliqués aux deux bassins versants retenus comme zone d'études. Ces résultats sont présentés sous forme de tableaux et figures, et vont être discutés et interprétés par la suite.

Enfin, nous allons retenir à la fin de ce chapitre, les meilleurs modèles qui simulent parfaitement les événements hydrologiques, et indiquer celui ou ceux qui sont applicables aux différents climats de l'Algérie.

### V.2 Application au bassin versant de Zardezas

#### V.2.1 Modèle GR4J

Les séries hydrométriques, pluviométriques et d'évapotranspirations retenues, sont concomitantes et correspondent à une durée d'observation de 6 ans.

La série temporelle a été divisée en deux sous échantillons, le premier est utilisé pour caler le modèle en estimant ses paramètres, et le deuxième pour sa validation.

Nous avons utilisé une calibration semi-automatique pour le calage, en procédant par tâtonnements, ensuite on utilisera le solveur d'Excel.

La procédure de calage consiste à déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères d'efficacité sur la période de calage. Les paramètres retenus sont ceux pour lesquels les critères d'efficacité sont optimaux pour les périodes de calage et de validation.

La période de calage a été choisie de telle sorte qu'elle soit plus grande que celle de la validation, par convention, les proportions sont de 2/3, et 1/3, ou bien 80%, et 20%. Donc la période du début 1990 à fin 1993, sera utilisée pour le calage, et celle du début 1994 à fin 1995, pour la validation.

Une période de mise en route d'une année, est choisie, pour initialiser notre modèle de calcul (stockage, débit initial,...), cette étape est indispensable, car les conditions initiales ne sont pas connues, et dans notre cas le début de la série retenue, coïncide avec la saison humide d'où l'importance de cette étape.

On a appliqué enfin, les paramètres optimaux obtenus lors de la période de calage sur la période de validation, et on a jugé le modèle par les critères d'évaluation numériques et graphiques.

Les paramètres de modèle obtenu par calage:

- X1 : Capacité max. du sol : 213.66 mm,
- X2 : Echange souterrain : -2.23,
- X3 : Capacité du réservoir routage : 20 mm,
- X4 : Temps de montée de l'hydrogramme de crue unitaire : 1,28 jour.

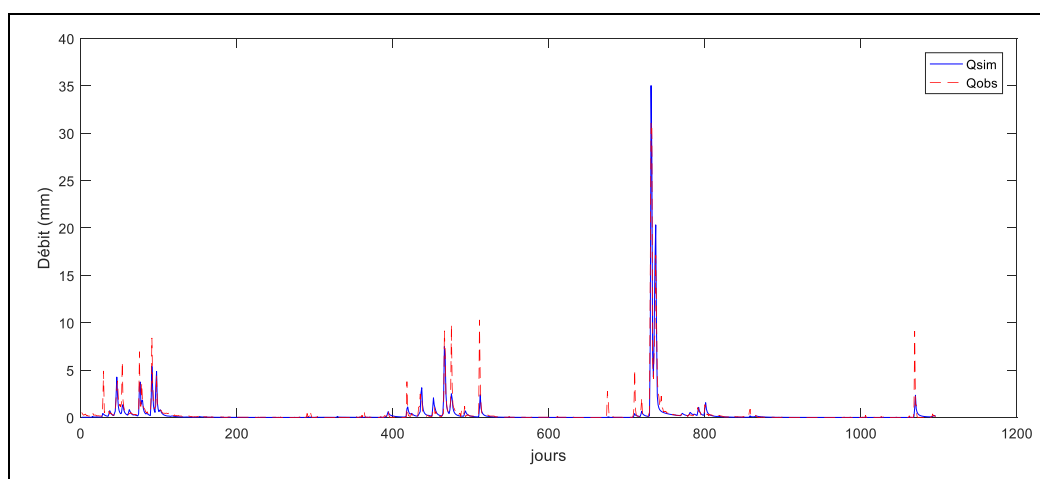
Les résultats sont résumés dans le tableau suivant:

**Tableau V.1: résultats des performances du modèle GR4J (Zardezas)**

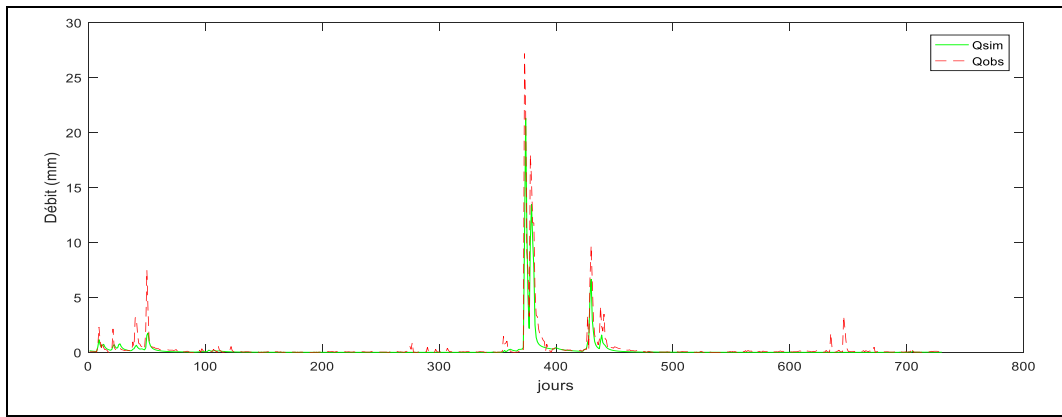
Critères d'évaluations	Calage		Validation	
NSE	<b>0.85</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.78</b>	<b>Bon</b>
RSR	<b>0.39</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.47</b>	<b>Très bon</b>
PBIAS (%)	<b>21</b>	<b>Insatisfaisant</b>	<b>43</b>	<b>Insatisfaisant</b>

D'après ces résultats, on peut dire que pour les critères numériques :

- le NSE obtenu diminue légèrement et passe de très bon en période de calage à bon en période de validation.
- le RSR est très bon pour les deux périodes, et indique que les erreurs du modèle ne sont toutefois pas aussi importantes.
- le PBIAS indique que la tendance de la prédiction ne suit pas la tendance des observations, avec une sous-estimation des valeurs pour les deux périodes.

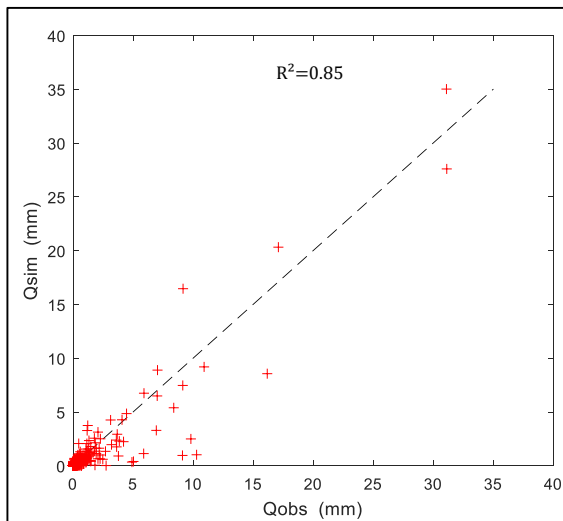


**Figure V-1: Evolution du débit en période de calage du modèle GR4J -Zardezas-**

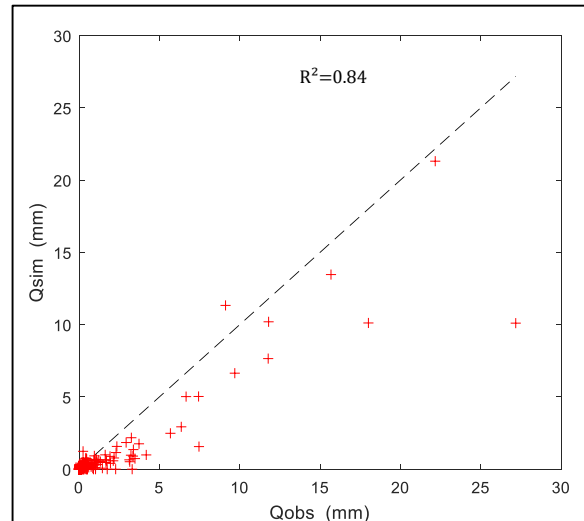


**Figure V-2: Evolution du débit en période de validation du modèle GR4J -Zardezas-**

On remarque d'après ces deux figures, que le modèle développé reproduit fidèlement l'allure des valeurs observées, et sous-estime légèrement la majeure partie des pics, que ce soit en période de calage ou en période de validation, ce qui corrobore les résultats des critères numériques.



**Figure V-3 : Q-Q plot en période de calage du modèle GR4J, -Zardezas-**



**Figure V-4 : Q-Q plot en période de validation du modèle GR4J, -Zardezas-**

Pour les figures ci-dessus, on remarque que les débits faibles, sont proches de la première bissectrice, alors que les débits élevés s'éloignent légèrement de cette dernière, ce qui suppose, que le modèle développé GR4J, reproduit mieux les faibles débits que les pics, et c'est ce qu'on a constaté et conclu pour les critères numériques et les figures V-1 et V-2.

Malgré la bonne qualité des résultats obtenus, nous avons jugé utile, de tester d'autres modèles pour mieux modéliser les événements journaliers, surtout si on s'intéresse à l'étude des événements extrêmes, et aux évaluations de risques liés à la ressource en eau.

### V.2.2 Tank Model (TM)

La même procédure est appliquée aux données du bassin versant de Zardezas pour cette modélisation. Dans cette étude, on va utiliser le Tank Model à 4 réservoirs.

Pour l'initialisation on prend les valeurs initiales proposé par Sugawara (1985) montrées dans la Figure II-8.

Les paramètres du modèle obtenu par calage sont résumés dans le tableau suivant:

**Tableau V.2: Valeurs des paramètres optimisés du Tank Model, (Zardezas)**

Réservoirs	Coefficients des débits de ruissellement		Coefficients des débits d'infiltration		Hauteurs des orifices (mm)	
	Premier réservoir	A11	0.200	B1	0.170	C11
A12		0.096	C12			11.54
Deuxième réservoir	A21	0.017	B2	0.016	C21	31.51
Troisième réservoir	A31	0.004	B3	0.019	C31	14.89
Quatrième réservoir	A41	0.005	B4	0		

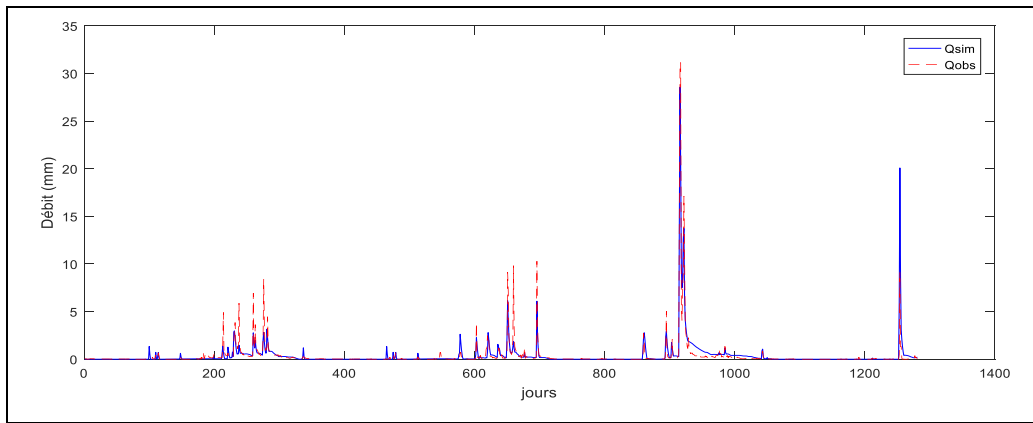
Les critères d'évaluation numériques sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.3 : Résultats des performances du Tank Model (Zardezas)**

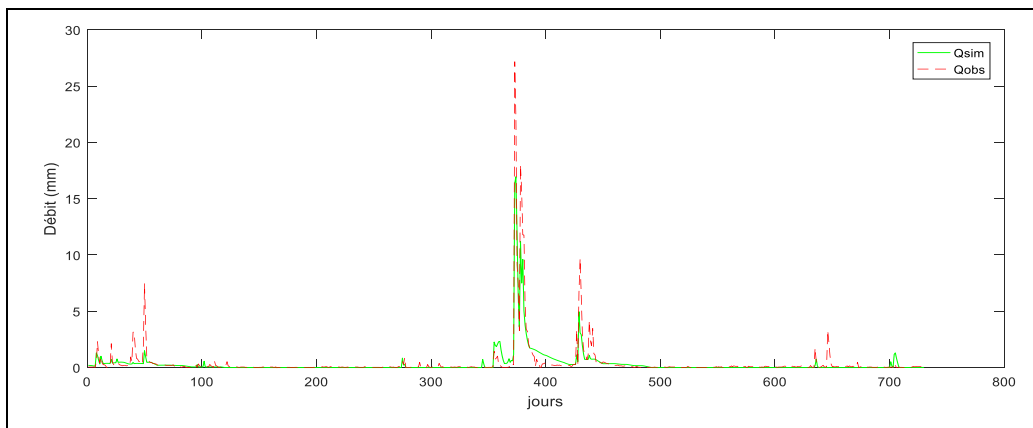
Critères d'évaluations	Calage		Validation	
	NSE	<b>0.80</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.79</b>
RSR	<b>0.44</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.46</b>	<b>Très bon</b>
PBIAS (%)	<b>-5.4</b>	<b>Bon</b>	<b>22.7</b>	<b>Insatisfaisant</b>

D'après ces résultats, on peut dire que pour les critères numériques :

- le NSE et le RSR obtenus sont très bons, que ce soit, en période de calage, ou de validation, et indiquent que les erreurs du modèle ne sont pas aussi importantes.
- le PBIAS indique que la tendance de la prédiction suit la tendance des observations en période de calage, et s'éloigne complètement en période de validation. En outre, on remarque que le modèle surestime les valeurs prédites en phase de calage, alors qu'il les sous-estime lors de la validation.



**Figure V-5: Evolution du débit en période de calage Tank Model -Zardezas-**

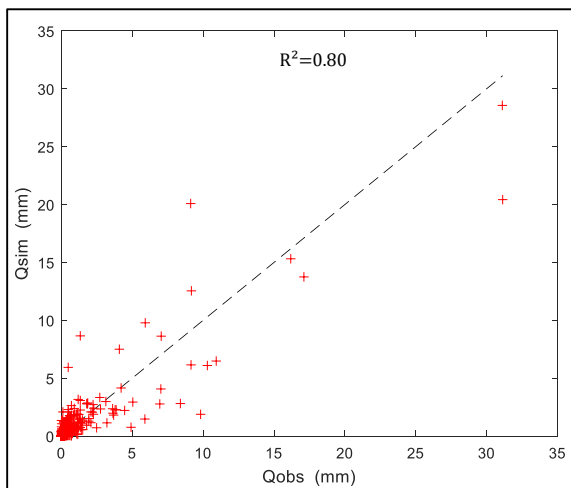


**Figure V-6: Evolution du débit en période de validation du Tank Model -Zardezas-**

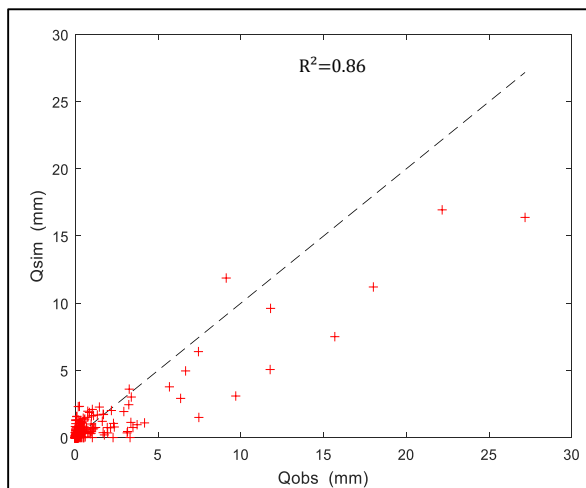
On remarque d'après ces deux figures, que le modèle reproduit bien l'allure des valeurs observées, mais qu'il sous-estime la majeure partie des pics, que ce soit en période de calage ou de validation.

Pour les figures V-7 et V-8 ci-dessous, on remarque que les débits faibles sont proches de la première bissectrice, alors que les débits élevés s'éloignent légèrement de cette dernière, ce qui suppose, que le Tank Model, reproduit mieux les faibles débits que les pics, et c'est ce qu'on a constaté et conclu à partir des critères numériques et des figures V-5 et V-6.





**Figure V-7: Q-Q plot en période de calage du Tank Model, -Zardezas-**



**Figure V-8: Q-Q plot en période de validation du Tank Model, -Zardezas-**

### V.2.3 Tank Model Couplé au filtre de Kalman (TM-FK)

Les résultats de la modélisation de la relation Pluie-Débit par le Tank Model, ont poussé les hydrologues à chercher des outils permettant d'améliorer la simulation. Leur attention a été attiré par la performance du filtre de Kalman comme un outil permettant d'éliminer le bruit dû aux erreurs (mesures, systèmes). Ils ont même pensés que le bassin versant, ne gardait pas les mêmes paramètres dans le temps, et c'est ce que leur offre le filtre de Kalman.

Les séries temporelles vont être entièrement utilisées, dans ce cas, car cette méthode de la modélisation change de paramètres à chaque étape, et par conséquent la phase de validation n'a pas de lieu d'être.

Nous avons utilisé une calibration manuelle (Trial & Error) pour le calage, en procédant par tâtonnements sur les valeurs initiales des paramètres de chaque simulation d'une façon à rendre les critères d'évaluation plus performants.

La méthode de calibration se fait en trois étapes :

- En premier, on introduit le vecteur d'état initial en utilisant les paramètres optimisés du Tank Model sans filtre de Kalman (voir § V.2.2).
- On optimise les matrices de covariance ( $P(0|0)$ ,  $M(k)$ ,  $R(k)$ ) du filtre de Kalman initialement. On peut changer ces paramètres lors de calibration pour améliorer le résultat.

- On optimise le vecteur d'état initial  $X(0|0)$ , en premier, on s'intéresse aux paramètres de ruissellement, d'infiltration et les hauteurs des orifices latérales, puis les valeurs du stockage initial.

Le vecteur initial d'état, et les matrices de covariance initiales retenus sont ceux pour lesquels les critères d'efficacité sont optimaux.

Dans ce qui suit on notera Tank Model couplé au Filtre de Kalman par « TM-FK »

Pour simplifier la calibration, on a utilisé un Tank Model à deux réservoirs.

Les valeurs des matrices de covariance ont été calibrées par les valeurs suivantes :

- $R(k) = 0.0001$
- $M(k) = 10^{-4} \cdot I$  avec  $I$  : la matrice identité de taille (8\*8)
- Les  $\sigma$  de  $P(0|0)$  qui correspond à chaque paramètre dans le vecteur d'état  

$$\sigma = [0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 3 \ 3 \ 3]$$

Les paramètres de modèle obtenus par calage sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.4: Valeurs des paramètres optimisés du (TM-FK), (Zardezas)**

Réservoirs	Lame de stockage (mm)		Coefficients des débits de ruissellement		Coefficients des débits d'infiltration		Hauteurs des orifices (mm)	
	Premier réservoir	S1	20.5	A11	0.210	B1	0.158	C11
			A12	0.123	C12			13.58
Deuxième réservoir	S2	10.6	A21	0.012	B2	0.008	C21	30.13

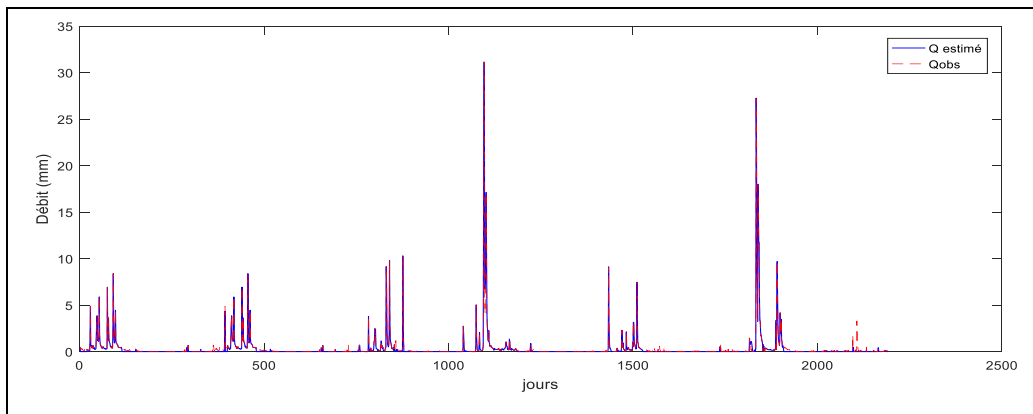
Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.5: Résultats des performances du (TM-FK), (Zardezas)**

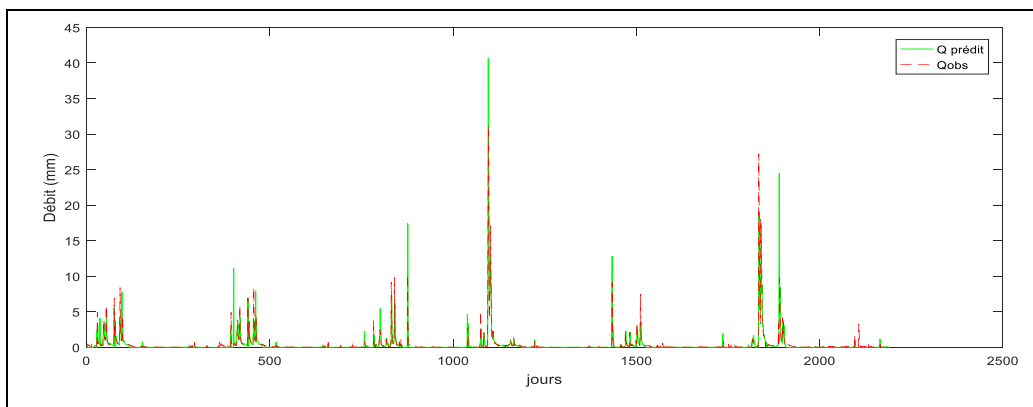
Critères d'évaluations	Estimation		Prédiction	
	NSE	<b>0.99</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.66</b>
RSR	<b>0.1</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.58</b>	<b>Bon</b>
PBIAS (%)	<b>10</b>	<b>Bon</b>	<b>8.0</b>	<b>Bon</b>

D'après ces résultats, on peut conclure pour les critères numériques :

- le NSE obtenu passe de très bon en estimation à satisfaisant en prédiction.
- le RSR obtenu diminue légèrement et passe de très bon en estimation à bon en prédiction, et indique que les erreurs du modèle ne sont pas aussi importantes.
- le PBIAS indique que les tendances des simulations en estimation et en prédiction suivent la tendance des observations, cela s'explique par le fait que la mise à jour est fonction de débit observé. Il indique aussi une sous-estimation des valeurs estimées et prédites.

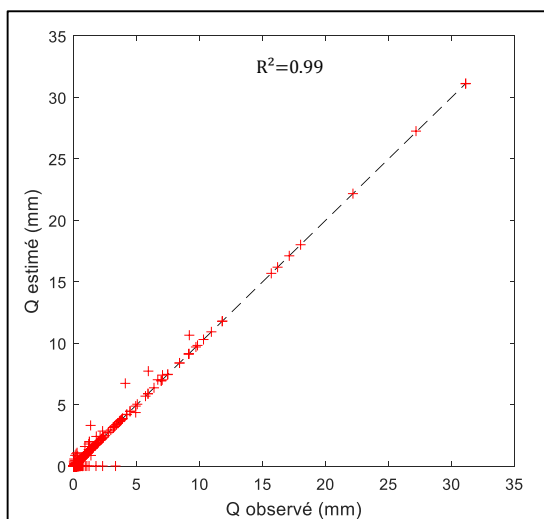


**Figure V-9: Evolution du débit en estimation de(TM-FK),  
-Zardezas-**

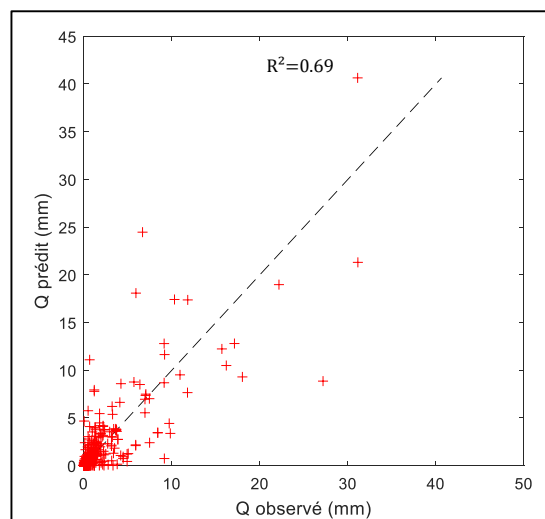


**Figure V-10: Evolution du débit en prédiction de(TM-FK),  
-Zardezas-**

D'après les deux figures V-9 et V10, on note que le modèle reproduit fidèlement l'allure des valeurs observées, avec des erreurs en prédiction des pics.



**Figure V-11: Q-Q plot en estimation (TM-FK), -Zardezas-**



**Figure V-12: Q-Q plot en prédiction (TM-FK), -Zardezas-**

Dans la figure V-11, on remarque que le nuage de point des débits est bien réparti par rapport à la première bissectrice, alors qu'en figure V-12 les débits faibles sont proches de la bissectrice contrairement aux débits élevés, ce qui suppose, que le Tank Model couplé au filtre de Kalman développé, reproduit mieux les faibles débits que les pics, et c'est ce qu'on a constaté et conclu pour les critères numériques et les figures V-9 et V-10.

#### V.2.4 Multi-Tank Model (MTM)

La structure du Multi-Tank Model, proposé par Sugawara (1985), est donnée en Figure II-7. Dans ce qui suit, on note le Multi-Tank Model par « MTM ».

La même procédure est appliquée aux données du bassin versant de Zardezas pour cette modélisation. Dans cette étude, on va utiliser le Multi-Tank Model à 2 réservoirs dans chaque série.

Les coefficients des proportions de surface de bassin de chaque série sont calibré à :

**Tableau V.6: Les proportions des séries de MTM (Zardezas)**

Série	1	2	3
Proportion	0.3	0.2	0.5

En suivant la notation montrée par la Figure II-7, on a 3 séries à 2 réservoirs, donc les valeurs des paramètres optimisés du Multi-Tank Model sont les suivants :

$x_i = [Ai1, Ai2, Ai3, Bi1, Bi2, Ci1, Ci2, Ci3]$  Avec  $i$  : l'indice de la série

$$x_1 = [0.21 \ 0.08 \ 0.64 \ 0.13 \ 0 \ 25 \ 0 \ 3]$$

$$x_2 = [0.5 \ 0 \ 0.69 \ 0.003 \ 0 \ 110 \ 13 \ 20]$$

$$x_3 = [0.27 \ 0.03 \ 0.004 \ 0.2 \ 0 \ 68 \ 3 \ 30]$$

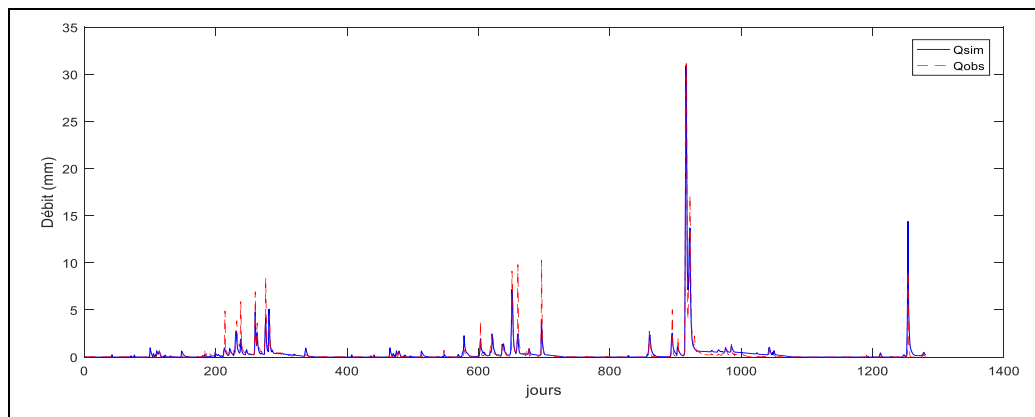
Les résultats sont résumés dans le tableau suivant:

**Tableau V.7: Résultats des performances du Multi-Tank Model (Zardezas)**

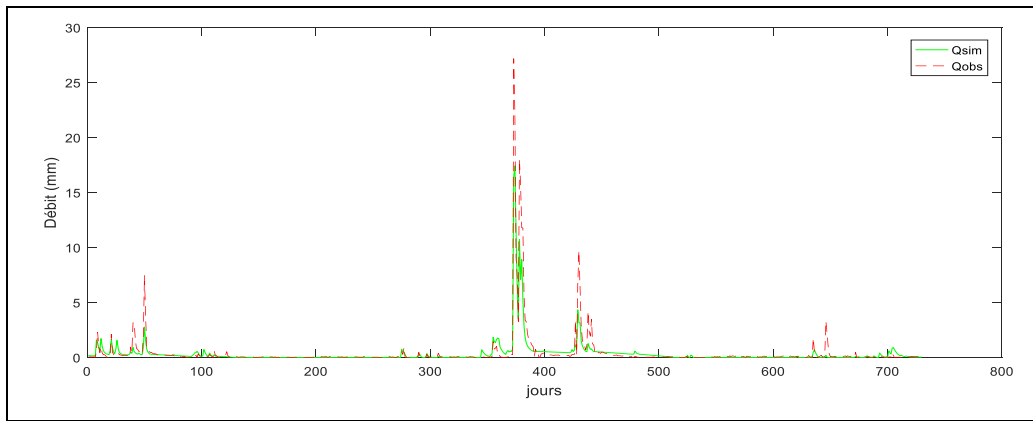
Critères d'évaluations	Calage		Validation	
	NSE	<b>0.86</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.80</b>
RSR	<b>0.37</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.45</b>	<b>Très bon</b>
PBIAS (%)	<b>-4.1</b>	<b>Très bon</b>	<b>21.5</b>	<b>Insatisfaisant</b>

D'après ces résultats, on peut dire que pour les critères numériques :

- le NSE et le RSR obtenus sont très bons, que ce soit, en période de calage, ou de validation.
- le PBIAS indique que la tendance de la prédiction suit la tendance des observations en période de calage, et s'éloigne complètement en période de validation. En outre, on remarque que le modèle surestime les valeurs prédites en phase de calage, alors qu'il les sous-estime lors de la validation.

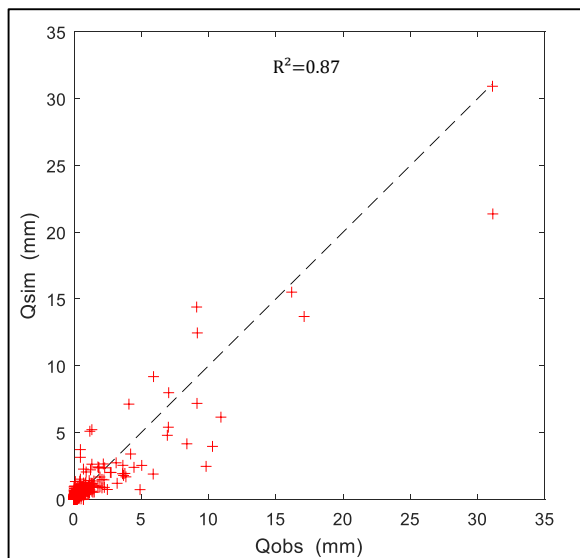


**Figure V-13: Evolution du débit en période de calage du Multi-Tank Model -Zardezas-**

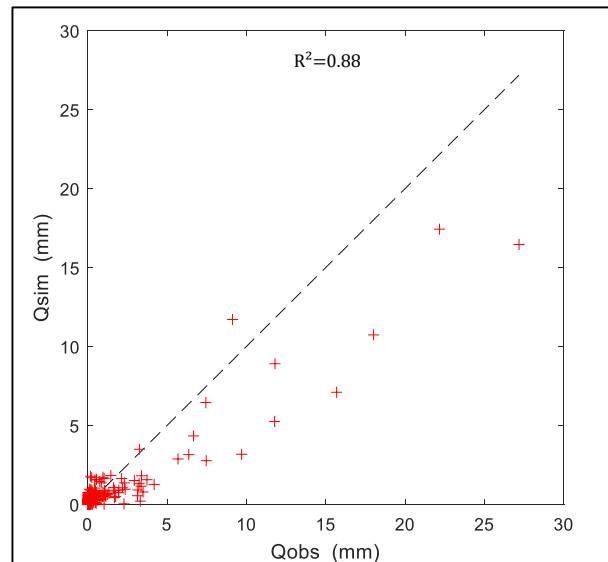


**Figure V-14: Evolution du débit en période de validation du Multi-Tank Model -Zardezas-**

D'après ces figures, on note que le modèle reproduit bien l'allure des valeurs observées, mais surestime une partie des pics, en période de calage et sous-estime les pics en période de validation, ce qui corrobore les résultats des critères numériques.



**Figure V-15: Q-Q plot en période de calage du MTM, - Zardezas-**



**Figure V-16: Q-Q plot en phase de validation du MTM, - Zardezas-**

Dans les figures V-15 et V-16, on remarque que les débits faibles, sont proches de la première bissectrice, alors que les débits élevés s'éloignent légèrement de cette dernière, ce qui suppose, que le modèle développé, reproduit mieux les faibles débits que les pics, et c'est ce qu'on a constaté et conclu pour les critères numériques et les figures V-13 et V-14.

### V.2.5 Multi-Tank Model couplé au filtre de Kalman (MTM-FK)

Le Multi-Tank Model a été aussi couplé au filtre de Kalman dans l'objectif d'enlever le bruitage dû aux erreurs (mesures, systèmes) et d'améliorer la performance de simulation.

Nous allons utiliser une calibration manuelle (Trial & Error) pour le calage, en faisant des tâtonnements sur les valeurs initiales des paramètres de chaque simulation d'une façon à rendre les critères d'évaluation plus performants.

La méthode de calibration se fait en quatre étapes :

- En premier, on introduit le vecteur d'état initial en utilisant les paramètres optimisés du Multi-Tank Model sans filtre de Kalman.
- On optimise les matrices de covariance ( $P(0|0)$ ,  $M(k)$ ,  $R(k)$ ) du filtre de Kalman initialement, On peut changer ces paramètres lors de calibration pour améliorer le résultat.
- On optimise les coefficients de proportion de surface de chaque série.
- On optimise le vecteur d'état initial  $X(0|0)$ , en premier, on s'intéresse aux paramètres de ruissellement, d'infiltration et les hauteurs des orifices latérales, puis les valeurs du stockage initial.

Le vecteur initial d'état, et les matrices de covariance initiales retenus sont ceux pour lesquels les critères d'efficacité sont optimaux.

Le Multi-Tank Model couplé au filtre de Kalman sera noté par « MTM-FK »

On va utiliser le Multi-Tank Model de 2 réservoirs par série pour simplifier la calibration.

Pour la modélisation Pluie-Débit du bassin versant de Zardezas, les valeurs des matrices de covariance ont été calibrées pour les valeurs suivantes :

- $R(k) = 0.0001$
- $M(k) = 10^{-4} \cdot I$  avec  $I$  : la matrice identité de taille (24\*24)
- Les  $\sigma$  de  $P(0|0)$  qui correspond à chaque paramètre dans le vecteur d'état sont de forme  $\sigma_i = [\sigma_{Ai1}, \sigma_{Ai2}, \sigma_{Ai3}, \sigma_{Bi1}, \sigma_{Bi2}, \sigma_{Ci1}, \sigma_{Ci2}, \sigma_{Ci3}]$  Avec  $i$  : l'indice de la série

$$\sigma_1 = [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.1 \ 3 \ 3 \ 3]$$

$$\sigma_2 = [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.1 \ 3 \ 3 \ 3]$$

$$\sigma_3 = [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.1 \ 0.1 \ 3 \ 3 \ 3]$$

Les coefficients des proportions de surface de bassin de chaque série sont calibrés à :

**Tableau V.8: Les proportions des séries de MTM pour bassin de Zardezas**

Série	1	2	3
Proportion	0.3	0.2	0.5

En suivant la notation montrée par la Figure II-7, on a 3 séries à 2 réservoirs, donc les valeurs des paramètres optimisés du Multi-Tank Model sont les suivants :

$$x_i = [A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, B_{i1}, B_{i2}, C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}] \quad \text{Avec } i : \text{l'indice de la série}$$

$$x_1 = [0.21 \ 0.08 \ 0.64 \ 0.13 \ 0 \ 25 \ 0 \ 3]$$

$$x_2 = [0.5 \ 0 \ 0.69 \ 0.003 \ 0 \ 110 \ 13 \ 20]$$

$$x_3 = [0.27 \ 0.03 \ 0.004 \ 0.2 \ 0 \ 68 \ 3 \ 30]$$

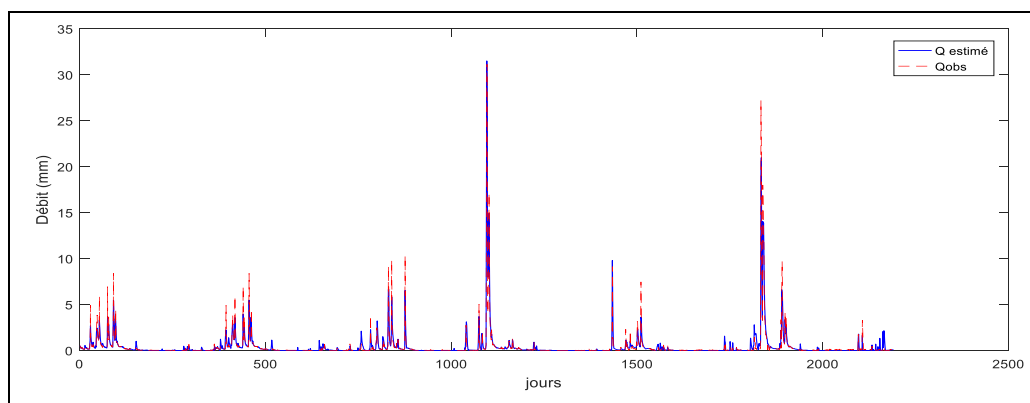
Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.9: Résultats des performances du (MTM-FK), (Zardezas)**

Critères d'évaluations	Estimation		Prédiction	
	NSE	<b>0.92</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.82</b>
RSR	<b>0.28</b>	<b>Très bon</b>	<b>0.43</b>	<b>Très bon</b>
PBIAS (%)	<b>-5.2</b>	<b>Bon</b>	<b>-4.5</b>	<b>Très bon</b>

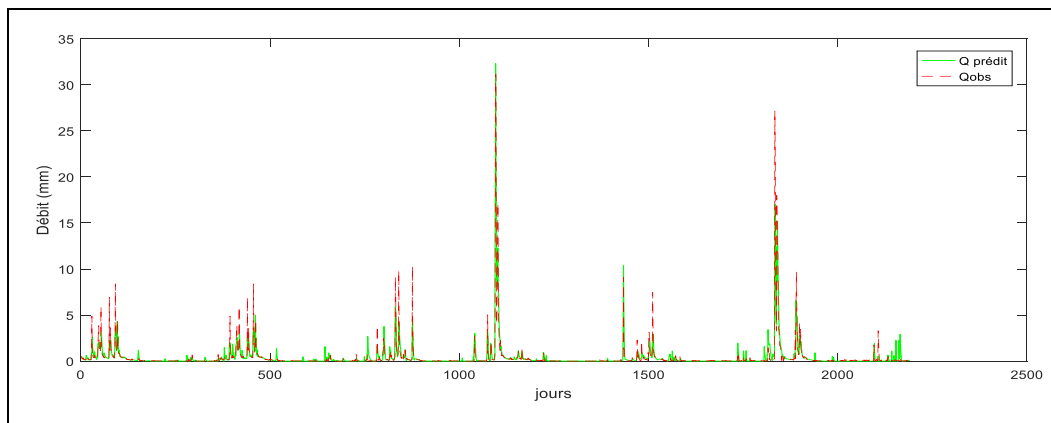
D'après ces résultats, on peut dire que pour les critères numériques :

- le NSE et le RSR sont très bons, que ce soit en estimation ou en prédiction.
- Le PBIAS indique une amélioration de la performance du modèle de la phase estimation à celle de prédiction. On constate aussi une surestimation des valeurs par le modèle que ce soit en estimation ou en prédiction, ce résultat devient intéressant surtout lorsqu'on s'intéresse à la prédiction des débits de crues.



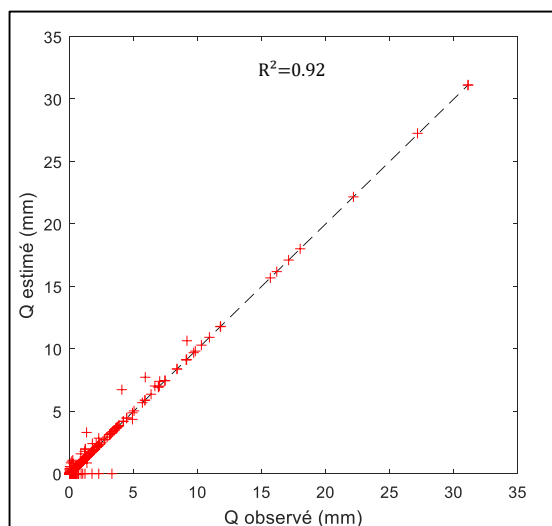
**Figure V-17: Evolution du débit en estimation de (MTM-FK), -Zardezas-**



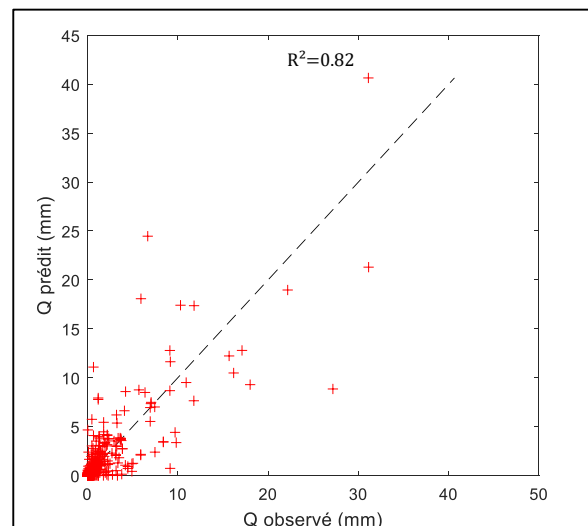


**Figure V-18: Evolution du débit en prédiction de (MTM-FK), -Zardez-**

D'après ces deux figures, on note que le modèle reproduit fidèlement l'allure des valeurs observées, avec une surestimation d'une partie des pics que ce soit en phase d'estimation ou de prédiction, validant ainsi les résultats des critères numériques.



**Figure V-19 : Q-Q plot estimation (MTM-FK), -Zardez-**



**Figure V-20 : Q-Q plot en prédiction (MTM-FK), -Zardez-**

On remarque d'après ces deux figures, qu'en phase d'estimation, le nuage de points des débits est bien collé à la première bissectrice, ce qui dénote une parfaite reproduction des valeurs observées, par le modèle développé, alors qu'en phase de prédiction, le nuage de points des débits est bien réparti de part, et d'autre de la première bissectrice, et que ce sont les faibles débits qui sont bien reproduits par le modèle.

## V.3 Application au bassin versant de Djemorah

### V.3.1 Modèle GR4J

La démarche utilisée pour le bassin versant de Zardezas a été adoptée pour le bassin de Djemorah, à savoir, la concomitance des données retenues (4 années d'observation dans ce cas pour les trois variables, P, Q, et ETP).

La série temporelle est divisée en deux sous échantillons, 3 années pour le calage et une année pour la validation.

Les paramètres optimaux de modèle obtenu par calage:

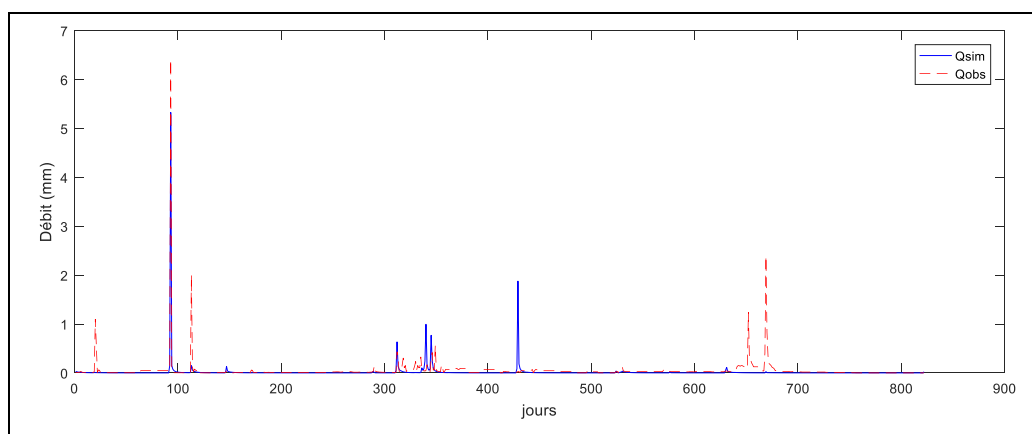
- X1 : Capacité max. du sol : 100 mm,
- X2 : Echange souterrain : 0.32,
- X3 : Capacité du réservoir routage : 4 mm,
- X4 : Temps de montée de l'hydrogramme de crue unitaire : 1,2 jour.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant:

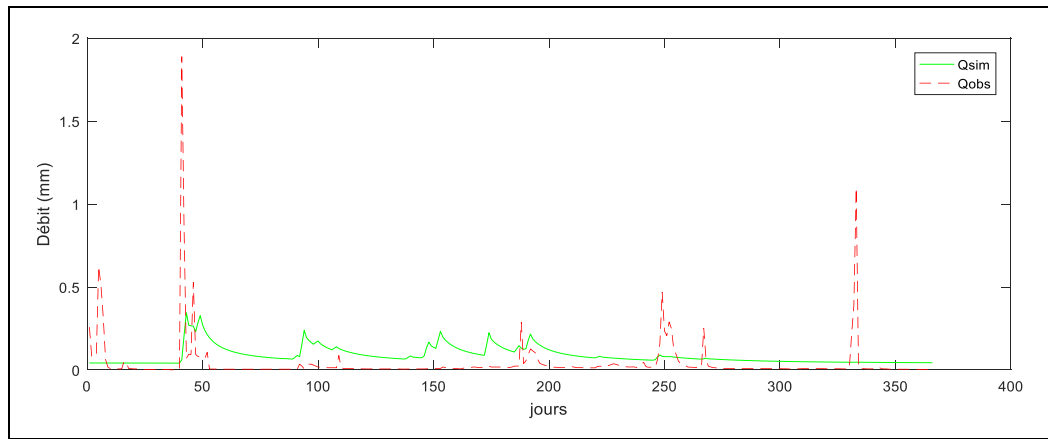
**Tableau V.10: Résultats des performances du modèle GR4J (Djemorah)**

Critères d'évaluations	Calage		Validation	
NSE	<b>0.13</b>	<b>Insatisfaisant</b>	<b>-0.21</b>	<b>Insatisfaisant</b>
RSR	<b>0.93</b>	<b>Insatisfaisant</b>	<b>1.10</b>	<b>Insatisfaisant</b>
PBIAS (%)	<b>-42</b>	<b>Insatisfaisant</b>	<b>-120</b>	<b>Insatisfaisant</b>

D'après ce tableau, on remarque que les résultats obtenus, pour les différents critères numériques, sont insatisfaisants.

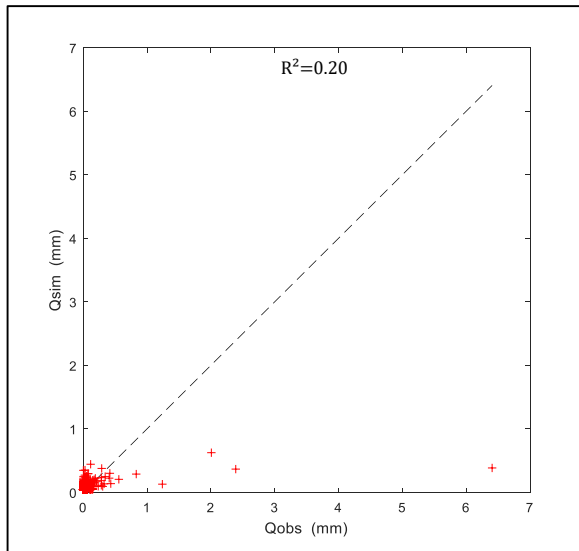


**Figure V-21: Evolution du débit en période de calage du modèle GR4J -Djemorah-**

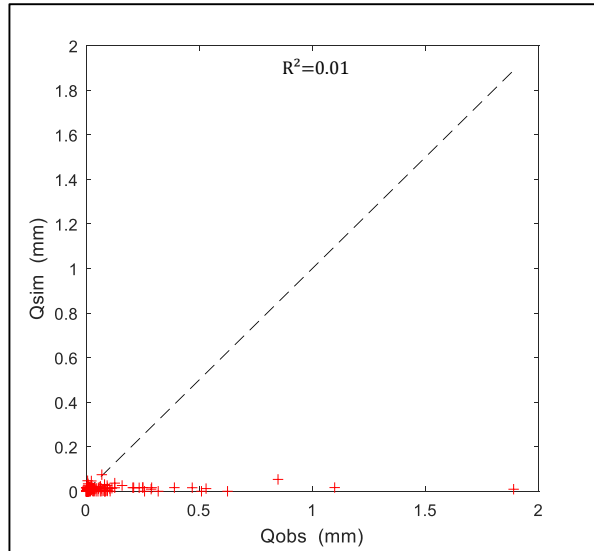


**Figure V-22: Evolution du débit en période de validation du modèle GR4J -Djemorah-**

Il est à noter que le modèle GR4J, n'arrive pas à simuler les débits observés, que ce soit en calage ou en validation, puisque d'après les deux figures ci-dessus, le modèle est incapable de reproduire l'allure de la courbe d'évolution des débits observés, ainsi leurs pics.



**Figure V-23: Q-Q plot en période de calage du modèle GR4J, -Djemorah-**



**Figure V-24: Q-Q plot en période de validation du modèle GR4J, -Djemorah-**

Dans les figures V-23 et V-24, on remarque que les débits simulés sont très faibles, et se regroupent majoritairement autour de l'origine, et sont très loin de la première bissectrice, pour les deux phases, ce qui veut dire que le modèle GR4J, n'arrive pas à reproduire les événements observés, ce qui corrobore les résultats des critères numériques et des figures V-21 et V-22.

Vu la mauvaise qualité des résultats obtenus, nous avons voulu tester les modèles appliqués au bassin versant de Zardeszas, pour éventuellement mieux modéliser les événements journaliers dans un climat aride ou semi-aride, surtout que ces événements deviennent extrêmes dans les régions sahariennes.

On a commencé par modéliser les données du bassin versant de Djemorah, par les modèles TM et MTM, malheureusement les résultats obtenus sont restés toujours insatisfaisants voir médiocres.

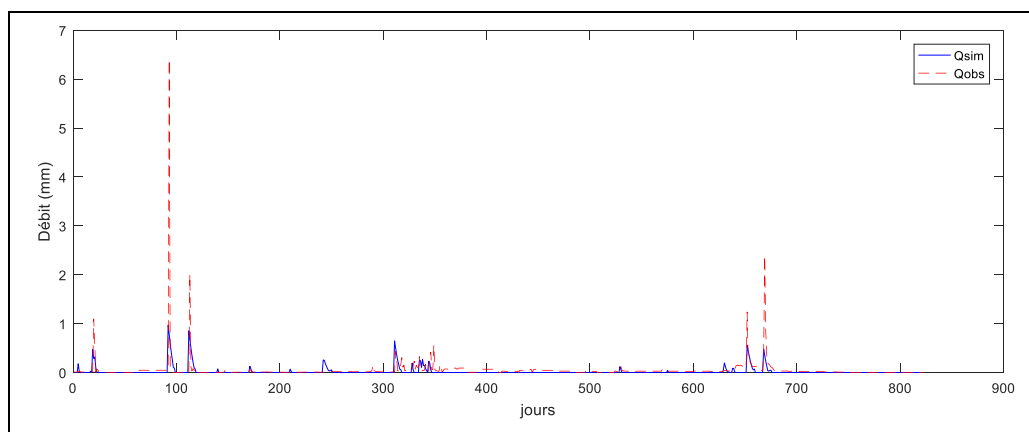
Dans le tableau suivant, on a résumé respectivement les résultats des modèles TM et MTM :

**Tableau V.11 : Résultats des performances des modèles TM et MTM**

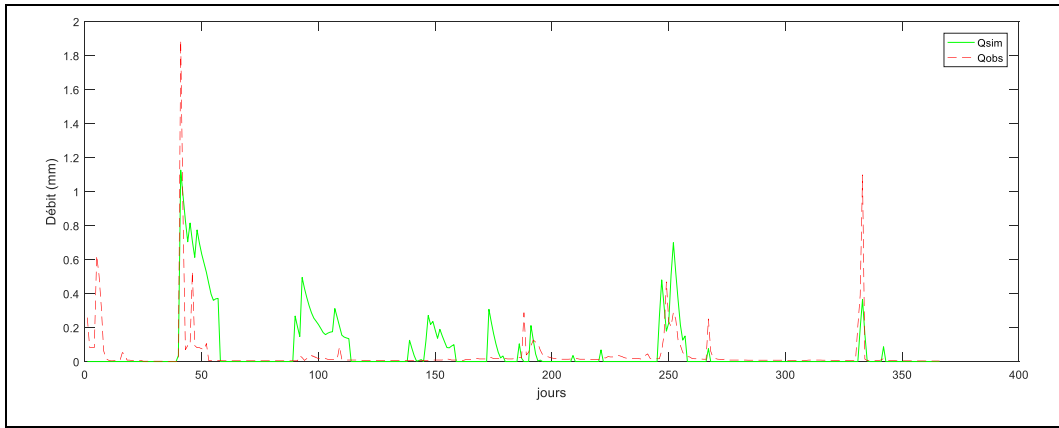
	Calage			Validation		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
TM	<b>0.21</b>	<b>0.89</b>	<b>60</b>	<b>-0.26</b>	<b>1.13</b>	<b>-73</b>
MTM	<b>0.39</b>	<b>0.78</b>	<b>54.1</b>	<b>-0.20</b>	<b>1.10</b>	<b>3</b>
<b>Très bon ; Bon ; Satisfaisant ; Insatisfaisant</b>						

Les résultats des modèles TM et MTM sont insatisfaisants, sauf pour le PBIAS ou ils sont très bons en période de validation avec une sous-estimation des valeurs simulées.

Les Figures suivantes présentent respectivement l'évolution des débits en période de calage et de validation des modèles TM et MTM :

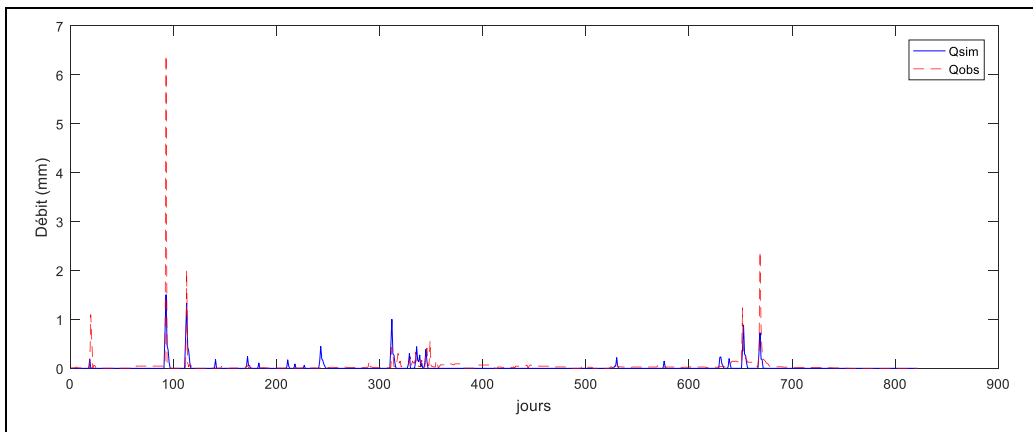


**Figure V-25: Evolution du débit en période de calage du TM -Djemorah-**

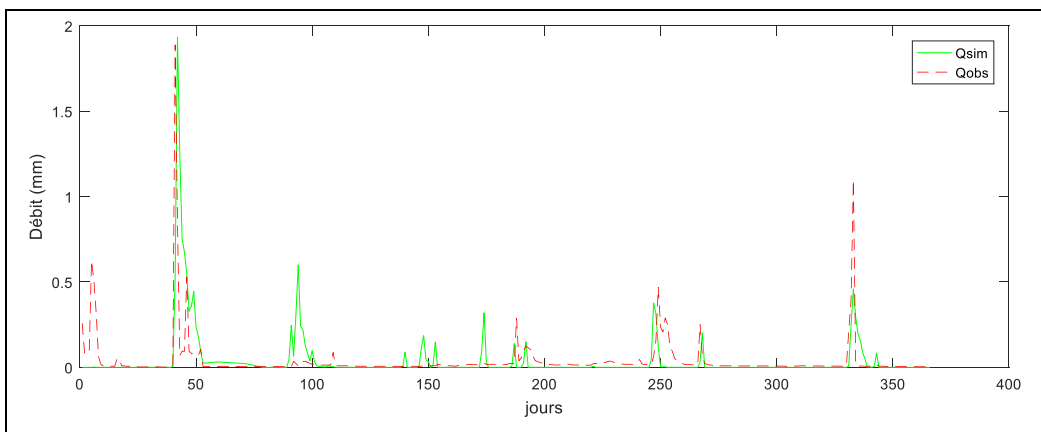


**Figure V-26 : Evolution du débit en période de validation du TM  
-Djemorah-**

Il est à noter que le modèle TM, n'arrive pas à simuler les débits observés, que ce soit en calage ou en validation, puisque d'après les figures ci-dessus, le modèle est incapable de reproduire l'allure de l'hydrogramme observé et encore moins ses pics.



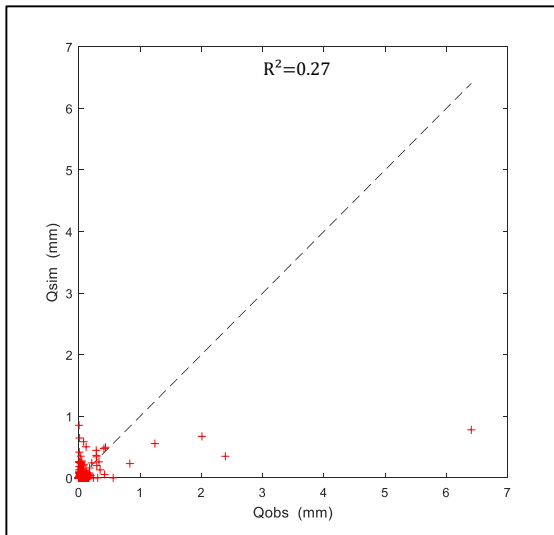
**Figure V-27 : Evolution du débit en période de calage du MTM  
-Djemorah-**



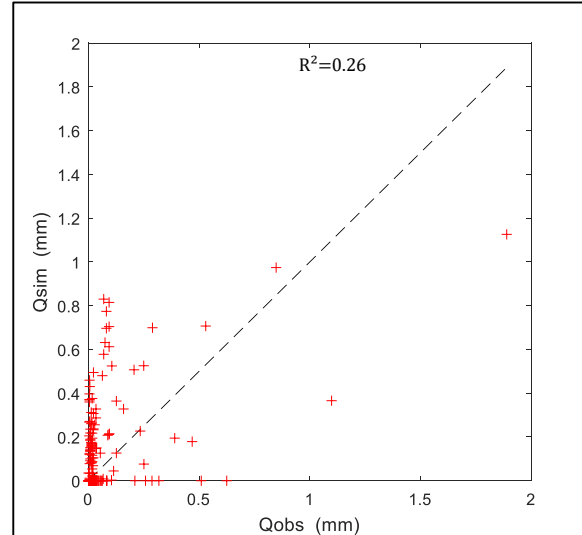
**Figure V-28: Evolution du débit en période de validation du MTM  
-Djemorah-**

Pour le modèle MTM, il arrive tant bien que mal à reproduire les débits observés tout en sous-estimant ses pics en période de calage, alors qu'en validation, on note une légère amélioration dans la reproduction de l'hydrogramme observé avec une surestimation des pics.

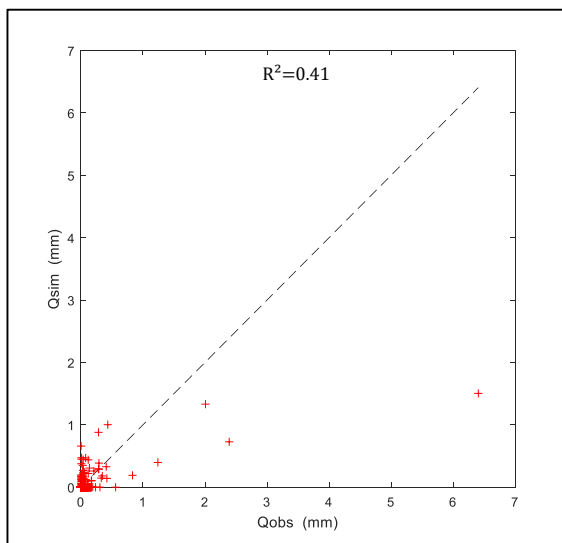
Les figures suivantes présentent respectivement, les Q-Q plot en période de calage et validation des modèles TM et MTM :



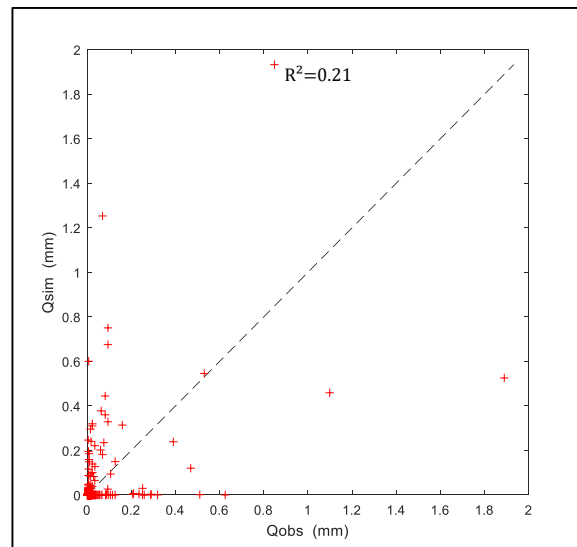
**Figure V-29: Q-Q plot en période de calage du TM, - Djemorah-**



**Figure V-30: Q-Q plot en période de validation du TM, - Djemorah-**



**Figure V-31: Q-Q plot en période de calage du MTM, -Djemorah-**



**Figure V-32: Q-Q plot en période de validation du MTM, -Djemorah-**

Dans ces figures, on remarque que les débits simulés sont très faibles en période de calage pour les deux modèles TM et MTM, avec un regroupement notable des valeurs autour de l'origine. Par contre en validation, on note une nette amélioration des valeurs simulées, pour les deux

modèles TM et MTM deux modèles, avec un éloignement notable du nuage de points des débits par rapport à la première bissectrice, ce qui veut dire que le modèle ne reproduit pas convenablement l'évènement étudié.

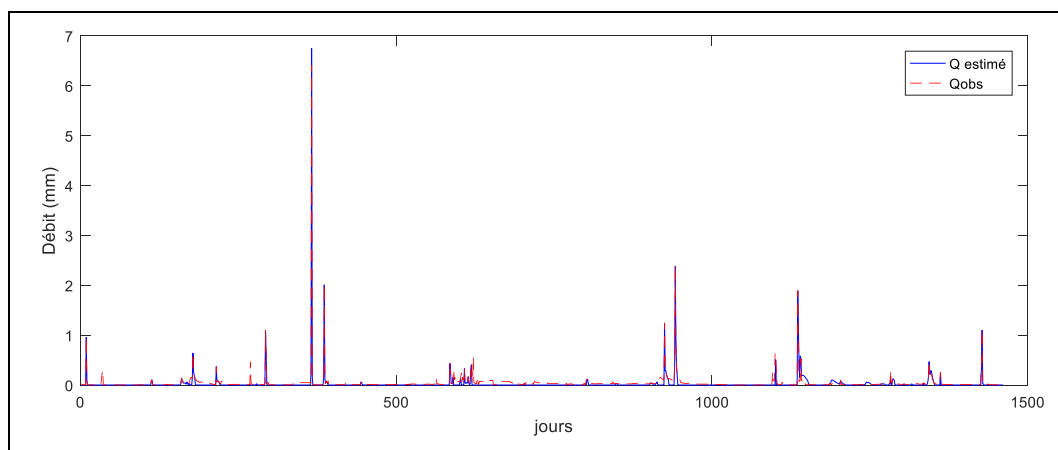
On a par la suite modélisé les données du bassin versant de Djemorah, par les modèles TM-FK et MTM-FK. Les résultats de cette modélisation sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.12: Résultats des performances des modèles TM-FK et MTM-FK**

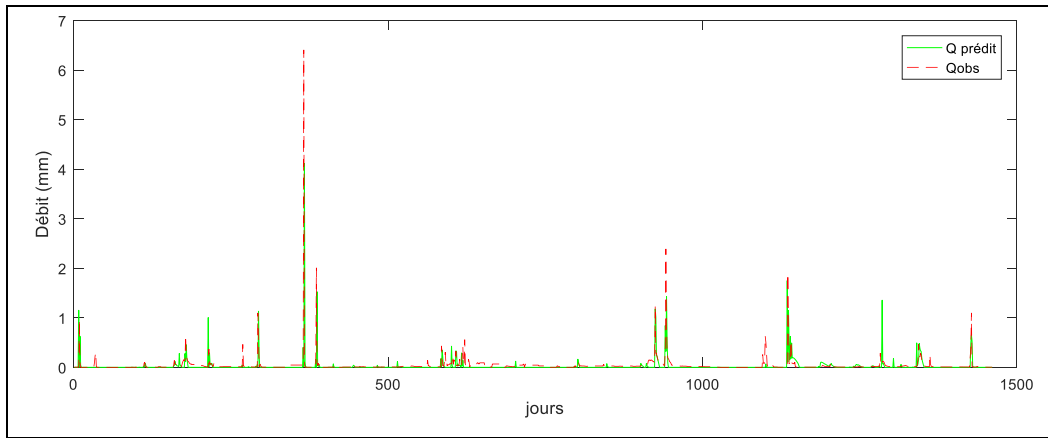
	Estimation			Prédiction		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
TM-FK	0.94	0.24	38	-0.36	1.17	39
MTM-FK	0.52	0.69	1.92	-1.73	1.65	-23
<b>Très bon ; Bon ; Satisfaisant ; Insatisfaisant</b>						

On remarque d'après ces valeurs, que les résultats des modèles, TM et MTM mêmes couplés au filtre de Kalman, restent insatisfaisants en prédiction, par contre en estimation, ils sont très bons pour le TM-FK, et satisfaisants pour le MTM-FK, ceci peut s'interpréter, soit par un sur apprentissage des modèles, soit par une très mauvaise qualité des données pluie-débit.

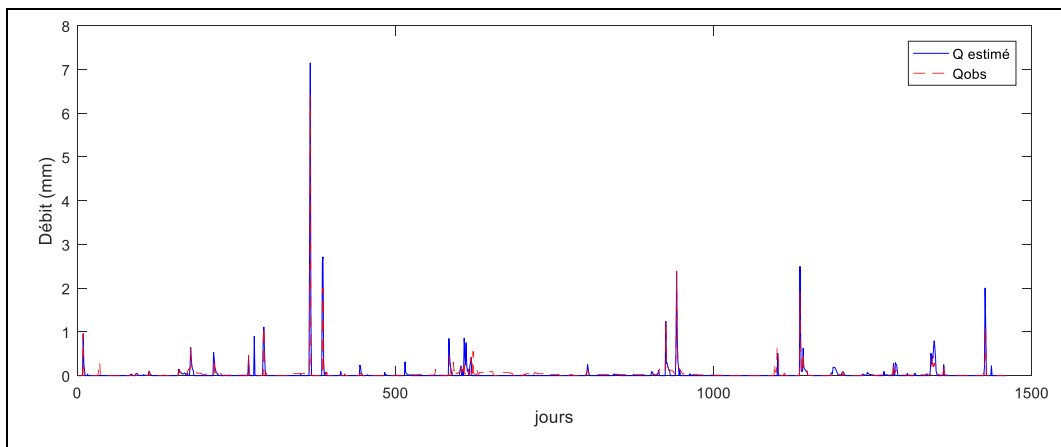
Les figures suivantes présentent l'évolution du débit en estimation et en prédiction des modèles TM –FK et MTM-FK :



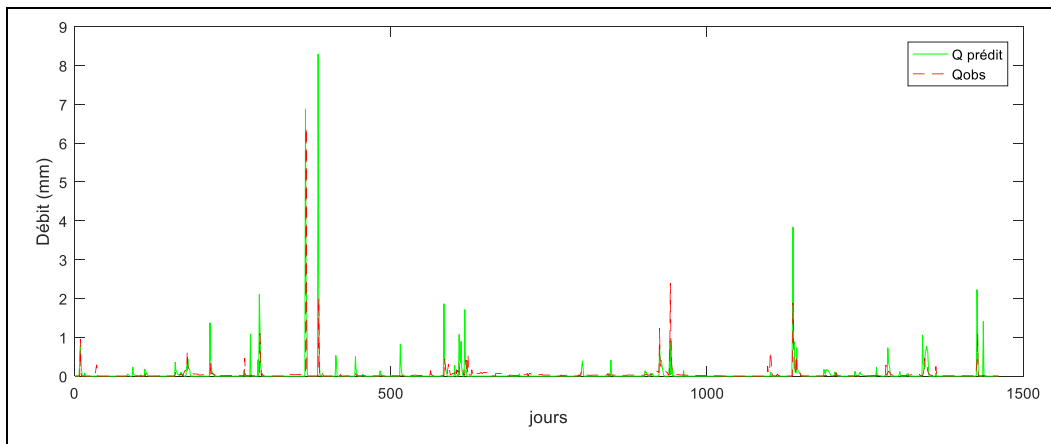
**Figure V-33 : Evolution du débit en estimation du (TM-FK)  
-Djemorah-**



**Figure V-34 : Evolution du débit en prédiction du (TM-FK)  
-Djemorah-**



**Figure V-35 : Evolution du débit en estimation de (MTM-FK),  
- Djemorah-**

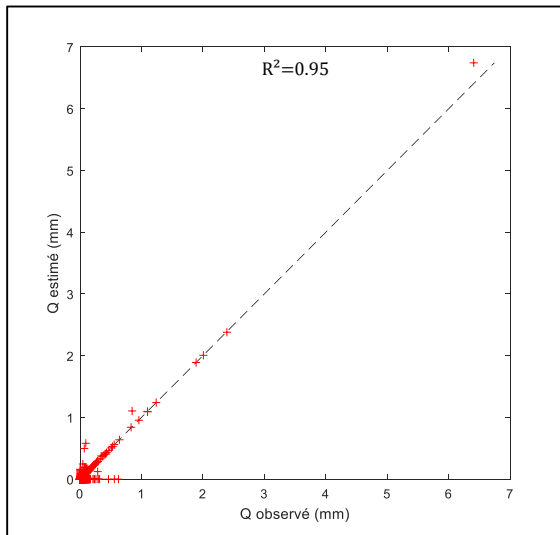


**Figure V-36 : Evolution du débit en prédiction de (MTM-FK),  
- Djemorah-**

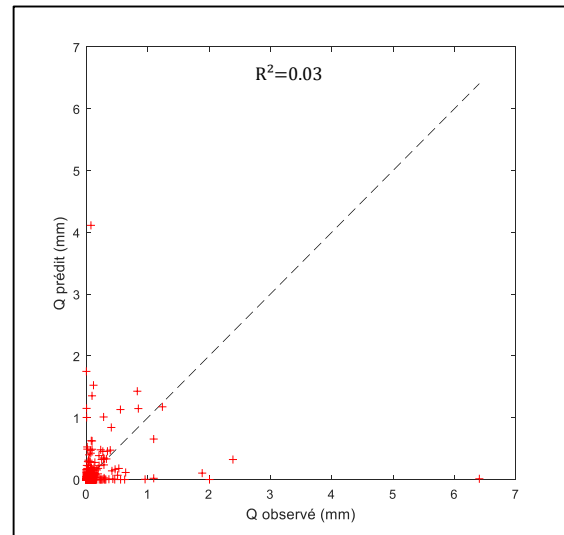


D'après ces figures, on peut dire que les deux modèles TM-FK et MTM-FK, arrivent à reproduire l'hydrogramme des débits observés en phase d'estimation, et échouent en phase de prédiction.

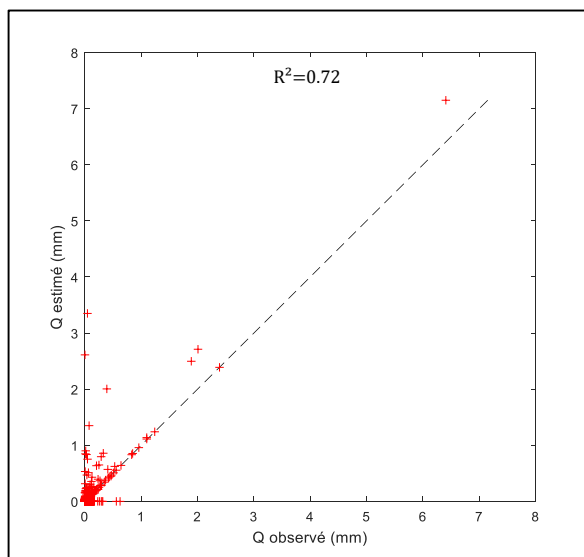
Les figures suivantes présentent les Q-Q plot en phases d'estimation et de prédiction des modèles TM –FK et MTM –FK :



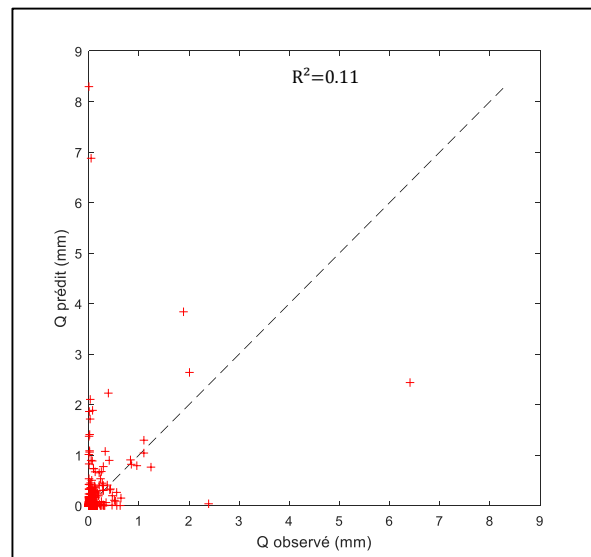
**Figure V-37 : Q-Q plot en estimation (TM-FK), - Djemorah-**



**Figure V-38 : Q-Q plot en prédiction (TM-FK), - Djemorah-**



**Figure V-39 : Q-Q plot en estimation (MTM-FK), - Djemorah-**



**Figure V-40 : Q-Q plot en prédiction (MTM-FK), - Djemorah-**

Les figures V-37 et V-39, représentant la phase d'estimation pour les deux modèles, montrent que les points des débits sont proches de la première bissectrice avec des  $R^2$  significatifs. Par contre, pour les figures V-38 et V-40, représentant la phase de prédiction, on remarque que

même couplé au filtre de Kalman, les modèles TM et MTM, les points des débits sont dispersés, s'éloignent de la première bissectrice, et ce regroupent même autour de l'origine, ce qui confirme les résultats numériques et graphiques trouvés précédemment.

## V.4 Récapitulation et Conclusion

Dans ce chapitre, on a réalisé la modélisation Pluie-Débit sur deux bassins : Zardezas en région humide et Djemorah en région aride, par les modèles : GR, Tank Model, Multi-Tank Model, Tank Model et Multi-Tank Model couplés au filtre de Kalman.

Le tableau suivant, résume les résultats d'évaluation des performances des modèles développés, par le seul critère numérique de Nash Sutcliffe (NSE).

**Tableau V.13: Récapitulation des performances des modèles développés par le critère NSE**

	GR4J	Tank Model	Tank Model FK	Multi-Tank	Multi-Tank FK
Zardezas	Calage <b>0.85</b>	Calage <b>0.80</b>	Estimation <b>0.99</b>	Calage <b>0.86</b>	Estimation <b>0.92</b>
	Validation <b>0.78</b>	Validation <b>0.79</b>	Prédiction <b>0.66</b>	Validation <b>0.80</b>	Prédiction <b>0.82</b>
Djemorah	Calage <b>0.13</b>	Calage <b>0.21</b>	Estimation <b>0.94</b>	Calage <b>0.39</b>	Estimation <b>0.52</b>
	Validation <b>-0.21</b>	Validation <b>-0.26</b>	Prédiction <b>-0.36</b>	Validation <b>-0.20</b>	Prédiction <b>-1.73</b>
<b>Très bon ; Bon ; Satisfaisant ; Insatisfaisant</b>					

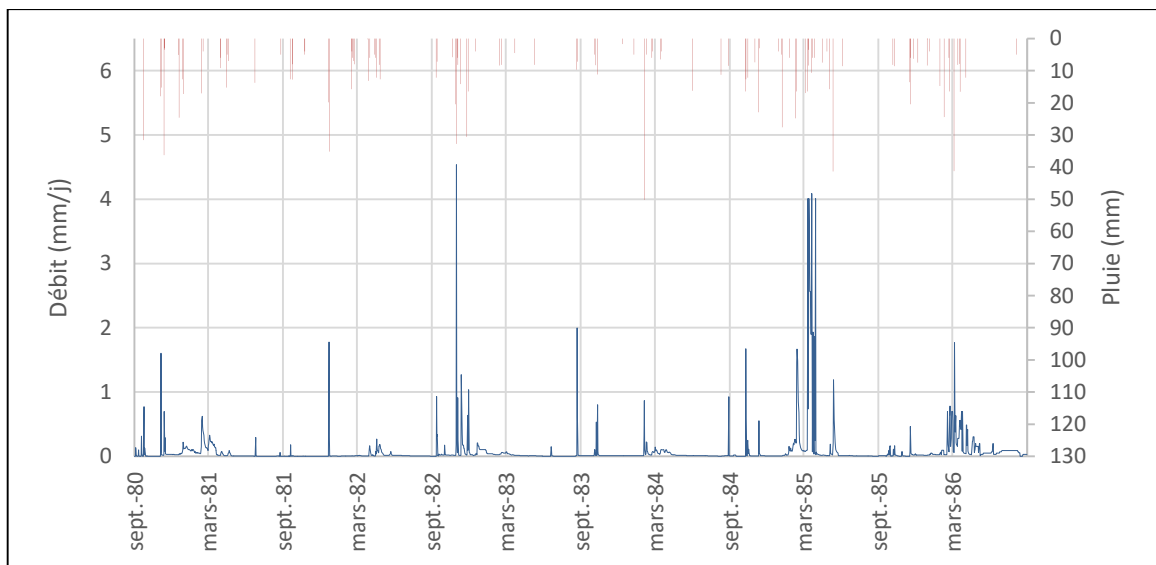
D'après ce tableau, on remarque que les modèles développés ont donnés de bons résultats pour le bassin de Zardezas, que ce soit en calage ou en validation. Par contre pour le bassin de Djemorah les résultats deviennent insatisfaisants, car le modèle GR et Tank Model n'ont pas été développé pour modéliser les bassins des régions arides, quant au Multi Tank Model, malgré que sa structure ait été préconisée par Sugawara pour les régions arides et semi-arides, les résultats obtenus sont restés malheureusement insatisfaisants.

Le couplage des différents modèles développés, au filtre de Kalman, n'ont pas donnés eux aussi de résultats escomptés pour le bassin versant de Djemorah.

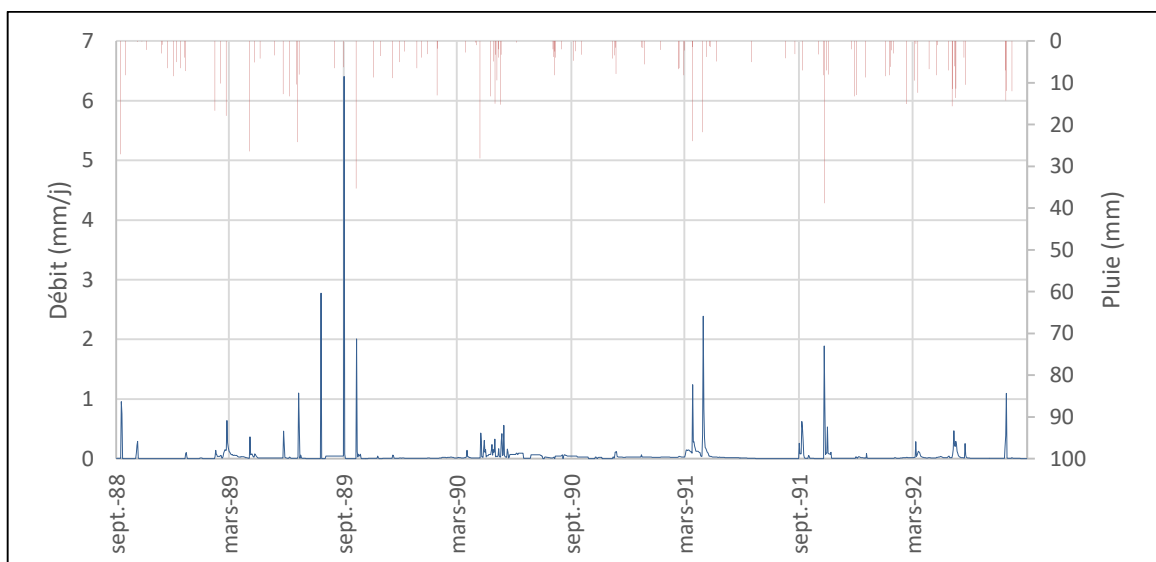
Il est à noter que le calage manuel pour ce type de modèle est laborieux et très difficile à réaliser, avec 39 paramètres à caler pour le vecteur d'état, et 39 autres pour la covariance.

Dans un souci d'améliorer les résultats obtenus, on préconise d'effectuer un calage automatique pour déterminer les différents paramètres du filtre de Kalman, avec des modèles d'optimisation éprouvés, tels que le Shuffled Complex Evolution (SCE) ou le Particle Swarm Optimization (PSO).

En comparant les figures V-41 et V-42, de l'évolution des débits à celle des pluies pour les deux échantillons du bassin versant de Djemorah, on note qu'il n'y a aucune concordance entre l'allure des deux phénomènes, avec un décalage significatif entre les pics des débits et ceux des averses, de ce fait, on peut aussi expliquer la mauvaise qualité des résultats, par la non fiabilité des données observées, utilisées dans la modélisation.



**Figure V-41 : Evolution de Débit et Pluie (80-86)  
- Djemorah-**



**Figure V-42 : Evolution de Débit et Pluie (88-92)  
- Djemorah-**

# Conclusion Générale

L'objectif essentiel de ce mémoire est d'évaluer les qualités des modèles développés, et de les appliquer à deux bassins versants de climats différents en Algérie, caractérisés par une forte variabilité annuelle et interannuelle de pluies et de débits. Les deux bassins versants sont celui de Djemorah en zone semi-aride connue par les crues éclair et celui de Zardezas en zone humide de climat tempéré.

En premier lieu, on a appliqué le modèle GR4J sur les deux bassins, on a obtenu de bons résultats pour le bassin de Zardezas, mais des résultats non acceptables pour le bassin de Djemorah. Les mêmes résultats ont été obtenus pour le Tank Model.

Pour le bassin de Djemorah, le Multi-Tank Model a été aussi appliqué, mais malheureusement les résultats sont également restés insatisfaisants. Par contre, pour le bassin versant humide de Zardezas, les résultats obtenus sont jugés bons par les critères d'évaluation. On peut alors prétendre à la généralisation de ce modèle aux zones humides.

Afin de perfectionner les résultats, le Tank Model et le Multi-Tank Model, ont été couplé au filtre de Kalman. Les résultats obtenus sont, aussi, parfaits pour le bassin versant de Zardezas, et insatisfaisants pour Djemorah. Ces résultats négatifs de la modélisation du bassin versant de Djemorah sont certainement dus à la mauvaise qualité des données observées au niveau de ce bassin.

En perspective, on suggère :

- La discrétisation du bassin versant objet de l'étude, en sous-bassins parallèles.
- De recourir au calage automatique, pour la détermination des paramètres du modèle, par l'utilisation des algorithmes d'optimisation (ex : Shuffled Complex Evolution, ou Particle Swarm Optimization).

# BIBLIOGRAPHIE

- AMIRECHE, M. Modélisation de la relation pluie-débit à différents pas de temps par les modèles conceptuels, neuroflous et par le filtre de Kalman. Thèse de doctorat: Génie civil. Ouergla: Kasdi Merbah, 2019, 192p.
- BENKACI, A. Modélisation pluie-debit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous (application aux bassins algériens). Thèse de doctorat: Sciences Agronomiques. EL-Harrach, Alger: INA, 2006, 222p.
- BERTHIER, E. AND T. TOUTIN SPOT5-HRS digital elevation models and the monitoring of glacier elevation changes in North-West Canada and South-East Alaska. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5), 2443-2454, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.11.004>.
- HIGY, C. Modélisation conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques: application au bassin versant de la Haute-Mentue. Thèse de doctorat: EPFL, 2000, 300p.
- HINGRAY, B., C. PICOUET AND A. MUSY *Hydrologie: Tome 2, Une science pour l'ingénieur*. Edition ed.: PPUR presses polytechniques, 2009. ISBN 2880747988.
- LEE, Y. AND V. SINGH Tank model using Kalman filter. *Journal of hydrologic engineering*, 1999, 4(4), 344-349, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:4\(344\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:4(344)).
- MEBARKI, A. Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat: AMENAGEMENT DU TERRITOIRE. Constantine: Université Mentouri, 2005, 372p.
- MOULAHOU, A. W. Etude de Performance de deux Algorithmes d'Optimisation Globale : Le Shuffled Complex Evolution (SCE) et l'Algorithme Génétique fGAI. *Memoire de master: Hydraulique*. Alger: Ecole National Polytechnique, 2016, 146p.
- N. MORIASI, D., J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGNER, et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3), 885-900, <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- N. MORIASI, D., M. W. GITAU, N. PAI AND P. DAGGUPATI Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58(6), 1763-1785, <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- PERRIN, C., C. MICHEL AND V. ANDRÉASSIAN Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 2007, 16, [https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Modeles\\_GR\\_Resume.pdf](https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Modeles_GR_Resume.pdf).

SINGH, V. P. Hydrologic modeling: progress and future directions. *Geoscience Letters*, 2018, 5(1), 1-18, <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z>.

SUGAWARA, M. Automatic calibration of the tank model. *Hydrological sciences journal*, 1979, 24(3), 375-388, <https://doi.org/10.1080/02626667909491876>.

SUGAWARA, M. Tank Model, For the Derivation of River Discharge from Rainfall. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 1985, 94(4), 209-221, [https://doi.org/10.5026/jgeography.94.4\\_209](https://doi.org/10.5026/jgeography.94.4_209).

YTOUI, Y. Modélisation de la relation pluie-débit aux pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et neuroflous (Application au bassin versant de l'ISSER). *Memoire d'ingeniorat: Hydraulique*. Alger: Ecole National Polytechnique, 2012, 95p.