

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



**Département Hydraulique
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement**

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 le Tank Model, couplé au filtre de Kalman.
Application au bassin versant de BOUCHEGOUF
(Wilaya de GUELMA)**

Abdelkader IZERROUKYENE

Sous la direction du **M. Abdelmalek BERMAD**

Codirigé par **M. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu publiquement le 17/06/2017

Composition du Jury :

<i>Président</i>	M. Abderrahim BALI	Professeur	ENP
<i>Promoteur (s)</i>	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
	M. Mohamed AMIRECHE	MAA	U-OEB
<i>Examineur</i>	M. Abdelouaheb LEFKIR	MCA	ENSTP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



**Département Hydraulique
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement**

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 le Tank Model, couplé au filtre de Kalman.
Application au bassin versant de BOUCHEGOUF
(Wilaya de GUELMA)**

Abdelkader IZERROUKYENE

Sous la direction du **M. Abdelmalek BERMAD**

Codirigé par **M. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu publiquement le 17/06/2017

Composition du Jury :

<i>Président</i>	M. Abderrahim BALI	Professeur	ENP
<i>Promoteur (s)</i>	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
	M. Mohamed AMIRECHE	MAA	U-OEB
<i>Examineur</i>	M. Abdelouaheb LEFKIR	MCA	ENSTP

Dédicaces

A mes très chers parents. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours soutenu dans mes efforts. Ma mère, la plus belle étoile qui puisse exister dans mon univers, avec son amour m'a procuré un nid de sécurité et de sérénité dont j'avais besoin dans les moments de doute. Mon père, mon ami, le meilleur de tous les pères, une vraie école de la vie, je ne cesse d'apprendre tous les jours avec lui. Il a fait de moi un homme de qualité, aux horizons illimités.

Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir. C'est grâce à eux que je suis ce que je suis maintenant Leur bonté, Leur éducation et leur patience m'ont guidé tout au long de ma vie. Ils me redonnent mes ailes lorsque ma vie est souvent trop superficielle. J'aurais pris le mauvais chemin s'ils ne m'avaient pas tenu par la main et, depuis, chaque jour je m'efforce de leur montrer pourquoi ils ont raison d'avoir foi en moi.

Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude. Je ne pourrais les remercier assez...que Dieu les protège !

Il ne nous est pas souvent donné l'occasion de remercier les personnes qui nous sont chères et qui ont une influence sur nos pensées et plus généralement sur notre vie. Je tiens donc à adresser ici mes salutations sincères à tous les membres de ma famille, mon frère Mounir, ma sœur Marwa, mon cousin Abdes, à tous qui m'ont encouragé à un moment ou à un autre et qui y ont participé chacun à sa manière.

A mes très chers fidèles amis : Zaki, Amine O, Amine H, Sohaib, Mehdi, Rafik, Yassin, etc. je ne saurais comment vous remercier, votre attention, votre présence, et votre disponibilité me font chaud au cœur.

A mes amis de ma promotion ENP 2017 : Yassin, Rafik, Amine, Abdou, Youcef, Akhina, Sofiane, les deux Mehdi, Aimen, Mohbraydji, Brahim, Rania, Imene, Imene H, Lamia, Lamia C, Lilo, Zineb, Houda, Hidayette, Bouchra, ainsi la secrétaire Madame Mouna. Nos moments uniques et inoubliables resteront gravés dans ma mémoire.

Que ce travail apporte la fierté méritée à vous !

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout Puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la volonté Durant tout mon cursus des études et de m'avoir aidé à réaliser mon travail, je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade d'étude, que dieu m'aide à les honorer, les servir et les combler.

Je tiens à remercier mon encadreur M. Abdelmalek Bermad pour le soutien qu'il m'a offert et la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années. Son contact a d'ailleurs été très enrichissant tant au niveau humain qu'au niveau de mon travail. Il peut être assuré de mon sincère respect et de ma profonde gratitude. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse toute ma reconnaissance.

Je présente mes remerciements aussi à M. Mohamed Amireche, pour son aide, ses conseils et sa contribution à 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 ma modeste contribution à la bibliothèque scientifique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je remercie tous les enseignants sérieux qui transpirent honorablement chaque jour afin de nous fournir les outils techniques et humains pour qu'on puisse s'améliorer.

Je remercie tous les personnes qui m'ont aidé pour arriver à ce que je suis aujourd'hui.

ملخص

نمذجة العلاقة بين الأمطار والتدفق عن طريق النماذج المفاهيمية دائما ما كانت موضوع رائع لعلماء المياه نظرا لأهميتها العملية وتعقيدها. تهتم دراستنا بالحوض المائي لبوشغوف اعتمادا على التوقيت اليومي.

ينقسم العمل إلى قسمين، تم في القسم الأول اختبار نموذج الخزان فقط عن طريق المعايير اليدوية، وقد أعطى نتائج غير مرضية.

في الجزء الثاني، تم اختبار و تطوير نموذج الخزان باستخدام مرشح كالمان من أجل إيجاد حل لمشكلة الضوضاء. وقد أعطى هذا الاقتران نتائج ممتازة، و من جهة اخرى أظهر أيضا قدرة هذا المرشح على تحسين أداء النموذج.

أخيرا، و وفقا للنتائج المستخلصة، تم حذف الخزان الرابع لأنه لا يساهم في محاكاة التدفق.

كلمات البحث : مرشح كالمان، نمذجة الأمطار-التدفق، نموذج الخزان، بوشغوف

Abstract

Modeling the rainfall-runoff relationship with conceptual models has always been a fascinating subject for hydrologists in view of its practical importance and complexity. Our study is interested by the watershed of Bouchegouf for a daily time step.

This work is shared into two parts, at the first one, the simple Tank Model has been tested with a manual calibration, and this model gave us bad results.

In the second part, the Tank Model using the Kalman filter has been developed in order to find a solution to noise problem. This coupling gave excellent results, and it showed too the capacity of this filter to ameliorate model performance.

Finally, from the results obtained, the fourth reservoir was eliminated because it doesn't contribute in runoff simulation.

Key words : Kalman filter, Rainfall-Runoff Modeling, Tank Model, Bouchegouf

Résumé

La modélisation de la relation pluie-débit par les modèles conceptuels était toujours un sujet fascinant pour les hydrologues à cause de son importance pratique et sa complexité. Notre étude s'intéresse au bassin versant de Bouchegouf pour un pas de temps journalier.

Ce travail se partage en deux parties, la première a été consacré au Tank Model simple où il a été testé par une calibration manuelle, et a donné des résultats insatisfaisants.

Dans la deuxième partie, le Tank Model est couplé au filtre de Kalman qui a été développé dans le but de trouver une solution pour le problème de bruit. Ce couplage a donné des excellents résultats, et a montré également la capacité de ce filtre à améliorer la performance du modèle.

Enfin, en se basant sur les résultats trouvés, le quatrième réservoir a été éliminé car il ne contribue pas dans la simulation des débits.

Mots clés : Filtre de Kalman, Modélisation pluie-débit, Tank Model, Bouchegouf

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....	13
Chapitre 1 . MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	15
1. Introduction.....	16
2. C'est quoi la modélisation hydrologique.....	16
2.1. Définition d'un modèle.....	16
2.2. Processus hydrologique.....	17
2.3. Les échelles d'analyse.....	18
3. Classification des modèles hydrologiques.....	18
3.1. Classification selon le mécanisme.....	19
3.2. Classification selon l'approche mathématique.....	21
3.3. Classification spatiale.....	21
3.4. Classification temporelle.....	22
4. Paramétrisation des modèles.....	23
4.1. Calage des modèles.....	23
4.2. Validation des modèles.....	24
4.3. Difficultés.....	24
5. Variables des modèles.....	25
6. Critères d'efficacité des modèles.....	26
6.1. Critères graphiques.....	26
6.2. Critères numériques.....	26
6.3. Intervalles d'efficacité des modèles.....	29
7. Applications de la modélisation pluie débit.....	29
8. Conclusion.....	30
Chapitre 2 . MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE MODELE CONCEPTUEL (TANK MODEL)	31
1. Introduction à la modélisation conceptuelle (à réservoirs).....	32
2. Présentation générale du Tank Model.....	32

2.1. Tank Model pour les régions humides	32
2.2. Tank Model composé pour les régions arides.....	37
2.3. Calibration du Tank Model.....	39
3. Mise en œuvre du modèle.....	43
4. Applications des modèles conceptuels	46
5. Conclusion.....	47
Chapitre 3 . FILTRE DE KALMAN.....	48
1. Introduction.....	49
2. Présentation du filtre de Kalman	50
3. Fonctionnement du filtre de Kalman.....	52
4. Couplage du Tank Model au Filtre de Kalman	55
5. Filtre de Kalman Étendu (Extended) pour les systèmes non linéaires	58
6. Application du filtre de Kalman.....	59
6.1. Dans les divers domaines	59
6.2. En hydrologie	60
7. Conclusion.....	61
Chapitre 4 . PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	62
1. Introduction.....	63
2. Description du bassin versant.....	64
2.1. Climat	66
2.2. Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant.....	67
2.3. Caractéristiques morphométriques du bassin versant.....	68
3. Données Utilisées	69
3.1. Données hydrométriques.....	70
3.2. Données pluviométriques	72
3.3. Données de l'évapotranspiration potentielle	74
4. Critiques des données.....	75
4.1. Comblement de lacunes	75
4.2. Détection des valeurs singulières.....	76
5. Conclusion.....	78
Chapitre 5 . RESULTATS ET DISCUSSION	79
1. Introduction.....	80
2. Modélisation Pluie-Débit par le Tank Model	81

3. Modélisation Pluie-Débit par le couplage Tank Model au filtre de Kalman	84
4. Modèle adopté	103
5. Conclusion.....	104
CONCLUSION GENERALE.....	105
Bibliographie	107

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Intervalles d'appréciation des critères de validation	29
Tableau 4-1: Type du climat selon DE MARTONNE.....	67
Tableau 4-2 : Indice annuel d'aridité de la station de Bouchegouf [14]	67
Tableau 4-3 : Caractéristiques morphométriques du bassin d'Oued Mellah à la station de Bouchegouf d'après (A.N.R.H), Mebarki (2005).....	69
Tableau 4-4 : Coordonnées géographiques de la station hydrométrique de Bouchegouf [12].....	71
Tableau 4-5 : Coordonnées géographiques de la station pluviométrique de Bouchegouf [14].....	72
Tableau 4-6 : Statistiques descriptives des données d'Oued Mellah, Bouchegouf.....	75
Tableau 5-1 : Valeurs initiales des paramètres du Tank Model pour le bassin de Bouchegouf	82
Tableau 5-2 : Résultats de calage et validation par le Tank Model simple	82
Tableau 5-3 : Valeurs initiales des paramètres du modèle par le couplage Tank Model au filtre de Kalman.....	87
Tableau 5-4 : Résultats de calage et validation par le couplage Tank Model au filtre de Kalman.....	88
Tableau 5-5 : Taux de performance de calage et validation pour le couplage Tank Model au filtre de Kalman.....	88

Liste des figures

Figure 1-1 : Relation entre les modèles Pluie – Débit selon Berthier	19
Figure 2-1 : Représentation générale du Tank Model simple [19]	33
Figure 2-2 : Schéma représentant les types d'écoulement dans le modèle à réservoirs selon Setiawan et al. en 2013.....	33
Figure 2-3 : Différents cas du Tank Model [19]	34
Figure 2-4 : Le Tank Model pour l'étude des crues [19]	35
Figure 2-5 : Un Tank Model linéaire simple [19]	36
Figure 2-6 : Tank Model indiquant le stockage [19]	36
Figure 2-7 : La présentation de la sortie $y(t)$ en fonction exponentielle [19].....	37
Figure 2-8 : Division du Tank Model en plusieurs zones différentes [19]	38
Figure 2-9 : Structure générale du Tank Model dans les régions arides [19].....	38
Figure 2-10 : Tank Model initial	41
Figure 2-11 : Représentation du Tank Model étudié.....	43
Figure 3-1 : Etapes du filtre de Kalman [16].....	55
Figure 3-2 : Organigramme de l'algorithme de Couplage Tank Model - Filtre de Kalman	57
Figure 4-1 : Carte des bassins versants de l'Algérie	63
Figure 4-2 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Seybouse [12].....	64
Figure 4-3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Bouchegouf (ABHCS-M, 2013)	65
Figure 4-4 : Diagramme ombrothermique de la station de Bouchegouf (1985/2003) ...	66
Figure 4-5 : Carte de localisation des stations pluviométriques et hydrométriques de mesure du bassin de Bouchegouf (A.N.R.H).....	70
Figure 4-6 : Histogramme des débits journaliers de la station de Bouchegouf	71
Figure 4-7 : Histogramme de pluies journalières de la station de Bouchegouf	72
Figure 4-8 : L'hydrogramme résultant d'un hyétogramme donné pour toute la période d'étude	73
Figure 4-9 : Données de l'évapotranspiration (mm) de la région de Bouchegouf pour toute la période d'étude.....	74
Figure 5-1 : Simulation des débits en phase de calibration par le Tank Model	83
Figure 5-2 : Simulation des débits en phase de validation par le Tank Model.....	83
Figure 5-3 : Simulation des débits en phase de calibration par le couplage TM-FK	89
Figure 5-4 : Simulation des débits en phase de validation par le couplage TM-FK.....	89
Figure 5-5 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase calibration pour le couplage TM-FK	90
Figure 5-6 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase validation pour le couplage TM-FK	91
Figure 5-7 : Résidus en période de calibration	92
Figure 5-8 : Résidus en période de validation.....	92

Figure 5-9 : Innovation du filtre de Kalman en période de calibration.....	93
Figure 5-10 : Innovation du filtre de Kalman en période de validation.....	93
Figure 5-11: Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de calibration	94
Figure 5-12 : Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de validation.....	95
Figure 5-13 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de calibration	95
Figure 5-14 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de validation.....	96
Figure 5-15 : Evolution du stockage d'eau dans le premier réservoir en fonction du temps pour la période de calibration	96
Figure 5-16 : Evolution du stockage d'eau dans le premier réservoir en fonction du temps pour la période de validation.....	97
Figure 5-17 : Evolution du stockage d'eau dans le deuxième réservoir en fonction du temps pour la période de calibration	97
Figure 5-18 : Evolution du stockage d'eau dans le deuxième réservoir en fonction du temps pour la période de validation.....	98
Figure 5-19 : Evolution du stockage d'eau dans le troisième et le quatrième réservoir en fonction du temps pour la période de calibration	98
Figure 5-20 : Evolution du stockage d'eau dans le troisième et le quatrième réservoir en fonction du temps pour la période de validation.....	99
Figure 5-21 : Evolution des coefficients de ruissellement latéraux en fonction du temps pour la période de calibration.....	100
Figure 5-22 : Evolution des coefficients de ruissellement latéraux en fonction du temps pour la période de validation.....	100
Figure 5-23 : Evolution des coefficients d'infiltration en fonction du temps en calibration	101
Figure 5-24 : Evolution des coefficients d'infiltration en fonction en validation.....	101
Figure 5-25 : Hauteurs des ouvertures en fonction du temps pour la période de calibration	102
Figure 5-26 : Hauteurs des ouvertures en fonction du temps pour la période de validation.....	102
Figure 5-27 : Représentation du Tank Model par trois réservoirs	103

Liste des abréviations

Nash	: Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE
PBIAS	: Pourcentage du biais, critère d'évaluation qui mesure la tendance moyenne des valeurs simulées
R²	: Coefficient de détermination
RSR	: Ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data
TM	: Tank Model
FK	: Filtre de Kalman
TK-FK	: Couplage du Tank Model au filtre de Kalman
BV	: Bassin versant
P-D	: Modélisation pluie-débit
T&E	: La méthode de calibration manuelle Trial & Error

INTRODUCTION GENERALE

Bien que très peu abondante dans l'atmosphère, l'eau joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du système climatique. Elle est localement menacée ou très dégradée par la pollution, l'eutrophisation et la surexploitation. Aussi elle n'est pas répartie uniformément sur la terre ni dans le temps. Il n'y a pas un problème de l'eau relatif à la globalité de la planète, mais plutôt une diversité de scénarios de disponibilité localisée. Cette ressource est qualitativement et quantitativement limitée.

Examiner la façon dont l'eau voyage au cours de son cycle nous permet de mieux comprendre ses interactions avec l'environnement et de mieux évaluer la quantité disponible pour la consommation de l'homme. Cette évaluation est utilisée pour assurer une meilleure gestion de la ressource étant donné qu'elle n'est pas répartie uniformément ni dans le temps ni dans l'espace.

Cependant, la première étape de gestion des ressources en eau consiste en leur estimation, et en la maîtrise de leur évolution dans le temps.

La connaissance du débit d'un cours d'eau est devenue indispensable à la gestion des systèmes hydrologiques. Plusieurs axes de recherche se sont développés dans ce sens, qui vise la quantification de cette ressource en partant de son origine première : la pluie, jusqu'à arriver au débit du cours d'eau.

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

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

Avec le développement de l'outil informatique, l'utilisation des filtres basés sur le couplage avec un modèle hydrologique est devenue de plus en plus répandue. Cependant, les difficultés que se présentent au vue de la complexité du modèle pluie-débit et des critères d'évaluation nous mènent à poser les questions suivantes : Quel est le modèle et le filtre à utiliser ? Et quels sont les critères d'évaluation à choisir pour valider ce modèle ?

Ce travail s'inscrit dans l'optique de répondre aux questions précédentes :

- En première partie : nous allons étudier le comportement d'un modèle conceptuel (Tank Model) sur un bassin versant dans l'est de l'Algérie pour un pas de temps journalier. La faible exigence en données et la facilité de mise en œuvre de ce modèle les rend compatibles avec les exigences des études d'ingénierie et d'hydrologie opérationnelle (dimensionnement d'ouvrage, gestion de la ressource, prévision de crues ou d'étiages...).
- En deuxième partie : nous allons étudier le couplage du Tank Model au filtre de Kalman, et l'influence apporté par ce filtre dans le but d'augmenter la performance des critères d'évaluation pour la modélisation pluie-débit pour le même bassin versant.

Les critères d'évaluation choisis pour la validation de ce travail sont : le Nash, R^2 RSR, PBIAS. Ce choix a été dicté par la large utilisation de ces critères en hydrologie, ainsi que pour leur force à déterminer les erreurs, suivre les pics de crue, et leur capacité à indiquer la performance du modèle.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la première approche du couplage Tank Model au Filtre de Kalman (mise à jour des paramètres) pour quatre réservoirs.

Les résultats de la modélisation seront présentés au dernier chapitre, où on comparera la performance des modèles élaborés.

Chapitre 1 .
MODELISATION
HYDROLOGIQUE

1

1. Introduction

L'hydrologie est la science qui étudie la ressource en eau. Elle étudie l'occurrence des événements hydrologiques, la distribution, les mouvements, le transport, les propriétés de la ressource à travers le globe, et ses relations avec l'environnement au sein du cycle hydrologique en étudiant ses processus fondamentaux (évaporation, précipitation, fonte des neiges, débit liquide, débit solide, débit souterrain), ce qui définit sa qualité et sa quantité.

L'ingénieur hydrologue est amené à analyser les événements, les prévoir, concevoir les projets de contrôle, de gestion et de l'utilisation de la ressource en eau.

L'analyse et la prévision des événements nous donnent une idée sur le comportement futur des ressources en eau, et de là, plusieurs approches ont été développées dans ce sens afin de mieux cerner les phénomènes hydrologiques. Cette connaissance se résume sous le concept de la modélisation hydrologique.

2. C'est quoi la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat du bassin versant (précipitations et températures) en une série de débit pour des fins divers : prévisions des crues et des étiages, prédétermination de débits extrêmes, protection contre les inondations, la gestion de la ressource, simulation de débits pour combler des lacunes des données et reconstituer des séries de débits historiques, dimensionnement des ouvrages hydrauliques, études d'impact de changements climatiques sur l'hydrologie, études d'impact anthropique sur l'hydrologie (construction d'aménagements hydrauliques).

2.1. Définition d'un modèle

Le modèle est tout moyen permettant de raisonner sur un phénomène en faisant appel à des entités ou à des processus élémentaires qui sont sensés être à leur origine, ou qui permettent de les reconstituer par combinaison et par assemblages. [20]

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

Son développement repose généralement sur [20]:

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

Il requiert quelques propriétés pour être représentatif: cohérence rationnelle, précision, simplicité, robustesse, fiabilité, et pouvoir de prévision [20].

2.2.Processus hydrologique

La complexité des processus hydrologiques fait que la connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants reste assez mal connue. Les études de terrain ont commencé dans les années soixante sur de petits bassins de recherche ont permis d'apporter des réponses partielles à deux des questions fondamentales qui se posent à l'hydrologue [20]:

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

La représentation la plus connue de la formation des débits, est celle proposée par Horton en 1933 d'un partage de pluie disponible au niveau de la surface du sol, après interception éventuelle par la végétation,

- Dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, il y a saturation de la couche supérieure du sol, l'eau en excès est évacuée rapidement par ruissellement en surface pour former l'écoulement rapide de crue.
- L'autre partie s'infiltrate et contribue par un écoulement beaucoup plus lent à travers le sol et les formations superficielles à la recharge des nappes et au débit de base.

Cette théorie nous permet de distinguer quatre cheminements de l'eau des rivières [20]:

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

Plusieurs mécanismes influent sur la transformation de la pluie en débit et interviennent simultanément à différentes échelles spatio-temporelle [20]:

- Les précipitations : la 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,
- La couverture végétale : qui a une influence sur l'interception de la pluie, en diminuant son intensité,
- La pédologie, 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.

2.3. Les échelles d'analyse

2.3.1. L'échelle spatiale d'analyse :

Elle définit l'objet et la limite de la modélisation, et on distingue [20] :

- La modélisation globale qui étudie le bassin versant comme une seule entité aux propriétés uniformes, ayant une réponse globale et une paramétrisation unique afin d'en tirer les caractéristiques et en comprendre le fonctionnement.
- La modélisation spatialisée qui étudie le bassin versant à l'échelle du versant ou du mètre carré afin de prendre en compte l'évolution spatiale des différents processus hydrologiques.

2.3.2. L'échelle temporelle d'analyse

Elle peut être annuelle, mensuelle, journalière ou horaire. Elle dépend de l'objectif scientifique fixé pour la modélisation. Plus l'échelle temporelle diminue et plus le problème se complique en raison des états antérieurs du bassin [20].

3. Classification des modèles hydrologiques

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

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

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

- **Selon l'approche mathématique** : déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables et les relations entre elles,
- **Spatiale** : globaux, semi-distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, ou qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes, ou qu'il est finement discrétisé en mailles,

Chapitre 1. Modélisation Hydrologique

- **Selon le mécanisme** : empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit, et suivant la représentation du système à modéliser.

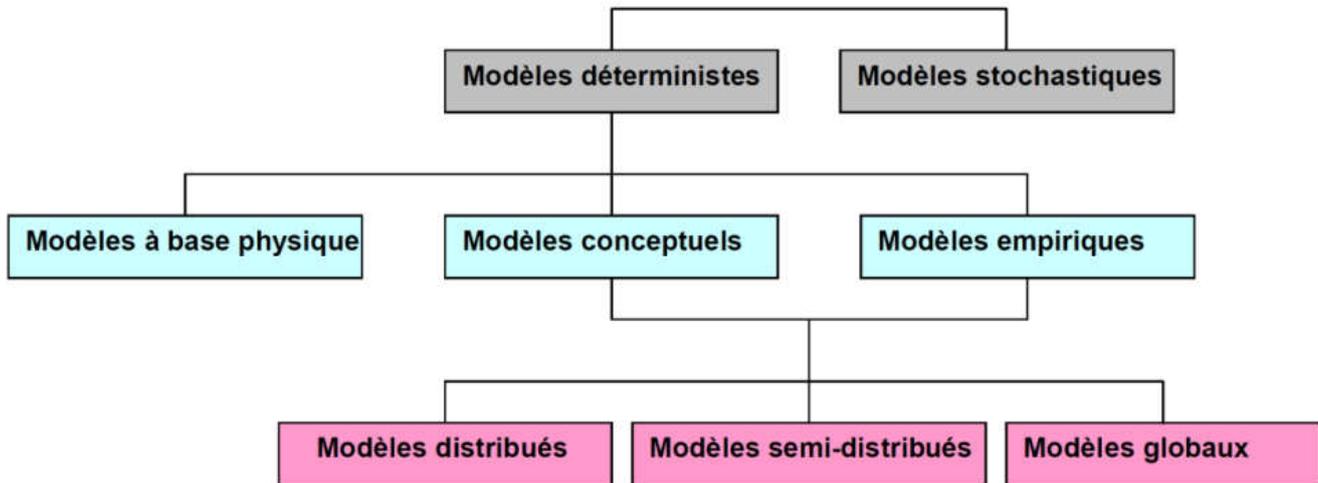


Figure 1-1 : Relation entre les modèles Pluie – Débit selon Berthier

3.1. Classification selon le mécanisme

Cette classification est basée sur la nature de l’algorithme utilisé pour la modélisation avec un degré d’abstraction plus ou moins important, ainsi que sur le degré d’utilisation des données. On peut les classer en 3 groupes principaux : modèles de type « boîte noire » ou empiriques, les modèles « à réservoir », appelés aussi « conceptuels » et les modèles dits « à base physique » [15].

3.1.1. Modèles empiriques

Ce sont des modèles qui visent à établir une relation purement mathématique basée sur les observations de la pluie et du débit d’un bassin versant [15]. Celui-ci est traité comme une « boîte noire » sans faire d’hypothèses sur les processus internes qui contrôlent la transformation des précipitations en ruissellement [15]. Cette catégorie regroupe les modèles régressifs, les méthodes fondées sur les fonctions de transfert comme l’hydrogramme unitaire, les réseaux de neurones, la programmation génétique, la logique floue ...etc. Relativement simple à mettre en œuvre, ce type de modèle peut être utilisé pour la prévision des crues [15]. Cependant, ces modèles ne prévoient que le débit à l’exutoire du bassin versant. Ils nécessitent un grand nombre de données pour leur calage et leurs paramètres sont difficiles à relier aux caractéristiques physiques du bassin. Ils ne permettent donc pas de comprendre le comportement d’un bassin versant en leur offrant un pouvoir explicatif très faible [15].

3.1.2. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels ou réservoirs sont basés sur une analogie qui considère le bassin versant comme étant une série de réservoirs interconnectés. Le processus hydrologique est expliqué par des formulations conceptuelles et décrit par des équations paramétrées. Chaque réservoir est caractérisé par plusieurs paramètres qui sont à déterminer par calibrage et validation [15]. Les paramètres du modèle n'ont pas nécessairement un sens physique clair relié aux caractéristiques du bassin versant, cependant, l'idée de faire une analogie entre le processus hydrologique et le comportement des réservoirs offre à ce type de modèle un pouvoir explicatif plus important que celui des boîtes noires [15]. Ce type de modèle souffre d'une subjectivité importante dans la partie d'élaboration, car premièrement, ce sont des modèles établis selon l'expérience propre de l'hydrologue [15]. Deuxièmement, ils ne s'appliquent pas partout à cause des différences des paramètres hydrologiques d'un bassin versant à un autre et d'un climat à l'autre. Ceci les rend encore très difficiles à appliquer dans les bassins non jaugés même si des tentatives de régionalisation des paramètres des modèles avec les caractéristiques des bassins versants ont été proposées. Malgré les difficultés associées, les modèles conceptuels constituent la grande majorité des modèles utilisés dans des applications pratiques qui visent de reproduire le débit à l'exutoire du bassin versant [15]. Il existe plusieurs modèles de ce type : les modèles GR, les modèles réservoirs (Tank Model), HBV, etc.

3.1.3. Modèles physiques

Tel qu'expliqué par Beven, ces modèles s'appuient sur des lois de physiques validés indépendamment du modèle hydrologique dont les paramètres sont issus du terrain [15]. Ce sont les lois de l'hydrodynamique telles que la conservation de masse, la conservation des quantités de mouvements, la conservation d'énergie, les équations de St. Venant pour les écoulements à surface libre, l'équation de Richards pour l'écoulement non-saturé, Penman-Monteith pour l'évapotranspiration, l'équation de Boussinesq pour l'écoulement souterrain..., etc. [15]. Ces modèles nécessitent une discrétisation fine de l'espace permettant donc une représentation détaillée du bassin versant simulant les débits en tout point et tout instant. Ils se basent aussi sur l'utilisation de paramètres reliés directement à des caractéristiques mesurables dans le bassin versant dans l'espoir de l'élimination de l'étape de calibration et donc l'extension de leurs utilisation même dans les bassin versant non-jaugés [15]. Cependant en pratique, ces modèles exigent un nombre très important de données rarement disponibles, et tombent dans le piège de surparamétrisation qui conduit à des calculs importants incompatibles avec la prévision des crues même avec l'avancement technologique actuel des machines de calculs. Pour cette raison, les modèles à base physiques ne sont pas utilisés dans la prévision des crues mais plutôt dans les problèmes du transport solide et la propagation de la pollution. Ils sont aussi très pratique dans l'étude des impacts environnementaux et l'évaluation de l'impact du réchauffement climatique [15].

La combinaison de ces types de modèles peut être effectuée dans le but de combler les lacunes de l'un par les avantages de l'autre dans ce qui est connu comme les modèles hybrides. L'idée serait d'utiliser des observations (empiriques) pour accepter ou rejeter une

Chapitre 1. Modélisation Hydrologique

structure hypothétique d'une structure de modèle. Il était démontré à travers la multitude de recherche que la combinaison de plusieurs approches de modélisation donne souvent de meilleurs résultats [15].

3.2. Classification selon l'approche mathématique

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

3.2.1. Modèles déterministes

Les modèles déterministes sont des modèles mathématiques dont le résultat est obtenu à travers des relations connus entre les événements et les états du modèle. Ils permettent donc une seule sortie de simulation avec le même ensemble d'inputs et de paramètres [15].

3.2.2. Modèles stochastiques

La majorité, voire tous les paramètres dans les modèles stochastiques sont représentés par une distribution statistiques ce qui permet d'avoir une gamme des outputs [15]. Autrement dit, le modèle stochastique donne de l'incertitude aux variables de sortie du modèle en conséquence des incertitudes dans les variables d'entrée, les conditions aux limites ou les paramètres du modèle [15].

La majorité des modèles utilisés dans la modélisation pluie-débit suivent une approche déterministe, cependant un nombre considérable de modèles intègrent une fonction stochastique d'erreur aux prévisions déterministes des modèles hydrologiques, ou des distributions statistiques associées à leurs paramètres [15], Le modèle stochastiques offre deux avantages importants [15] :

- Sa structure simple permet une description de l'hétérogénéité associée à la limitation des détails spatiaux et temporels.
- Ils donnent la possibilité aux décideurs d'évaluer le risque associé aux prévisions effectuées.

Bien que la majeure partie des modèles utilisés en pratique soient déterministes, la distinction entre les deux, reste floue. En règle générale, si les variables de sortie du modèle sont associées à une certaine variation de la dispersion prédictive, le modèle peut être considéré comme stochastique. Sinon, si les valeurs de sortie se présentent comme une seule valeur quel que soit le pas de temps, le modèle peut être considéré comme déterministe, indépendamment de la nature des calculs sous-jacents [15].

3.3. Classification spatiale

Il est possible de classer les modèles pluie-débit selon la distribution spatiale des variables et paramètres impliqués dans le comportement d'un bassin versant. On distingue alors les modèles globaux des modèles semi-distribués ou distribués [15].

3.3.1. Modèles globaux

Les modèles globaux traitent le bassin versant comme une entité unique représenté par des variables d'état moyennées sur sa surface [15]. On applique à leurs entrées la pluie moyenne de surface, etc.

3.3.2. Modèles semi-distribués et distribués :

Ces modèles tiennent compte de la variabilité spatiale des processus hydrologiques modélisés, les variables d'entrée, les conditions aux limites et les caractéristiques du bassin. Pour les modèles semi-distribués, les quantités mentionnées ci-dessus sont partiellement autorisés à varier dans l'espace en divisant le bassin en petits sous-bassins qui à leur tour sont traités comme une seule unité [15]. On peut aussi choisir de ne spatialiser que les facteurs dont la répartition spatiale est jugée cruciale dans la réponse hydrologique d'un bassin versant. Cela peut concerner à titre d'exemple la précipitation et l'état hydrique initial [15]. Les modèles entièrement distribués en contrepartie, discrétisent l'espace d'étude à des cellules définies par le modélisateur et connue pour être la résolution du modèle. Ces types de modèles effectuent des prévisions distribuées dans l'espace avec des variables d'état moyennées sur le carré de quadrillage, L'approche de distribution donne une meilleure représentation de l'hétérogénéité pouvant exister sur un bassin, cependant, la spatialisation entraîne une complexification des modèles [15].

Plusieurs études comparatives ont été menées afin de répondre à la question de performance des modèles globaux et distribués, En général, lorsque le problème de modélisation pluie-débit est bien posé, les deux types des modèles simulent le débit à l'exutoire à un degré très proche [15]. Toutefois, une variété d'autres études indique que chaque type de modèle donne des résultats recommandés à son domaine d'utilisation [15]. Les modèles distribués, généralement associés aux modèles à base physique sont plus avantageux dans les études qui concernent l'effet du changement des conditions du terrain sur les processus hydrologiques, la modélisation de la qualité de l'eau, et la prévision sur les bassins versants non-jaugés. Une raison pour laquelle les modèles de paramètres distribués n'a pas vu une utilisation répandue est l'indisponibilité des bases de données détaillées. Les améliorations futures dans l'acquisition de données, y compris l'application des systèmes d'information géographique (SIG), vont probablement conduire à une utilisation plus large de modèles de paramètres distribués [15].

3.4. Classification temporelle

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

Les modèles événementiels simulent les événements de précipitations-ruissellement avec un accent sur l'infiltration et le ruissellement de surface alors que les modèles de processus continu représentent explicitement tous les composants de ruissellement tout en tenant compte de la redistribution de l'humidité du sol entre les averses [15].

Chapitre 1. Modélisation Hydrologique

Les modèles basés sur les événements permettent une calibration facile des paramètres en nécessitant moins de données à l'entrée en comparaison avec les modèles continus. Ces derniers par contre, sont très affaiblis par les risques de lacunes dans les séries historiques des données mais ne sont heureusement pas limités par la longueur de l'historique. Ces avantages et inconvénients donnent aux modèles événementiels un attrait pour la prévision des crues en temps réel. Il reste cependant à tenir en compte que pour les deux types de modèles il est important de faire très attention aux conditions de saturations et d'humidité initiales. Pour les modèles continus il faudrait considérer une période mise en route (warmup) à partir de laquelle le processus hydrologique devient indépendant de la condition initiale. D'autre part, pour les modèles à base d'événement, la saturation initiale des sols doit être fixée d'une façon externe au modèle [15].

4. Paramétrisation des modèles

4.1. Calage des modèles

Le calage consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle pluie-débit de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible. Ce jeu de paramètres doit être adéquat offrant la meilleure reconstitution des sorties en particulier les débits [15]. Pour cela, on a recours à faire une confrontation des débits simulés à ceux observés par calage manuel, qui consiste à modifier les paramètres jusqu'à obtenir la meilleure adéquation entre les simulations et les observations sur la période d'étude (période d'apprentissage) [15]. On utilise deux méthodes de calage pour obtenir le meilleur jeu de paramètres qui nous permettent d'ajuster au mieux le modèle aux valeurs observées : le calage manuel et le calage automatique.

4.1.1. Calage manuel

Pour cette méthode de calage, c'est l'utilisateur du modèle qui recherche par tâtonnement la valeur optimale des paramètres qu'il va utiliser pour faire tourner le modèle, qui est atteint lorsque l'erreur est minimisée entre les données simulées et observées. Cette pratique nous permet de comprendre le fonctionnement du modèle et quel est l'effet de chaque paramètre sur le comportement du modèle, mais en pratique, cette opération est longue et fastidieuse. Ce calage, fondé sur l'expertise de l'opérateur, est généralement basé sur le diagnostic visuel fait par l'opérateur des hydrogrammes des débits (observés et calculés) ainsi que sur l'appréciation de certains indices de performance du modèle. [15]

4.1.2. Calage automatique

Les chercheurs ont bénéficié de l'essor de l'outil informatique lors de ces dernières décennies pour développer des outils de calage automatique qui peuvent remédier au défaut majeur du calage manuel [15]. Dans ce cas, les données simulées sont ajustées aux données observées, au moyen d'un programme informatique qui opte pour minimiser une fonction objective qui

Chapitre 1. Modélisation Hydrologique

représente l'erreur du modèle à travers un ajustement itératif représenté par un algorithme d'optimisation, cet algorithme est plus avantageux que le calage manuel [15]:

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

Cependant, il présente l'inconvénient d'être influencé par certaines contraintes [15] :

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

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

4.2. Validation des modèles

Avoir un bon ajustement entre les simulations du modèle et les observations du terrain sur la période de calibration est un test nécessaire pour tester l'applicabilité du modèle à un bassin versant ; cependant, cette étape seule, reste insuffisante parce qu'elle ne garantit en aucun cas que ce modèle va bien simuler le débit pour les périodes non calibrées [15]. La validation, une période souvent confondue avec l'étape de calage, consiste à s'assurer que le modèle, une fois calibré, réagit correctement à des variations des données d'entrée et qu'il est apte à fonctionner en projection [15]. On utilise pour cette étape des données qui n'ont pas servi au calage du modèle. Elle permet également de vérifier la sensibilité du système aux changements à analyser afin de s'assurer que les écarts entre résultats obtenus et observés sont raisonnables [15].

4.3. Difficultés

Il existe énormément de contraintes qui font face au modélisateur afin qu'il puisse assurer sa tâche de calibration et validation du modèle [15] :

- Il faudrait s'assurer que les mesures de pluie, débit ou évapotranspiration sont de bonne qualité, sinon le comportement du modèle suivra une logique complètement

erroné, ce qui conduit à des outputs erronés ou même à des difficultés liées à la calibration.

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

5. Variables des modèles

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

En pratique, il faut prendre en considération la moyenne de toutes les stations pluviométriques existant à l'amont de la station hydrométrique utilisée. Cependant, il est rare de trouver toutes les stations pluviométriques ayant fonctionné sur une période assez longue pour représenter le phénomène hydrologique étudié, sur la même période d'observation, et sur une période concomitante avec les débits observés [20].

Une deuxième variable conditionne le cycle hydrologique du bassin versant, elle représente une perte du système, c'est l'évapotranspiration potentielle (ETP) [20].

A l'échelle mensuelle, l'ETP peut être déduite de la température. La méthode de Thornthwaite permet à partir de la température moyenne du mois, de calculer l'évapotranspiration mensuelle d'une façon relativement précise [3].

A l'échelle journalière, l'ETP peut être calculée par la formulation de Oudin en utilisant la température moyenne journalière et la latitude (en degré). Cette méthode a donné beaucoup plus d'efficacité dans les modèles pluie-débit.

La réponse du bassin versant à l'ensemble des processus hydro-climatologiques représente le débit à l'exutoire du bassin. La mesure de cette variable reste toutefois assez délicate et imprécise. Le débit peut être mesuré, ou bien calculé à partir des hauteurs limnimétriques observées et des courbes de tarage de chaque station hydrométrique [20].

La série de débits est constituée du cumul des lames ruisselées par pas de temps journalier (mm/jour). L'utilisation de la pluviométrie totale par pas de temps génère une lame ruisselée totale par le même pas de temps. Le débit moyen mensuel simulé peut être calculé par la suite [20].

6. Critères d'efficacité des modèles

L'une des tâches les plus délicates dans l'étude d'un modèle pluie-débit est l'estimation de ses performances, et sa robustesse de simuler les débits d'un bassin. Dans ce cas, la qualité de simulation nécessite la comparaison entre les données observées et celles simulées par le modèle [3]. Pour cela, on utilise un double échantillon, qui consiste à caler le modèle sur une période donnée (période de calibration), et de le tester sur le reste des observations (période de validation), pour juger son adaptabilité face à des situations dans lesquelles il est censé fonctionner.

On distingue deux types de critères :

6.1. Critères graphiques

Ils correspondent à une tendance de la variable simulée par rapport à la variable observée. Ces critères sont très importants, du fait qu'ils permettent un jugement visuel, et donc d'apprécier la qualité du modèle à reproduire les différentes tendances climatiques.

6.2. Critères numériques

Afin de juger l'efficacité des modèles, on présentera les critères appliqués dans le domaine de la modélisation hydrologique. Une étude comparative du degré de représentation de ces critères sera établie par la suite afin de juger de la pertinence des critères retenus [20].

Les critères globaux d'appréciation des performances des modèles de simulation des débits diffèrent sur trois points essentiels : la forme analytique de l'erreur (quadratique, absolue, cumulée...), la forme de la variable cible (transformée ou non) et le choix d'un modèle de référence (pour avoir une mesure relative). [20]

6.2.1. Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination r^2 évalue la force de la relation linéaire existant entre les observations et les prédictions. Il est défini comme étant le carré du coefficient de corrélation, d'après Bravais-Pearson :

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o.i} - Q_{o.moy})(Q_{s.i} - Q_{s.moy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{o.i} - Q_{o.moy})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{s.i} - Q_{s.moy})^2}} \right]^2$$

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

Il varie de 0 (pas de corrélation) à 1 (la distribution de la prédiction est égale à celle de l'observation).

Chapitre 1. Modélisation Hydrologique

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

Pour faire face à cet inconvénient lors de la validation, on introduit la pente (b) et la composante (a) de l'intersection de la droite de régression avec l'axe des y ($y = b \cdot x + a$).

Pour une bonne simulation, (a) devrait être proche de « 0 », ce qui veut dire qu'un Q_{obs} de « 0 » donnera un Q_{sim} très proche de « 0 », et (b) devrait être proche de « 1 ».

Si ($b < 1$) donc, le modèle sous-estime la prédiction, et la surestime dans le cas contraire.

6.2.2. Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE

Nash et Sutcliffe en 1970 ont proposé un critère, adimensionnel qui est considéré comme la base des critères de performance des modèles pluie-débit.

Ce critère exprime le pourcentage de la variance naturelle que l'on gagne par rapport à un modèle de référence qui donnerait comme débits calculés la moyenne des débits observés.

Il est défini par :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_o.moy)^2}$$

Le NSE varie de "- ∞ " à "100%". Un NSE de 1.0 représente une simulation parfaite, et un $NSE < 0\%$ indique une performance inacceptable.

Le critère de NSE trouve son intérêt dans le fait qu'il est adimensionnel, ce qui dans la plupart des cas, facilite les comparaisons entre diverses séries hydrométriques.

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 accorde plus de poids aux débits moyens.

Et tout comme le r^2 , le NSE n'indique pas les sous/surestimations des modèles.

6.2.3. Les indices d'erreurs

6.2.3.1. MAE, MSE, RMSE

L'erreur moyenne absolue, l'erreur quadratique moyenne, et la racine de l'erreur quadratique moyenne, 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.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_o - Q_s|$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}$$

6.2.3.2. RMSE-observations standard deviation ratio (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. en 2004.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_o.moy)^2}}$$

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.

6.2.3.3. Percent Bias (PBIAS)

Selon Gupta et al. en 1999, le PBIAS mesure la tendance moyenne des valeurs simulées (plus grande ou plus petite) par rapport aux valeurs observées, donc il estime la sous/surestimation de la simulation. Sa valeur optimale est de « 0 ». Des valeurs positives de ce critère indiquent qu'il y a sous-estimation du biais et des valeurs négatives indiquent qu'il y a surestimation du biais.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)}{\sum_{i=1}^n Q_o}$$

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.

6.3. Intervalles d'efficacité des modèles

Dans la présente étude, en se basant sur les recommandations des études passées, la combinaison de l'évaluation graphique avec l'évaluation numérique, les indices d'erreurs et les critères adimensionnels plus précisément, devrait être utilisée pour l'évaluation des modèles hydrologiques. Et les critères retenus jugés les plus performants sont : le R^2 , NSE, PBIAS, et RSR.

En fonction de la valeur de ces critères, on peut définir les performances des modèles pluie-débit au pas de temps journalier [13] :

Tableau 1-1 : Intervalles d'appréciation des critères de validation

Taux de performance	R^2	NSE	PBIAS	RSR
Insatisfaisant	$R^2 < 0.7$	$NSE < 0.7$	$ PBIAS > 25$	$RSR > 0.6$
Satisfaisant	$0.7 \leq R^2 < 0.8$	$0.7 \leq NSE < 0.8$	$15 < PBIAS \leq 25$	$0.6 \leq RSR < 0.3$
Bon	$0.8 \leq R^2 < 0.9$	$0.8 \leq NSE < 0.9$	$5 < PBIAS \leq 15$	$0.3 \leq RSR < 0.1$
Très bon	$0.9 \leq R^2 < 1.0$	$0.9 \leq NSE < 1.0$	$ PBIAS \leq 5$	$0.1 \leq RSR < 0.0$

On note donc que l'appréciation d'un modèle reste tributaire des expériences de chaque hydrologue, où la validation d'un modèle est déterminée en fonction des valeurs du critère choisi.

7. Applications de la modélisation pluie débit

Les modèles pluie-débit ont été développés pour répondre aux problèmes d'hydrologie opérationnelle : Evaluation des risques liés à l'eau et la gestion de la ressource en eau. Ces applications se résument en [20] :

- L'extrapolation des débits : Comblement de lacunes des séries tronquées, extension des séries hydrométriques courtes, estimation des paramètres hydrologiques et hydrogéologiques,
- Le dimensionnement d'ouvrages,
- La gestion de réservoirs, à objectif simple ou multiple (écrêtement de crue, soutien d'étiage, etc.),
- La prévision des étiages,
- La prédétermination et la prévision des crues et des débits,

Chapitre 1. Modélisation Hydrologique

- La détection de tendances dans les séries hydrologiques (évolution du comportement hydrologique des bassins versants),
- La gestion des ressources en eau,
- L'étude de l'influence d'aménagements sur l'hydrologie,
- Modèle comme outil de recherche.

8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le contexte général de la modélisation hydrologique.

La modélisation pluie-débit s'intéresse à la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Les différents modèles développés font appel à différentes perceptions du monde réel et répondent à différents objectifs.

Parmi les catégories des modèles identifiés, les modèles conceptuels semblent les plus représentatifs du système réel et de ses processus. La relation qui lie ces processus étant très complexe, en particulier la partie souterraine, cela est dû à la non-linéarité de la relation pluie-débit qui s'accroît, et aussi à la difficulté de quantifier les différents paramètres des modèles. Pour pouvoir appliquer cette classe de modèles dans un domaine bien défini, surtout les modèles à pas de temps journalier qui sont plus délicats, il faut qu'ils présentent une certaine efficacité et robustesse.

Cela n'étant pas toujours vérifié, on opte alors pour les modèles couplés avec des filtres qui ont fait leurs preuves dans la modélisation des systèmes non-linéaires et dans divers domaines.

Chapitre 2 .
MODELISATION
PLUIE-DEBIT PAR LE
MODELE CONCEPTUEL
(TANK MODEL)

2

1. Introduction à la modélisation conceptuelle (à réservoirs)

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

Les approches adoptées pour ces modèles s'appuient sur les éléments suivants [20]:

- 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 de 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 à réservoirs « Tank Model » au pas de temps journalier.

2. Présentation générale du Tank Model

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

2.1. Tank Model pour les régions humides

Le Tank Model est un modèle très simple, composé de quatre réservoirs posés verticalement en série, comme le montre la fig. 2-1.

Les précipitations entrent dans le réservoir supérieur et l'évaporation est soustraite du ce dernier. S'il n'y a pas d'eau dans le réservoir supérieur, l'évaporation est soustraite du deuxième réservoir; s'il n'y a pas d'eau dans l'ensemble du premier et du deuxième, l'évaporation est soustraite du troisième réservoir; etc. [19]

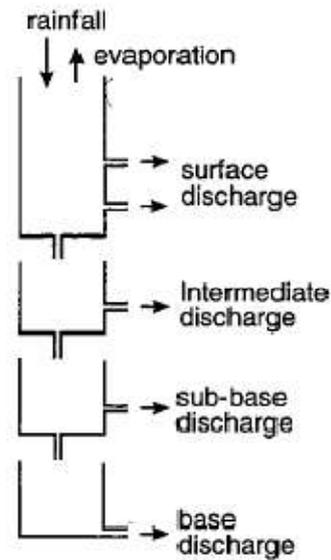


Figure 2-1 : Représentation générale du Tank Model simple [19]

Les sorties latérales sont les débits calculés. La sortie du réservoir supérieur est considéré comme l'écoulement ou le débit de surface et sous surface (sub-surface), la sortie du deuxième réservoir en tant que écoulement intermédiaire, du troisième réservoir en tant que ruissellement sous basique (sub-base) et la sortie du quatrième réservoir en tant que écoulement de base (baseflow), comme il est indiqué dans la Fig. 2-2. [19]

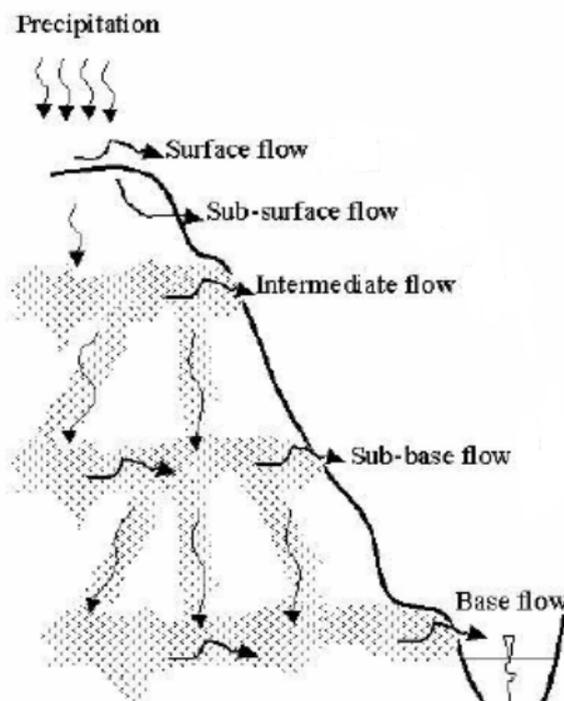


Figure 2-2 : Schéma représentant les types d'écoulement dans le modèle à réservoirs selon Setiawan et al. en 2013

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

Malgré ses simples perspectives, le comportement du modèle à réservoirs (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 Fig. 2-3a ou 2-3b. En dessous de ces conditions, le débit est stable. Dans le cas de la Fig. 2-3a la décharge se diminuera très lentement, et dans le cas de la Fig. 2-3b la décharge sera presque constante [19].

S'il y a une pluie relativement forte de courte durée sous ces conditions, le Tank Model se déplacera dans l'un des cas représentés sur la Fig. 2-3c et 2-3d. 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 [19].

Si les fortes précipitations se produisent sur une période plus longue, à ce moment-là, le Tank Model prendra le cas représenté sur la Fig. 2-3e. Lorsque la pluie s'arrête, l'eau du réservoir supérieur se déplace rapidement et le Tank Model se déplacera vers le cas montré à la Fig. 2-3f. Ensuite, le débit de sortie du deuxième réservoir se diminuera lentement, formant la typique pente descendante de l'hydrogramme suivant une grande décharge [19].

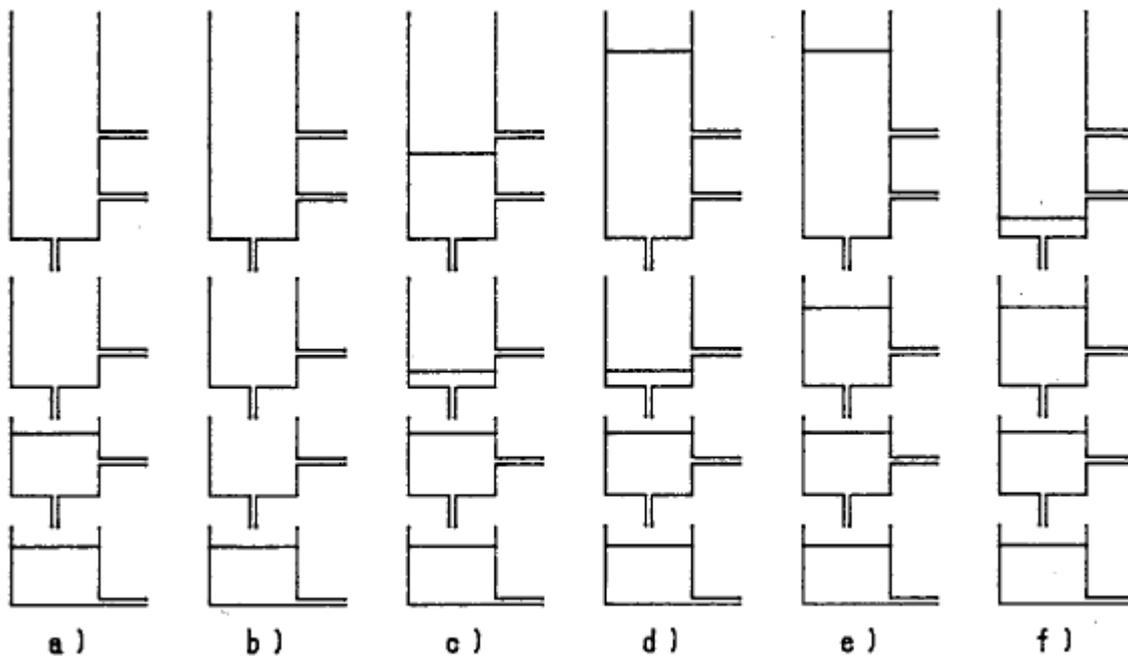


Figure 2-3 : Différents cas du Tank Model [19]

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

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

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. [19]

Pour l'analyse des crues, le Tank Model indiqué à la Fig. 2-4 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. [19]

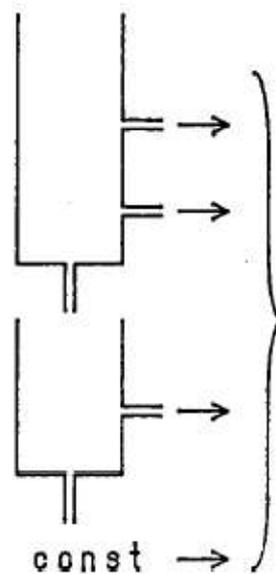


Figure 2-4 : Le Tank Model pour l'étude des crues [19]

2.1.1. Le réservoir linéaire simple

Si on déplace la (les) sortie(s) latérale(s) de chaque réservoir au fond des réservoirs, on transforme le modèle en une des formes linéaires indiquées à la Fig. 2-5a et Fig. 2-5b. On considère d'abord un seul réservoir linéaire de la forme indiquée à la Fig. 2-5b avec l'entrée $x(t)$ et la sortie $y(t)$ (figure 2-6). Ensuite, si $X(t)$ est le stockage dans le réservoir, les équations suivantes contiennent [19]:

$$\frac{d}{dt} X(t) = x(t) - y(t), \quad y(t) = k X(t)$$

Donc :

$$\frac{d}{dt} X(t) + k X(t) = x(t),$$

$$\left(\frac{d}{dt} + k\right) X(t) = x(t), \quad \left(\frac{d}{dt} + k\right) y(t) = k x(t),$$

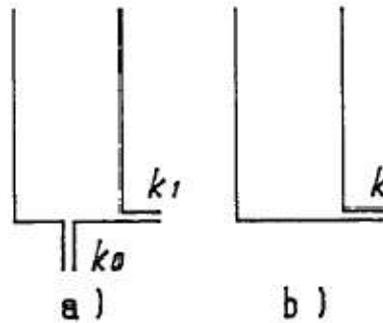


Figure 2-5 : Un Tank Model linéaire simple [19]

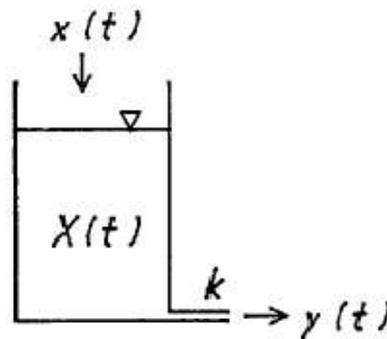


Figure 2-6 : Tank Model indiquant le stockage [19]

Où, on utilise un opérateur différentiel : $D = d/dt$

$$(D + k) X(t) = x(t), \quad (D + k) y(t) = k x(t)$$

$$X(t) = \frac{1}{(D + k)} x(t), \quad y(t) = \frac{k}{(D + k)} x(t)$$

Cela montre que le simple réservoir linéaire de la Fig. 2-6 est : $k / (D + k)$, le système de retard de premier ordre.

Si l'entrée à $t = 0$ à un réservoir linéaire vide est la fonction δ , c'est-à-dire $x = \delta(t)$, alors le débit de sortie suivra la fonction exponentielle $y(t) = k \exp(-kt)$, comme indiqué dans la Fig.2-7.

Si on trace une tangente à cette courbe exponentielle à $t = 0$, ensuite, elle va couper l'axe horizontal à $T = 1/k$, qui est la constante du temps de l'opérateur $k / (D + k)$ pour un réservoir linéaire simple.

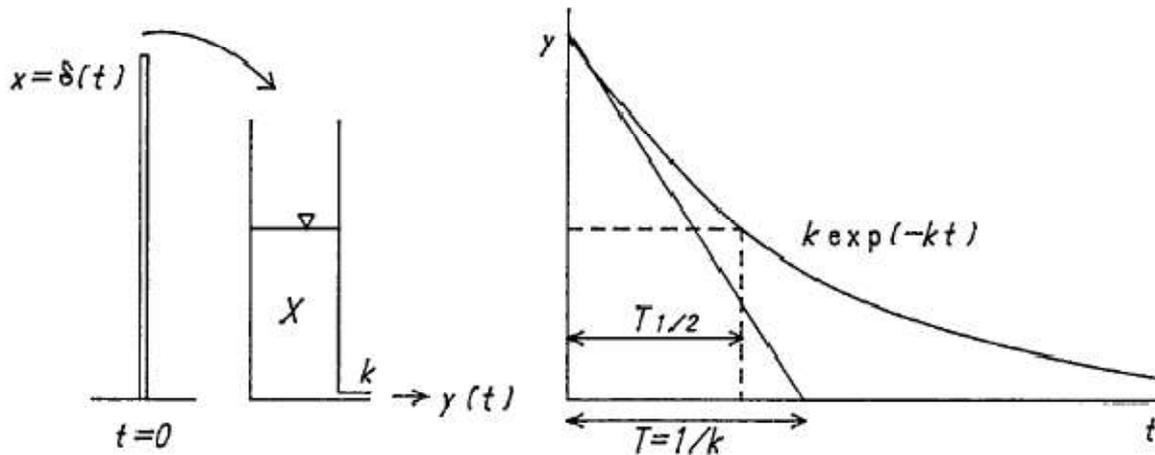


Figure 2-7 : La présentation de la sortie $y(t)$ en fonction exponentielle [19]

La signification de la constante du temps $T = 1/k$ est la suivante:

Si la sortie $y(t)$ est maintenue à sa valeur initiale à $t = 0$, alors le stockage dans le réservoir va disparaître après $T = 1/k$.

2.2. Tank Model composé pour les régions arides

Dans les régions arides où l'évaporation 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 par l'humidité du sol et donc il n'y aura pas de ruissellement de surface [19].

Pendant la saison humide, le pourcentage de zone humide augmente avec le temps et le ruissellement de surface augmente. Au contraire, pendant la saison sèche, le pourcentage de zone sèche augmente avec le temps et le ruissellement diminue. 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 [19].

Suivant ces considérations, on divise le bassin en zones, par exemple, en quatre zones représentées dans la Fig. 2-8. Les surfaces proportionnelles des zones sont AR_1 , AR_2 , AR_3 et AR_4 , où $AR_1 + AR_2 + AR_3 + AR_4 = 1$, et appliquer un Tank Model de la même structure à chaque zone comme dans la Fig. 2-9. [19]

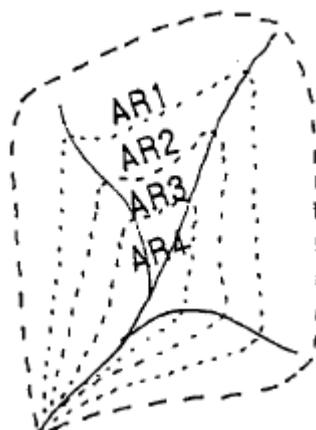


Figure 2-8 : Division du Tank Model en plusieurs zones différentes [19]

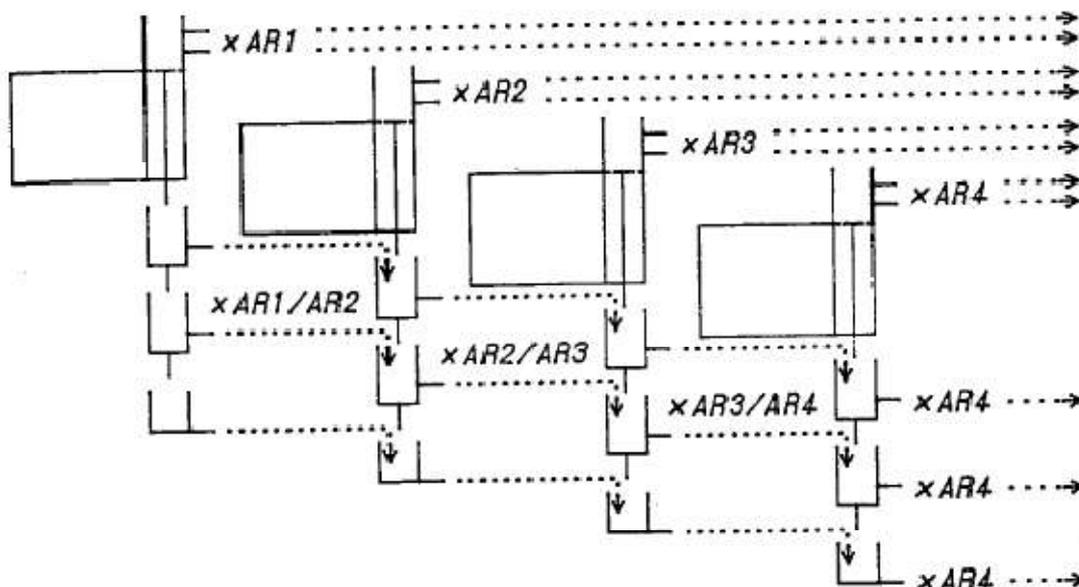


Figure 2-9 : Structure générale du Tank Model dans les régions arides [19]

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 la montre la Fig. 2-9, car chaque réservoir correspond à une couche d'eau souterraine [19].

En effet, l'entrée et la sortie à partir du modèle (précipitation et évaporation) est mesurée et calculée en unités de profondeur d'eau (mm), mais pour transférer l'eau vers la prochaine zone on doit convertir en unités de volume en multipliant les sorties de chaque réservoir par $AR1$,

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

la surface de la première zone. 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 AR2 (la surface de la deuxième zone). Par conséquent, les sorties des réservoirs basses de la première zone sont multipliées par AR1/AR2 avant qu'ils soient mis dans les réservoirs de la deuxième zone. La sortie du réservoir supérieur est multipliée par AR1 et va directement au canal de la rivière [19].

Dans la quatrième zone, toutes les sorties vont directement au canal de la rivière après avoir été multiplié par AR4. Le système de calcul est représenté sur la Fig. 2-9. Le facteur important dans ce type de modèle à réservoir (Tank Model) est le rapport des surfaces de zone, AR1: AR2: AR3: AR4. S'il n'y a pas assez de données pour déterminer ce rapport, on doit le déterminer par la méthode Trial and Error [19] ;

On commence à partir d'une progression géométrique telle que:

1	:	1	:	1	:	=	25%	:	25%	:	25%	:	25%	
1.5 ³	:	1.5 ²	:	1.5	:	1	=	41.5%	:	27.7%	:	18.5%	:	12.3%
2 ³	:	2 ²	:	2	:	1	=	50%	:	25%	:	12.5%	:	6.25%
3 ³	:	3 ²	:	3	:	1	=	67.5%	:	22.5%	:	7.5%	:	2.5%
4 ³	:	4 ²	:	4	:	1	=	75.3%	:	18.8%	:	4.7%	:	1.2%

Grosso modo, la sécheresse du bassin représente le plus grand rapport de progression devrait y être.

2.3. Calibration du Tank Model

Il existe deux méthodes pour calibrer le modèle Tank, la première manuelle, elle se fait par la méthode Trial & Error, et la deuxième automatique par un programme numérique.

2.3.1. Calibration manuelle (Trial and Error)

Le Tank Model est non linéaire et les mathématiques sont presque inutiles pour les problèmes non linéaires. Par conséquent, l'hydrologue ne pouvait pas utiliser les mathématiques pour la calibration du Tank Model, et la seule solution était d'utiliser la méthode Trial & Error du calcul numérique. En 1951, lorsque le premier hydrologue a d'abord appliqué le Tank Model simple pour l'analyse du débit, il n'y avait que quelques ordinateurs en Japon et il ne pouvait pas les utiliser. Sans les solutions mathématiques et sans ordinateur, les calculs numériques nécessitaient un travail long et dur. [19]

Cependant, l'esprit humain est toujours curieux, et les calculs numériques laborieux sont devenus moins ennuyeux mais plutôt intéressants comme expérience et les jugements ont été construits dans le cerveau des auteurs. [19]

Progressivement, la calibration du Tank Model est devenue plutôt simple. Habituellement le premier, le deuxième et même le troisième essai ne donneront pas de bons résultats et donc on peut apporter des modifications audacieuses et importantes aux paramètres du modèle. Après

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

plusieurs essais, le résultat devrait devenir assez bon et l'ajustement fin des paramètres peut commencer. Après dix essais, le résultat devient généralement très bon. [19]

Cependant, une autre difficulté est apparue. L'hydrologue a trouvé des difficultés en décrivant et expliquant son Tank Model aux autres. En effet, Si deux personnes ont des connaissances et expériences communes sur quelque chose, elles peuvent parler et discuter sur le sujet. Mais, si une personne ne sait rien sur le sujet, alors c'est difficile ou impossible de discuter sur le sujet car il n'y a pas de vocabulaire commun. [19]

Plus tard, comme le Tank Model est devenu plus connu en raison de ses bons résultats, alors l'hydrologue devait trouver des moyens pour décrire et expliquer sa méthode de travail et sa façon de penser. Certaines de ces méthodes sont [19]:

Le modèle initial

Pour le premier essai, un Tank Model initial peut être supposé; un exemple de tel modèle initial est montré à la Fig. 2-10a. On peut dériver un modèle initial pour s'adapter au bassin en traçant l'hydrogramme en échelle logarithmique, en trouvant les pics de l'hydrogramme et mesurant des débits descendants après les pics. Si le taux descendant est « r par jour », alors les coefficients du Tank Model indiqués dans la Fig. 2-10b peuvent être déterminés comme :

$$A_0 = A_1 = A_2 = (1 - r) / 3$$

$$B_0 = B_1 = A_0 / 5$$

$$C_0 = C_1 = B_0 / 5$$

$$D_1 = 0.001$$

Il est préférable de garder ces coefficients comme des nombres simples, par exemple si $A_0 = 0.266\dots$, il est préférable de le mettre 0.25 ou 0.3.

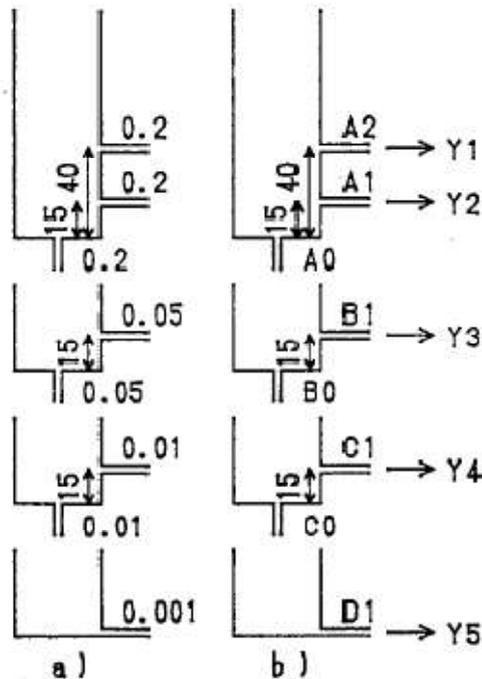


Figure 2-10 : Tank Model initial

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

L'hydrogramme de sortie du modèle en cours doit être tracé cinq fois comme : Y_5 , $Y_4 + Y_5$, $Y_3 + Y_4 + Y_5$, $Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5$ et $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5$ (voir la figure 2-10b). Comparant les cinq composants de l'hydrogramme calculé avec l'hydrogramme observé, on peut juger quel composant est le plus mauvais. Dans les premiers essais, il peut y avoir beaucoup de mauvais points et on doit sélectionner le plus mauvais [19].

Comment rendre certains composants plus grands ou plus petits

Si le plus mauvais point est le débit du réservoir supérieur qui est trop petit, il y aura peut être deux façons de le corriger. Une façon devrait être de mettre A_1 et A_2 plus grand, et une autre serait de rendre A_0 plus petit. Cependant, la meilleure façon de faire est de rendre A_1 et A_2 plus grand, et A_0 plus petit, c'est-à-dire multiplier A_1 et A_2 par k ($k > 1$) et diviser A_0 par k . Si $0 < k < 1$, la sortie du réservoir supérieur deviendra plus petite. La sortie du deuxième réservoir ou du troisième réservoir peut être ajustée de la même manière [19].

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

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

Dans ce cas, l'ajustement pour rendre le débit de base plus grand se fait en augmentant C_0 , B_0 et A_0 comme [19]:

$$C_0' = k_1 C_0, \quad B_0' = k_2 B_0, \quad A_0' = k_3 A_0$$

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

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

$$\text{ou } k_1 = k, \quad k_2 = k^{1/2}, \quad k_3 = k^{1/4}$$

Comment ajuster la forme de l'hydrogramme

L'ajustement décrit ci-dessus va changer le volume de chaque composant de débit. Mais la forme de l'hydrogramme peut aussi être un problème. Par exemple, le pic de l'hydrogramme calculé peut être trop raide ou trop lisse par rapport à l'observé. Si le pic est trop raide, on doit mettre A_0 , A_1 , A_2 plus petits, en les multipliant par une constante k ($0 < k < 1$). De telle sorte, on peut ajuster la forme de l'hydrogramme de chaque composant de débit [19].

Comment déterminer les positions (hauteurs) des sorties latérales

Au Japon, l'expérience montre que s'il pleut moins de 15 mm après environ 15 jours secs, il n'y aura pas de changement dans la décharge de l'eau. La position de la sortie latérale basse du réservoir supérieur, $HA_1 = 15$, est déterminée à partir de cette expérience [19].

On sait aussi que quand il pleut plus de 50 mm environ, la décharge augmentera considérablement. La position de la sortie latérale haute du réservoir supérieur, $HA_2 = 40$, est déterminée de cette manière, compte tenu également de la perte d'eau à partir du réservoir supérieur par infiltration et ruissèlement pendant les précipitations [19].

Dans le Tank Model de la Fig. 2-10, les hauteurs des sorties latérales du deuxième et du troisième réservoir sont fixées à $HB = HC = 15$. Celles-ci sont déterminées comme étant similaires à $HA_1 = 15$, mais sans un bon raisonnement, car HB et HC ne sont pas aussi efficace comme HA_1 . L'effet de HB ou HC apparaît lorsque le composant du débit du deuxième ou du troisième réservoir disparaît sous une condition sèche [19].

2.3.2. Calibration automatique

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

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

On calcule les critères de volume et de la forme en chaque sous-période et on les utilise pour l'ajustement des réservoirs respectifs. Le processus de réaction commence de quelque modèle initial et il converge très vite après plusieurs itérations (en général moins de 15), et le résultat obtenu est très bon [18].

3. Mise en œuvre du modèle

Dans cette partie, on présente un modèle fonctionnel avec quatre réservoirs indiqué dans la fig. 2-11 :

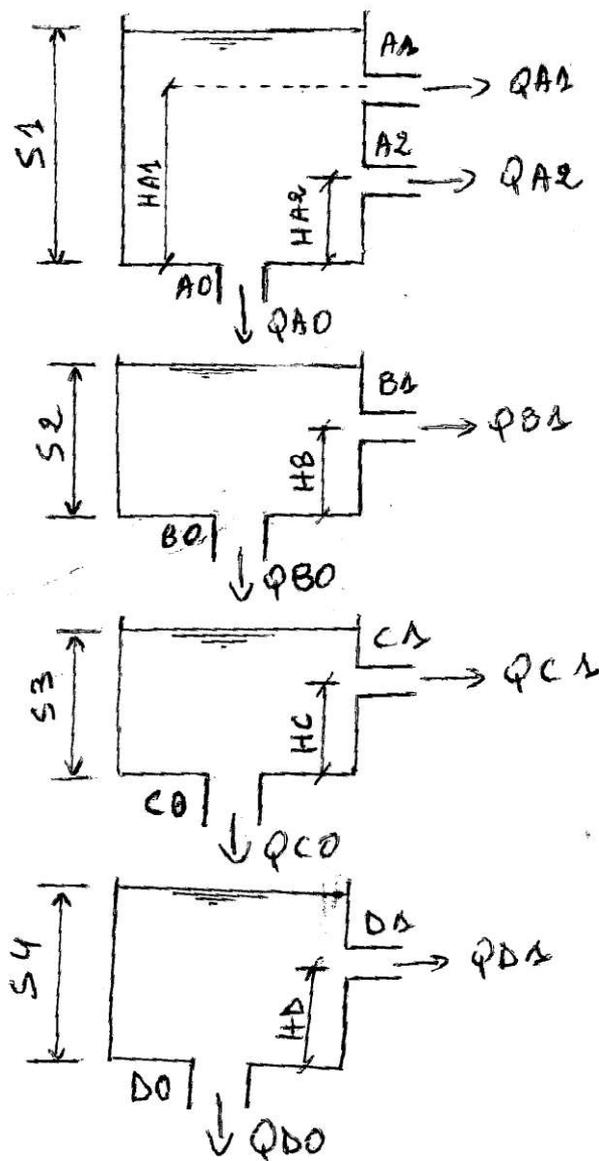


Figure 2-11 : Représentation du Tank Model étudié

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

Dans ce modèle, la relation entre le débit de sortie de chaque réservoir et la hauteur d'eau à la sortie est linéaire. Dans la Fig. 2-11, les coefficients de débit qui correspondent aux sorties QA1, QA2, QB1, QC1 et QD1 sont A1, A2, B1, C1 et D1, respectivement. Les coefficients d'infiltration, qui correspondent aux QA0, QB0, QC0 et QD0 sorties du fond des réservoirs sont A0, B0, C0 et D0, respectivement. Les hauteurs des quatre sorties latérales de chaque réservoir sont HA1, HA2, HB, HC et HD, ce dernier qui est toujours nul, mais il est considéré comme un paramètre du modèle. Ceux-ci sont les paramètres du Tank Model dans cette étude.

En supposant qu'au temps k-1, les stockages de chaque réservoir sont respectivement, S1(k-1), S2(k-1), S3(k-1) et S4(k-1) (les stockages sont exprimés en hauteur et pas en volume), c'est-à-dire en «mm»; Les débits latéraux QA1(k-1), QA2(k-1), QB1(k-1), QC1(k-1) et QD1(k-1) et les infiltrations QA0(k-1), QB0(k-1), QC0(k-1) et QD0(k-1) sont calculées. Les précipitations et l'évaporation observées sont P(k) et E(k) au temps k.

Le système des équations du modèle représente le changement de niveau d'eau dans chaque réservoir en tant que [19]:

$$\frac{dS1}{dk} = P(k) - E(k) - QA1(k-1) - QA2(k-1) - QA0(k-1)$$

$$\frac{dS2}{dk} = QA0(k-1) - QB1(k-1) - QB0(k-1)$$

$$\frac{dS3}{dk} = QB0(k-1) - QC1(k-1) - QC0(k-1)$$

$$\frac{dS4}{dk} = QC0(k-1) - QD1(k-1) - QD0(k-1)$$

Pour résoudre ces équations différentielles d'ordre 1, on fait intervenir la méthode des différences finies (méthode d'Euler implicite) :

$$\frac{dy^{[i]}}{dx} \approx \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x}$$

Et donc, en l'appliquant sur les équations précédentes :

$$S1(k) = S1(k-1) + P(k) - E(k) - QA1(k-1) - QA2(k-1) - QA0(k-1)$$

$$S2(k) = S2(k-1) + QA0(k-1) - QB1(k-1) - QB0(k-1)$$

$$S3(k) = S3(k-1) + QB0(k-1) - QC1(k-1) - QC0(k-1)$$

$$S4(k) = S4(k-1) + QC0(k-1) - QD1(k-1) - QD0(k-1)$$

Avec : $\Delta k = 1$ (le modèle suit un pas de temps journalier, et donc $\Delta k =$ un jour)

Chapitre 2. Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel (Tank Model)

Pour calculer la décharge (débit de sortie), on suppose une relation linéaire entre les débits et les hauteurs d'eau, et donc, Q est proportionnellement linéaire avec $(S - H)$ comme suivant [11] :

$$QA1 = \begin{cases} A1 \cdot (S1 - HA1), & S1 > HA1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$QA2 = \begin{cases} A2 \cdot (S1 - HA2), & S1 > HA2 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$QB1 = \begin{cases} B1 \cdot (S2 - HB), & S2 > HB \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$QC1 = \begin{cases} C1 \cdot (S3 - HC), & S3 > HC \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$QD1 = \begin{cases} D1 \cdot (S4 - HD), & S4 > HD \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Le débit d'infiltration vers le réservoir bas est calculé par les équations suivantes [19]:

$$QA0 = A0 \cdot S1$$

$$QB0 = B0 \cdot S2$$

$$QC0 = C0 \cdot S3$$

$$QD0 = D0 \cdot S4$$

Les débits calculés (de sortie et d'infiltration) sont pour un temps k , ainsi, ils représentent une unité de longueur par le temps (mm/j) ;

Le débit total au temps k est calculé par la relation suivante [19] :

$$Q(k) = QA1(k) + QA2(k) + QB1(k) + QC1(k) + QD1(k)$$

Ensuite, le processus de l'étape suivante au temps $k + 1$ se répète comme ci-dessus.

4. Applications des modèles conceptuels

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

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

5. Conclusion

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

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

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

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

Comme tous les modèles hydrologiques actuels, celui-ci reste perfectible, malgré les efforts déjà consentis pour le rendre aussi performant que possible. Les recherches continuent donc pour le faire progresser, et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant (Perrin et al., 2007).

Chapitre 3 . 3

FILTRE DE KALMAN

1. Introduction

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

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

Parmi les techniques permettant de réduire ces incertitudes figurent les procédures de mise à jour qu'on peut combiner avec le modèle pluie-débit. Ces procédures peuvent être représentées soit par des méthodes automatisées (par exemple le filtre de Kalman) soit par des méthodes manuellement interactives (par exemple l'essai-erreur).

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

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

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

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

Dans ce chapitre, on va présenter le filtre de Kalman en vue de la mise à jour des variables d'état du Tank Model.

2. Présentation du filtre de Kalman

- *Paternité*

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

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

Une grande variété de filtres de Kalman a été, depuis, développée à partir de la formulation originale dite filtre de Kalman simple. Schmidt développa le filtre de Kalman étendu, Bierman, Thornton et bien d'autres développèrent toute une gamme de filtres racine carrée.

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

- *Principe*

Pour comprendre un peu mieux le fonctionnement du filtre de Kalman et surtout son utilité, nous allons prendre un exemple de la vie quotidienne où vous l'utilisez sans vous en rendre compte où [5] :

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

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

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

mesures. Par exemple, en vous fatigant, vous allez moins vite et donc vous savez que vous repoussez votre arrivée d'autant.

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

- ***Points forts***

La force de ce filtre est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même. [6]

En effet, pour appliquer un filtre de Kalman, il faut avant tout modéliser le système pour lequel on veut estimer les paramètres, de manière linéaire. (Des variantes du filtre de Kalman existent pour la prise en compte de modèles non linéaires). [6]

Dans une méthode d'estimation classique (par exemple, la méthode des moindres carrés), une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur au niveau de l'estimation. La force du filtre de Kalman est d'intégrer un terme d'imprécision sur le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation (pour peu que les erreurs restent raisonnables). [6]

Un autre point fort du filtre de Kalman (mais que l'on retrouve aussi dans la méthode des moindres carrés par exemple) est sa capacité à déterminer l'erreur moyenne de son estimation. En effet, l'outil Kalman fournit un vecteur contenant les paramètres estimés, mais aussi une matrice de covariance de l'erreur. Cette matrice nous renseigne donc sur la précision de l'estimation, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications. [6]

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

- ***Limites***

Le filtre de Kalman est donc une méthode d'estimation et de prédiction puissante prenant en compte les modélisations du système. Néanmoins, ce filtre n'est pas forcément l'outil à appliquer dans tous les cas. En effet, comme nous l'avons vu, le développeur a besoin de modéliser le système assez précisément afin de designer un filtre efficace. Le problème est que certains systèmes sont difficilement modélisables et, encore moins linéairement. [6]

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

converge pas obligatoirement. Le second défaut est son coût calculatoire plus important. En effet, de nouvelles matrices coûteuses rentrent en jeu (les matrices des dérivés partielles des équations d'états et de mesures modélisant le système), ce qui peut être une limite à son utilisation, surtout dans des systèmes embarqués très restreint au niveau de la puissance de calcul. [6]

Le filtre de Kalman est une méthode visant à estimer des paramètres d'un système évoluant dans le temps à partir de mesures bruitées. Cependant, une autre limite importante d'une telle méthode est que le filtre de Kalman permet de prendre en compte uniquement un modèle de bruit Gaussien. Le bruit peut en général être modélisé de façon Gaussienne, mais dans certains cas, un autre type de bruit est requis (notamment en traitement d'images où l'on utilise fréquemment des bruits de Poisson). Cette restriction limite donc l'utilisation du filtre de Kalman. [6]

Le filtre de Kalman est donc une méthode d'estimation intéressante, mais qui n'est utilisable que lorsque l'on peut décrire assez précisément notre système. S'il est impossible de trouver une modélisation correcte du système, il est alors préférable de se tourner vers d'autres méthodes (comme la méthode de Monte-Carlo par exemple qui est une méthode statistique, mais qui requiert une importante puissance de calcul). [6]

3. 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. [10]

3.1. Modèle de Système

Le modèle de système à temps discret peut être obtenu dans les termes de matrice comme le suivant [10] :

$$\mathbf{X}(k) = \Phi(k|k-1) \cdot \mathbf{X}(k-1) + \Gamma(k|k-1) \cdot \mathbf{w}(k-1)$$

Avec :

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

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

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

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

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

3.2. 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 $v(k)$ [10] :

$$Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k)$$

Avec :

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

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

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

Les variables aléatoires $w(k)$ et $v(k)$ représentent le processus et le bruit de mesure. Ils sont supposés d'être des bruits blancs Gaussiens indépendants avec distribution de probabilité normale [11]:

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

$M(k)$ et $R(k)$ sont la covariance de bruit de processus et la covariance de bruit de mesure, respectivement [11].

3.3. Procédure de filtre de Kalman Standard

Le fonctionnement du filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes [6] :

- 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.

3.3.1. Prédiction

Supposant que l'estimation d'état $X(k-1|k-1)$ et la covariance $P(k-1|k-1)$ de l'estimation d'erreur d'état ont été données au temps $k-1$, et ensuite, la valeur de la prédiction d'état $\bar{X}(k|k-1)$ est donnée comme le suivant [11]:

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

Et la prédiction de la covariance $\bar{P}(k|k-1)$ est donnée comme le suivant [11]:

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

3.3.2. Mise à jour (Update)

En connaissant la valeur de prédiction de l'état $\bar{X}(k|k-1)$ et le vecteur de mesure (observation) $Z(k)$ du modèle, la valeur d'estimation d'état $X(k|k)$ est obtenue en filtrant l'erreur de mesure avec l'utilisation du gain de Kalman $K(k)$ comme le suivant [11]:

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

Où $\bar{Y}(k)$ c'est l'innovation (bruit de mesure) [17], tel que :

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

$K(k)$ est le gain de Kalman optimal, qui sert à innover la prédiction d'état, tel que [10]:

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

Où $S(k)$ c'est la covariance de l'innovation [8], tel que :

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

La covariance du bruit d'état au temps k est donnée comme le suivant [10]:

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

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.

3.4. 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.

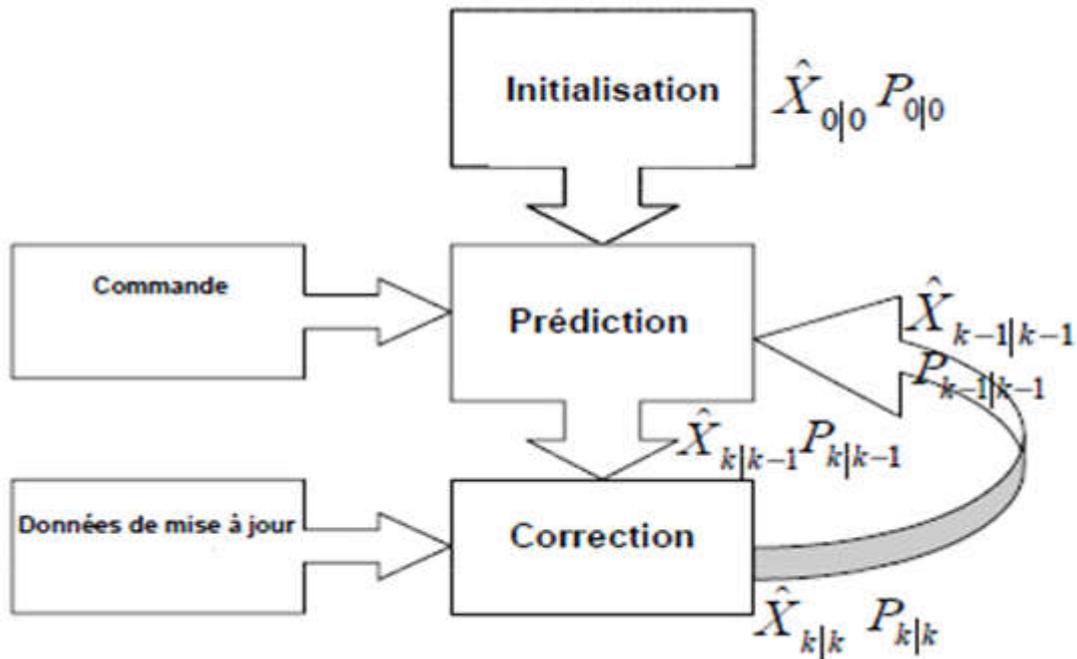


Figure 3-1 : Etapes du filtre de Kalman [16]

4. Couplage du Tank Model au Filtre de Kalman

Cette section décrit comment le Tank Model est incorporé 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.

4.1. Modèle de Système

Le vecteur d'état du modèle de système est composé par les paramètres du Tank Model. Par conséquent, le vecteur d'état $X(k)$: (14×1) est comme le suivant [10]:

$$X(k) = [A1, A2, B1, C1, D1, A0, B0, C0, D0, HA1, HA2, HB, HC, HD]^T$$

La matrice de transition d'état $\Phi(k)$: (14×14) , et la matrice de transition de bruit de système $\Gamma(k|k-1)$: (14×14) sont supposées comme matrices d'identités **I**, ensuite le modèle de système est écrit par [10]:

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

4.2. Modèle de Mesure

La variable d'observation appliquée au Tank Model est le débit Q . Pour cette raison, le modèle de mesure peut être écrit comme le suivant [10]:

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

Où $H(k)$: (1×14) est la matrice de transition de mesure (observation) défini par [10]:

$$H(k) = [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

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

Ces hauteurs sont définies par :

$$h_1 = S1 - HA1, \quad h_2 = S1 - HA2, \quad h_3 = S2 - HB,$$

$$h_4 = S3 - HC, \quad h_5 = S4 - HD$$

4.3. Algorithme récursif du couplage

Pour coupler le modèle à réservoirs (Tank Model) au filtre de Kalman, on doit utiliser les équations bien définies au-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 $P(k|k)$.

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

Après tout ces paramètres sont mis à jour, le processus continu pour le prochain pas de temps.

Dans cette figure, on va monter l'organigramme de l'algorithme de couplage du Tank Model au filtre de Kalman :

Chapitre 3. Filtre de Kalman

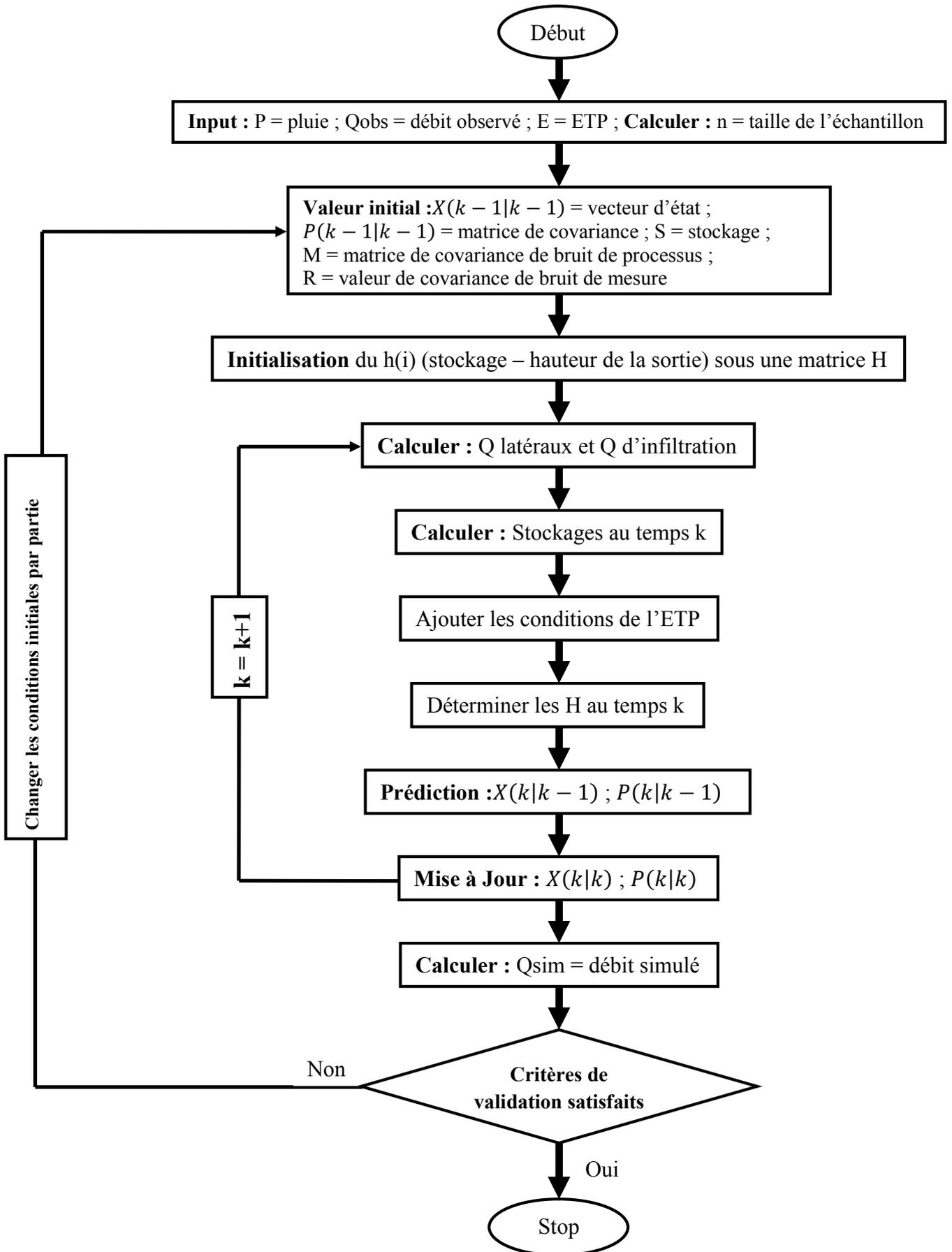


Figure 3-2 : Organigramme de l'algorithme de Couplage Tank Model - Filtre de Kalman

5. Filtre de Kalman Étendu (Extended) pour les systèmes non linéaires

Lorsque vous souhaitez appliquer un filtre de Kalman pour estimer des paramètres d'un système, la première chose à faire est de modéliser votre problème. Il se trouve que dans certain cas, les équations qui permettent de modéliser le problème ne sont pas linéaires. De ce fait, le filtre de Kalman n'est plus applicable tel quel. Heureusement, il est tout de même possible d'estimer les paramètres du système à l'aide d'un filtre de Kalman dit étendu. Ce filtre permet en effet de linéariser localement le problème et donc d'appliquer les équations du filtre de Kalman classique [7].

- **Fonctionnement**

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

On remplace donc les équations [5] :

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

On est donc obligé d'appliquer ces équations non linéaires pour le calcul de la prédiction et la mise à jour du vecteur d'état. Les équations de Kalman deviennent donc [7]:

Prédiction

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

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

Après avoir obtenu la valeur des sorties du système, nous pouvons calculer la valeur du gain de Kalman $K(k)$, puis la nouvelle valeur de l'état estimé, pour finalement actualiser la valeur de la matrice de covariance [5]. Pour ce faire, nous utilisons les équations suivantes, appelées équations d'actualisation (mise à jour) [7] :

Mise à jour

$$X(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + K(k) \cdot (Z(k) - h(\bar{X}(k|k-1)))$$

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

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

Il reste un problème en ce qui concerne le calcul de la covariance de l'erreur et du gain de Kalman. En effet, on utilise toujours les matrices d'observation et de transition \mathbf{H} et Φ . Pour pouvoir utiliser ces formules, il faut donc que l'on linéarise localement les fonctions \mathbf{h} et \mathbf{f} . On obtient donc les matrices d'observation et de transition en prenant les matrices des dérivées partielles des équations non linéaires (aussi appelé Jacobiennes) [7].

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

Avec ces Jacobiennes, il est donc possible d'appliquer le filtre de Kalman tel que défini ci-dessus. Il suffit de recalculer les matrices aux dérivées partielles à chaque nouvel échantillon à traiter et d'utiliser ces matrices dans les équations [7].

Par contre, on se rend bien compte que l'on linéarise localement les équations afin d'appliquer le filtre de Kalman. Cette linéarisation est locale, ce qui entraîne donc une convergence locale du filtre de Kalman étendu. Ce filtre ne garantit donc pas une convergence globale (à l'inverse du filtre de Kalman classique). La stabilité d'un EKF est donc plus difficile à garantir et dépend souvent de sa bonne initialisation [7].

6. Application du filtre de Kalman

6.1. Dans les divers domaines

Les applications du filtre de Kalman sont nombreuses dans les métiers de l'ingénieur. Le filtre de Kalman permettant de donner un estimé de l'état de système à partir d'une information a priori sur l'évolution de cet état (modèle) et de mesures réelles, il est utilisé dans les **Systèmes de localisation dynamique**, **Centrale inertielle**, **Pilote automatique**, **Cartographie et localisation simultanées (SLAM)**, **Système de positionnement par satellites** [8].

Il sera utilisé aussi pour estimer des conditions initiales inconnues (**balistique**), prédire des trajectoires de mobiles (**trajectographie**), localiser un engin (**navigation, radar,...**) et également pour implanter des lois de commande fondées sur un estimateur de l'état et un retour d'état (**Commande Linéaire Quadratique Gaussienne**). Les bases de traitement de signal sur lesquelles repose le filtre de Kalman seront également utiles à tout ingénieur confronté à des problèmes de définition de protocoles d'essais, de dépouillements d'essais et également d'**identification paramétrique**, c'est-à-dire la détermination expérimentale de certains paramètres du modèle [1].

6.2. En hydrologie

Les techniques d'assimilation des données sont couramment employées dans des domaines aussi différents que l'hydrologie, la médecine ou la physique spatiale, notamment pour l'estimation des trajectoires lorsque les moyens de mesure sont multiples. Le filtre de Kalman est adapté au filtrage linéaire récursif de données discrètes. Le filtre fournit une estimation du vecteur d'état et de sa matrice de covariance des erreurs qui contient les informations concernant la précision des variables [17].

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

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses études utilisant le filtre de Kalman dans la modélisation pluie-débit ont été présentées dans la littérature par exemple Bálint en 2002. Un grand nombre de ces études a utilisé des modèles très simples de prévision du débit, tel que les modèles à moyenne mobile auto-régressive (ARMA) et les modèles à réservoir linéaire [17]. Peu d'études ont été réalisées sur le filtre de Kalman en combinaison avec des approches plus avancées de modèle conceptuel pluie-débit. Quelques exemples importants et représentatifs des filtres de Kalman en combinaison avec des modèles pluie-débit sont les contributions de Wood & Szöllösi-Nagy en 1978 et Kitanidis & Bras en 1980. Un filtre Kalman étendu a été intégré dans le Système de Prévision de Rivière du Service National Météo (NWSRFS) des Etats Unis qui est basé sur le modèle conceptuel non-linéaire Sacramento d'humidité du sol [17]. L'état du système y est représenté par le contenu en eau dans les différents réservoirs constituant le modèle et les sorties sont les débits. Wood & O'Connell en 1985 ont intégré dans le NWSRFS un filtre de Kalman standard. Ils ont testé différentes méthodes pour l'estimation simultanée des variables d'état et des paramètres. Les concepts de l'hydrogramme unitaire et de la précipitation antérieure ont été utilisés par Husain en 1985 avec un filtre de Kalman standard pour simuler divers événements de crue. Georgakakos en 1986 a développé un modèle hydrométéorologique conceptuel qui consiste en un modèle de la précipitation, un modèle d'humidité du sol (une modification du modèle Sacramento d'humidité du sol) et un modèle d'acheminement de l'écoulement. Le modèle stochastique a été traduit en une forme d'état spatial et a été utilisé en combinaison avec un filtre de Kalman étendu, donnant une bonne performance comparativement à d'autres méthodes de prévision. Le même modèle conceptuel a été utilisé par Puente & Bras en 1987 pour tester plusieurs variantes du filtre de Kalman non-linéaire. Georgakakos & Smith aussi en 1990 ont utilisé le même modèle d'humidité du sol et un modèle d'écoulement en combinaison avec un filtre de Kalman étendu. Ils rapportent une prévision généralement améliorée et concluent que cette approche est faisable dans un environnement opérationnel pour la prévision en temps réel [17]. Lee & Singh ont intégré un filtre de Kalman standard

avec le modèle de la cascade de réservoirs linéaires de Nash et un modèle à réservoir [10]. Ils ont trouvé que la précision des deux modèles a augmenté, son incertitude ayant été réduite. Un filtre de Kalman standard a été intégré avec succès dans le modèle conceptuel pluie-débit IHACRES par Schreider et al. en 2001. Quesney et al. en 2000 ont utilisé un filtre de Kalman étendu pour l'assimilation de mesures d'humidité de surface (par télédétection Radar ERS/SAR) dans un modèle hydrologique conceptuel global. Un modèle dynamique linéaire spatio-temporel a été développé par Amisigo & van de Giesen en 2005 pour combler les lacunes dans des séries de débit journalier. Ils utilisent à cet effet un filtre de Kalman pour l'estimation des variables d'état [17].

Il y a peu d'exemples qui illustrent la capacité d'un filtre de Kalman d'ensemble en modélisation pluie-débit. Cependant un des exemples en hydrologie est présenté par Hartnack & Madsen en 2001 où un filtre de Kalman d'ensemble a été utilisé pour améliorer la performance de la partie hydraulique du modèle MIKE 11. Les tests qui ont été exécutés admettent l'existence d'erreurs dans la condition aux limites du débit du modèle MIKE 11 et proposent de les rectifier en utilisant le niveau d'eau et les mesures de débit. Les auteurs concluent que la performance totale du filtre était très satisfaisante dans tous les tests réalisés. Un autre exemple tout récent est présenté par Moradkhani et al. en 2005 qui utilisent une approche d'estimation paramètre-état basée sur le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) pour l'estimation séquentielle à la fois des paramètres et des variables d'états d'un modèle hydrologique conceptuel. Troch et al. en 2003, dans un essai sur les méthodes d'assimilation dans la modélisation hydrologique, affirment que l'accent devrait être mis dans les études futures sur l'intégration à l'échelle du bassin versant du filtre de Kalman à travers la modélisation pluie-débit [17].

7. Conclusion

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

Ce type de filtre a été utilisé déjà en hydrologie par plusieurs chercheurs (ex : Lee & Singh), et en général il a été couplé par le Tank Model. Par contre, il est appliqué pour la première fois en Algérie dans le domaine de l'hydrologie par l'occasion de cette mémoire. En effet, notre programme a traité le couplage de Tank Model au filtre de Kalman avec le langage MATLAB.

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

Chapitre 4 .

**PRESENTATION DE LA
ZONE D'ETUDE**

4

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

1. Introduction

Le réseau hydrologique algérien est divisé en neuf (9) bassins versants tributaires de la Méditerranée tels que le bassin du Cheliff, du Seybouse, et huit (8) bassins endoréiques et sahariens.

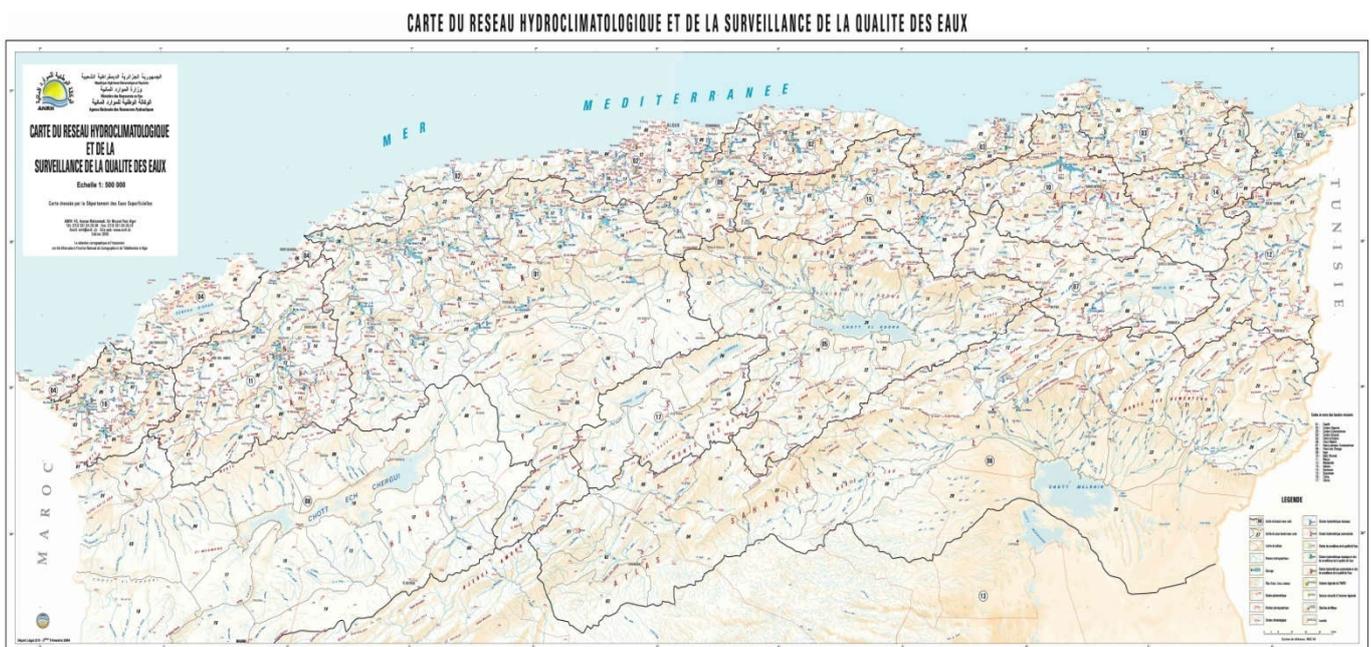
Le régime d'écoulement des cours d'eau algériens est variable, cependant les affluents secondaires et tertiaires présentent un écoulement faible et temporaire [3].

Pour l'application de la modélisation de la relation pluie-débit, nous avons choisi le bassin versant de BOUCHEGOUF de Oued Mellah, qui est un des sous bassins du bassin versant SEYBOUSE (moyenne Seybouse).

Le bassin versant étudié présente un climat méditerranéen avec un comportement saisonnier, où on observe une succession de saisons sèches et pluvieuses très contrastée à l'échelle annuelle, et des régimes d'écoulement très variables à l'échelle inter-annuelle.

Il est nécessaire de disposer d'un échantillon de données hydrométéorologiques à savoir les pluies, les évapotranspirations et les débits liquides pour un pas de temps identique et concomitant (journalier dans notre cas).

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



2. Description du bassin versant

Le bassin versant de Bouchegouf codé(1405) par l'ANRH, est situé au Nord-Est de l'Algérie. Il appartient au bassin de la Seybouse (fig. 4-2) à l'amont de l'Oued Seybouse (la moyenne Seybouse) dans les territoires de la wilaya de Guelma. Sa superficie totale est de 550 km² de Djebel Ras El Alia (1317m d'altitude) jusqu'à la vallée de Bouchegouf (environ 100m) [14].

Le bassin versant de Bouchegouf se trouve du côté droit du bassin de Seybouse, il est limité au Nord par le bassin de côtiers constantinois-est, à l'est par le bassin de Medjerdah, au sud par les bassins de l'Oued Cherf et de Oued Bouhamdane, à l'ouest par les deux bassins de Guelma (moyenne Seybouse) et Ain Berda (Oued Ressoul) (fig. 4-2).

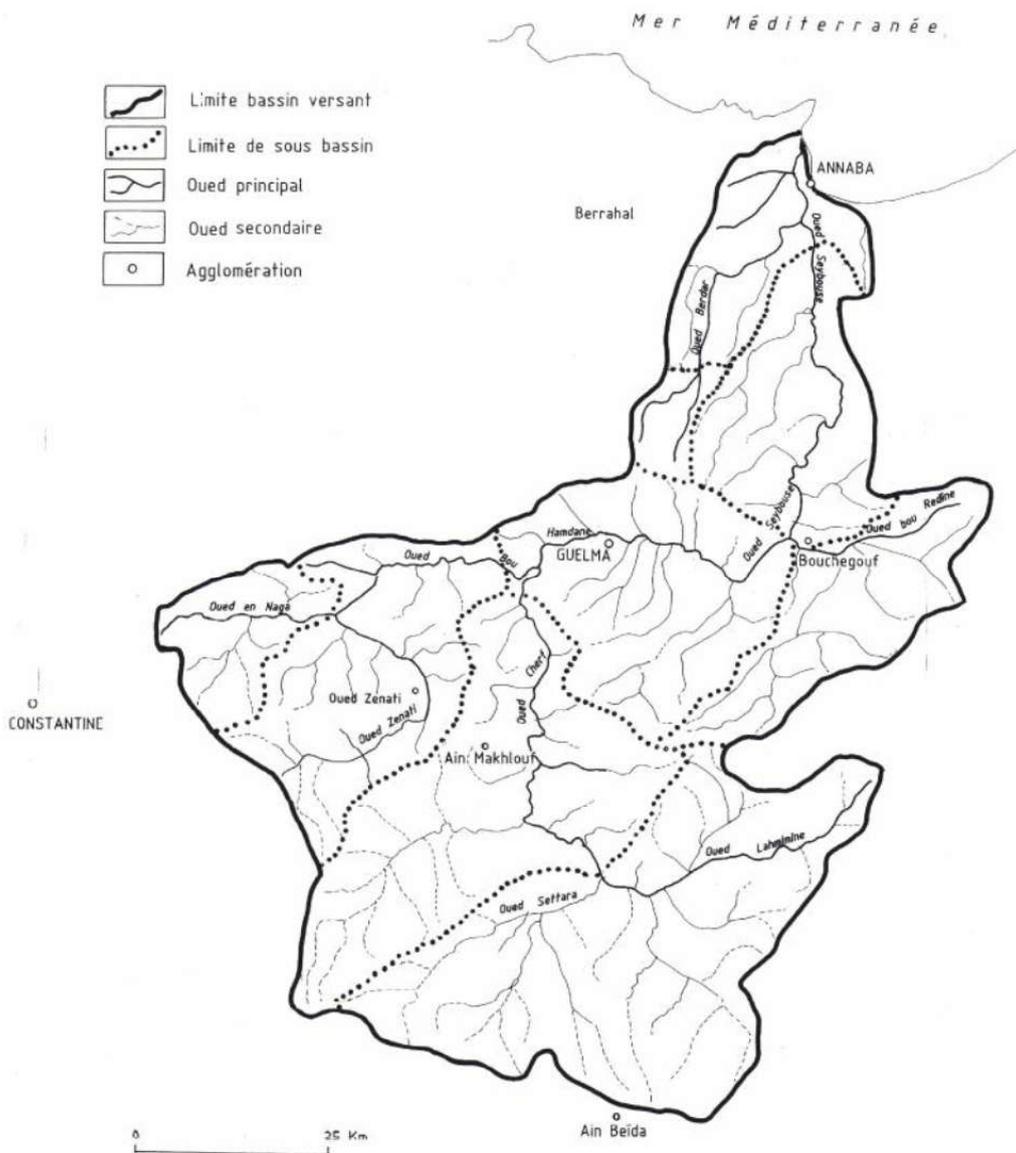


Figure 4-2 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Seybouse [12]

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

Le principal affluent de ce bassin est Oued Mellah, il doit son nom à la forte salinité des eaux dans le bassin aval. Son profil en long est caractérisé par une courbe à très forte pente (la dénivelée brute du bassin est importante 1222 m), ce qui révèle son caractère torrentiel [12].

Il est important de noter que près de 70% de la surface du bassin se situe à une altitude supérieure à 500m [12].

Le bassin peut être décomposé en trois zones différenciées [12] indiqué dans la fig. 4-3 :

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

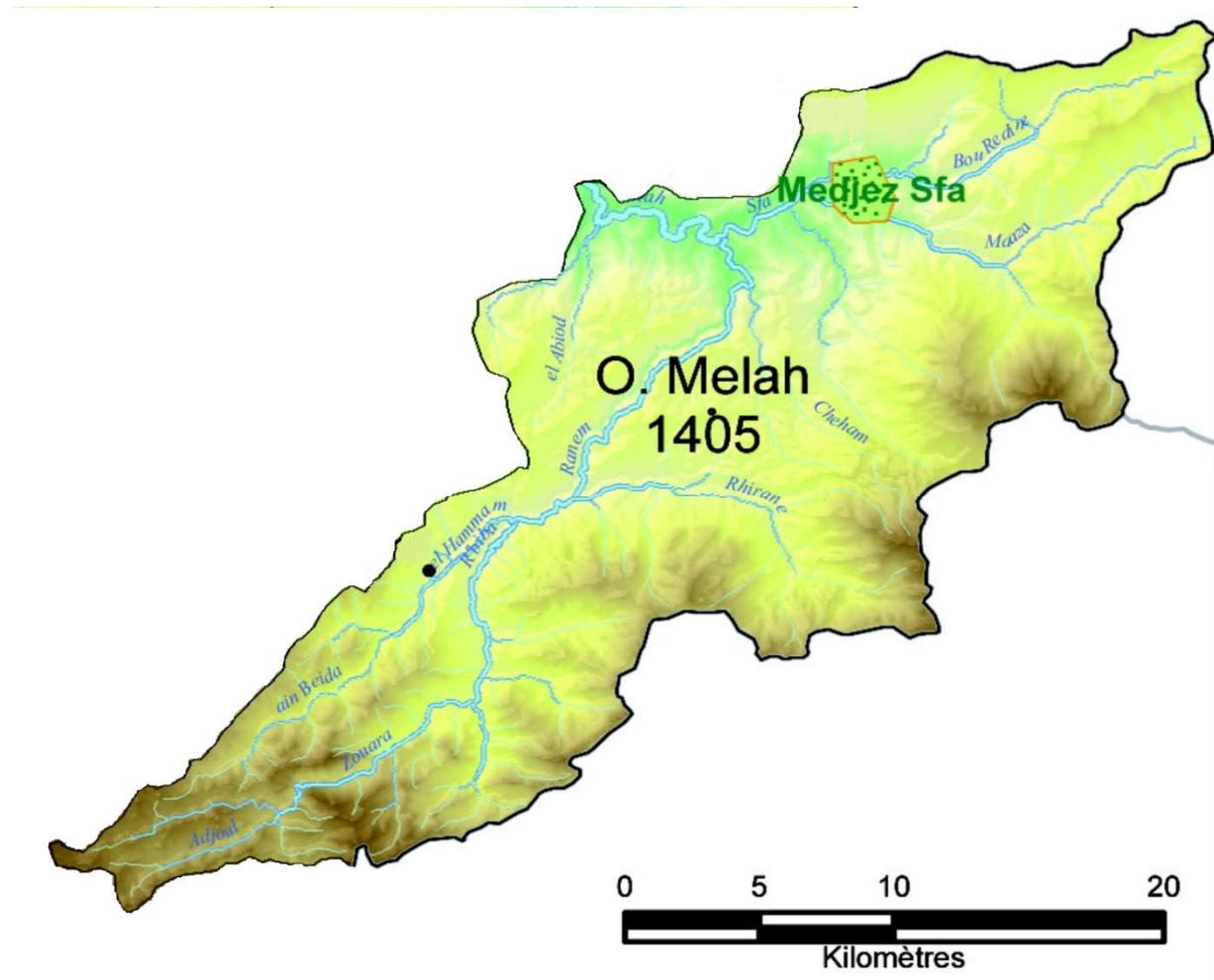


Figure 4-3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Bouchegouf (ABHCS-M, 2013)

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

2.1.Climat

La région d'étude est soumise à un climat Méditerranéen tempéré, caractérisé par deux saisons d'inégales durées (fig. 4-4):

- Un hiver doux et humide allant d'Octobre à Mai.
- Un été chaud et sec allant de Mai à Octobre.

2.1.1. Diagramme Ombro-Thermique

Le diagramme ombrothermique établi, montre l'existence de deux saisons bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du mois de Mai (20°C), jusqu'au mois d'Octobre (24°C).
- Une saison humide plus longue qui dure environ sept mois et s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai.

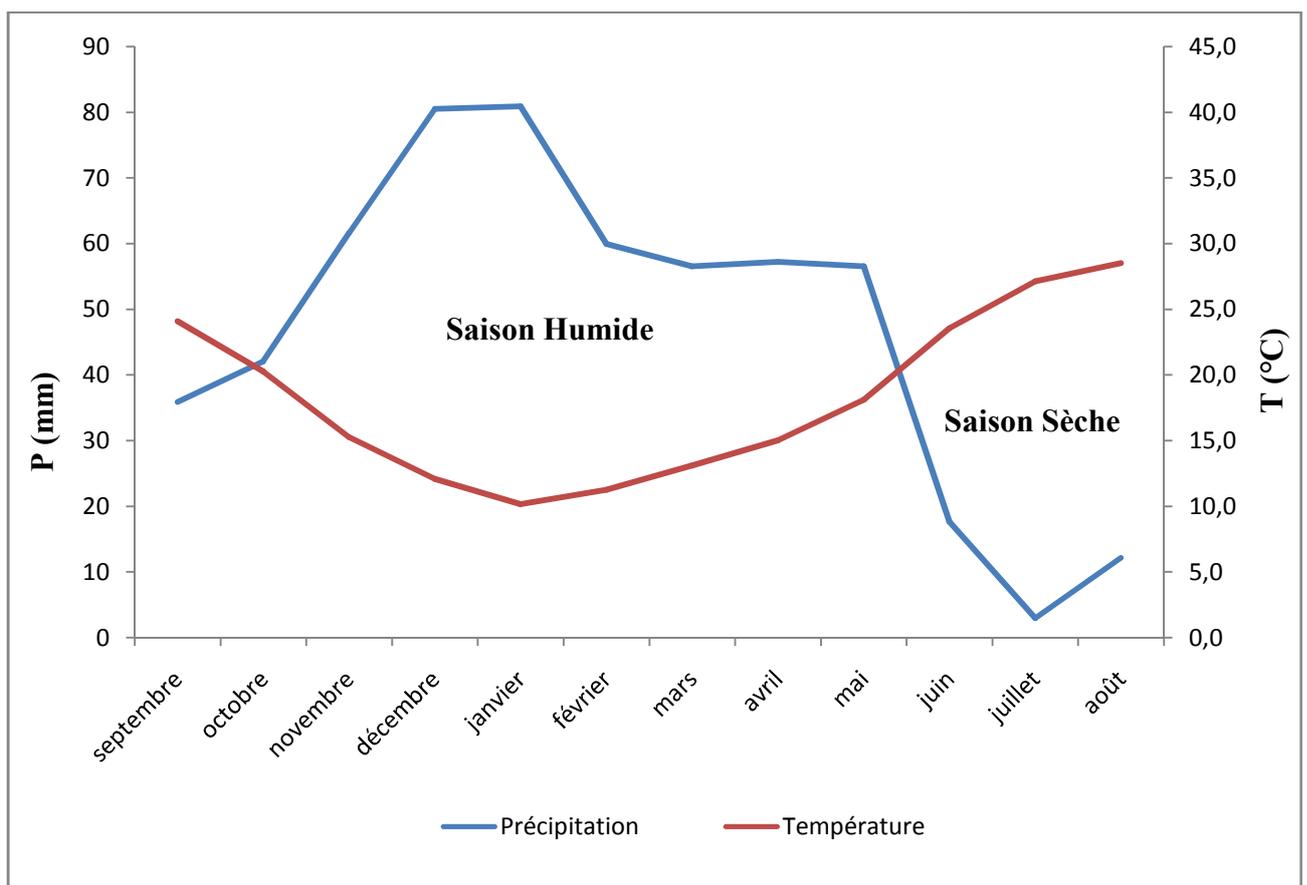


Figure 4-4 : Diagramme ombrothermique de la station de Bouchegouf (1985/2003)

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

2.1.2. L'indice climatique de DE MARTONNE (1923)

Pour déterminer le type du climat, on utilise l'indice d'aridité « A » de DE MARTONNE indiqué dans le tableau 4-1, qui donne les caractéristiques du climat régional. Il est en fonction de la température et la précipitation :

$$A = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en mm,

T : température moyenne annuelle en °C,

A : indice d'aridité de DE MARTONNE annuelle,

Tableau 4-1: Type du climat selon DE MARTONNE

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

Les résultats sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau 4-2 : Indice annuel d'aridité de la station de Bouchegouf [14]

Station	P (mm)	T (°C)	A	Observation
Bouchegouf (85/86 – 05/06)	574.95	18.13	20.44	Climat Tempéré

2.2. Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant

La région Guelma - Bouchegouf est constituée essentiellement de deux formations géologiques qui affleurent le long de la région d'étude; les formations mio-pliocène et quaternaires. Ces formations sont constituées essentiellement d'alluvions (graviers, limons, conglomérats, travertins perméables) présents sur l'ensemble du terrain et offre par conséquent un intérêt hydrogéologique, le trias gypsifère qui affleure au Sud de la région de Bouchegouf, qui est à l'origine de la contamination par les sels [14].

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

L'étude géomorphologique fait ressortir la très grande diversité lithologique qui entraîne obligatoirement des conséquences sur la stabilité du régime des eaux de surface et souterraines [14].

La région de Bouchegouf est d'un caractère montagneux à aspect monotone sur toute son étendue. L'altitude moyenne de la chaîne tellienne locale est d'environ 500 m, par contre celle du fond de la vallée atteint environ 110m [14].

Ce qui est important à noter est le recouvrement d'environ 75% de la partie Nord-Est de la région par un relief montagneux et les immenses étendues forestières de Beni Mezline, Beni Salah et Ouled Bechiah [14].

Le bassin versant de Bouchegouf est caractérisé par une morphologie très accidenté (les pentes très fortes (>30%) couvrent 30% de sa surface [14]), et une lithologie diversifiée de terrains avec une prédominance du Trias gypsifère qui se développe en Diapir de Hammam N'babils au Sud à Nador et Bouchegouf au Nord. (A. Hachi, 1982).

Au niveau de la plaine de Bouchegouf, l'important morcellement des calcaires et le recouvrement alluvionnaire du bassin font que ce bassin versant présente une perméabilité importante. Cette dernière est soutenue surtout par les apports induits d'Oued Mellah [14].

2.3. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Les indices morphométriques élaborés par différents organismes dont l'ORSTOM et certains auteurs (Giandotti) permettent des comparaisons entre les bassins et servent parmi les facteurs explicatifs des processus hydrologiques. Selon les hydrologues (Roche, 1963; Strahler, 1964) ; Dubreuil, 1974), les caractéristiques physiques des bassins-versants dont celles liées à la topographie mais aussi la forme du bassin-versant, influent sur les caractéristiques des écoulements résultant des pluies. Cependant, l'utilisation des indices morphométriques qui ont une valeur globale doit être complétée par l'analyse à partir des cartes.

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

Leur degré de signification dépend aussi de la résolution des M.N.A. et des M.N.T.

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

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

Tableau 4-3 : Caractéristiques morphométriques du bassin d'Oued Mellah à la station de Bouchegouf d'après (A.N.R.H), Mebarki (2005)

Paramètres	Bassin de Bouchegouf
Superficie (km ²)	550
Périmètre (km)	120
Longueur du rectangle équivalent (km)	48.7
Longueur du Thalweg principal (km)	53
Altitude max. (m)	1317
Altitude min. (m)	95
Altitude moyenne (m)	641
Coefficient de compacité Kc	1.43
Indice de pente de Roche	0.15
Coefficient de torrentialité	25.2
Pente moyenne (m/km)	240
Dénivelée spécifique (m)	346.7
Temps de concentration (h)	9.19
Densité de drainage (km/km ²)	4
Classe de relief (selon Dubreuil & Guiscafne, 1974)	R6 (Relief fort)

3. Données Utilisées

Les modèles pluie-débit intègrent généralement trois types de variables hydrométéorologiques, à savoir les précipitations, l'évapotranspiration, et le débit observé d'une station hydrométrique.

Le bassin versant d'Oued Mellah contient six stations pluviométriques distribuées sur l'ensemble de la superficie du bassin, et une station hydrométrique qui se trouve à l'exutoire (fig. 4-5).

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

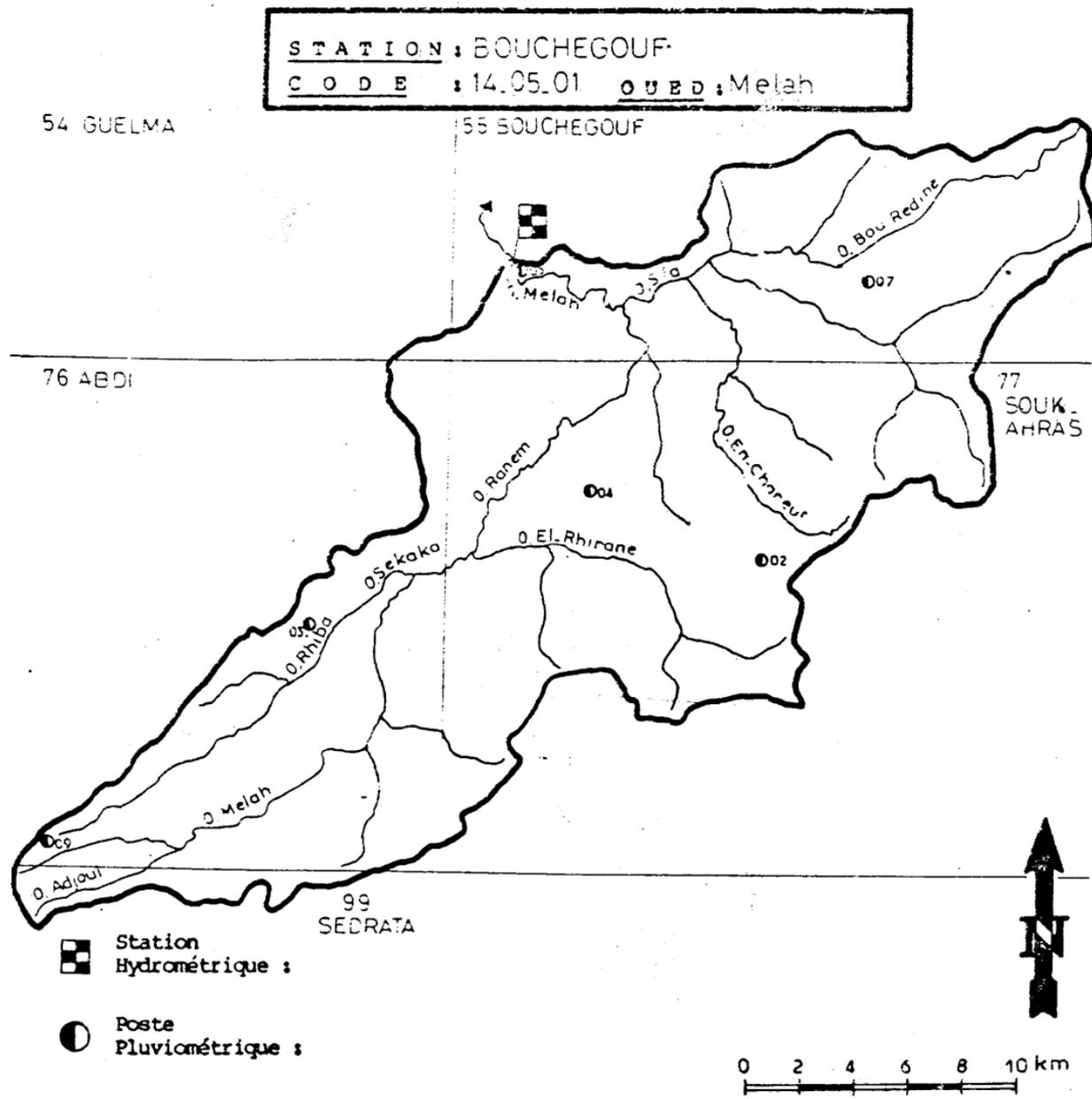


Figure 4-5 : Carte de localisation des stations pluviométriques et hydrométriques de mesure du bassin de Bouchegouf (A.N.R.H)

3.1. Données hydrométriques

L'Oued Mellah est principalement contrôlé par une station hydrométrique codée (14 05 01) par l'ANRH, elle se situe dans l'exutoire du bassin et loin de moins de 5km de la ville de Bouchegouf où elle a pris le nom de cette dernière.

Les coordonnées de la station hydrométrique de Bouchegouf sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

Tableau 4-4 : Coordonnées géographiques de la station hydrométrique de Bouchegouf [12]

X	Y	Z
949.60	362.10	95

Les données hydrométriques journalières ont été recueillies auprès de l'ANRH et elles ne présentent pas des lacunes. La période d'observations s'étend de Septembre 1985/Août 1995, et de Septembre 1996/Avril 2003, et donc une période de seize ans et huit mois avec une année vide (sans données) 1995/1996.

Les données obtenues ont été transformées en lames journalières (mm). Elles sont représentées à partir de l'histogramme (fig. 4-6).

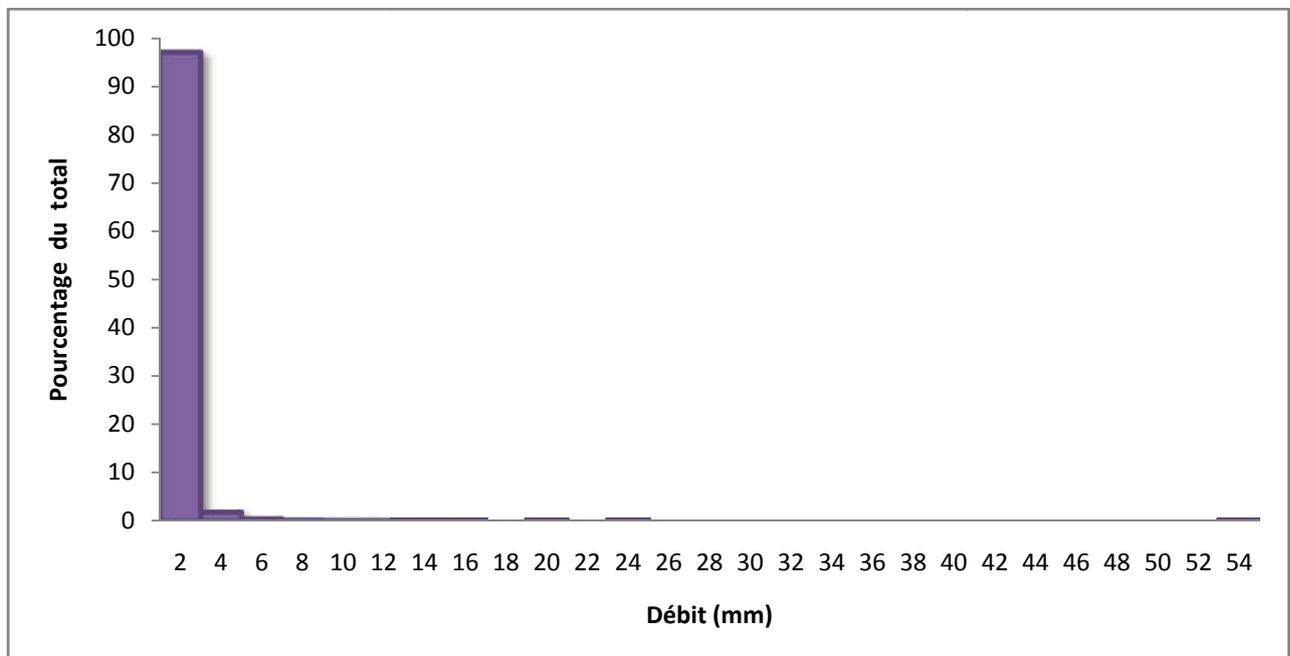


Figure 4-6 : Histogramme des débits journaliers de la station de Bouchegouf

D'après notre histogramme, on remarque que plus de 97% des débits sont compris entre 0 et 2 mm, et cela justifie les résultats déjà trouvés sur le type du climat de la région d'étude.

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

3.2. Données pluviométriques

Le bassin versant de Bouchegouf est équipé de six postes pluviométriques répartis à travers le petit bassin. Par contre, ces stations connaissent un grand manque de données. Et pour cela, nous avons choisi la station pluviométrique de Bouchegouf codée (14 05 05) et contrôlée par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) à cause de la disponibilité des données, et aussi, car elle ne présente pas trop de lacunes pour toute la période étudiée.

Le bassin versant étudié est caractérisé par une petite superficie, et donc le choix d'une seule station n'influencera pas sur la qualité des résultats puisque la quantité d'eau (précipitation) qui tombe sur tout le bassin est presque homogène.

Les données pluviométriques journalières ont été recueillies au près de l'ANRH et elles présentent peu de lacunes. La période d'observations s'étend de Septembre 1985/Août 1995, et de Septembre 1996/Avril 2003.

Les coordonnées de la station pluviométrique de Bouchegouf sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4-5 : Coordonnées géographiques de la station pluviométrique de Bouchegouf [14]

Longitude	Latitude	Altitude (m)
07° 44' E	36° 28' N	480

Les données obtenues ont été transformées en lames journalières (mm) en divisant les valeurs brutes par dix. Elles sont représentées à partir de l'histogramme (fig. 4-7).

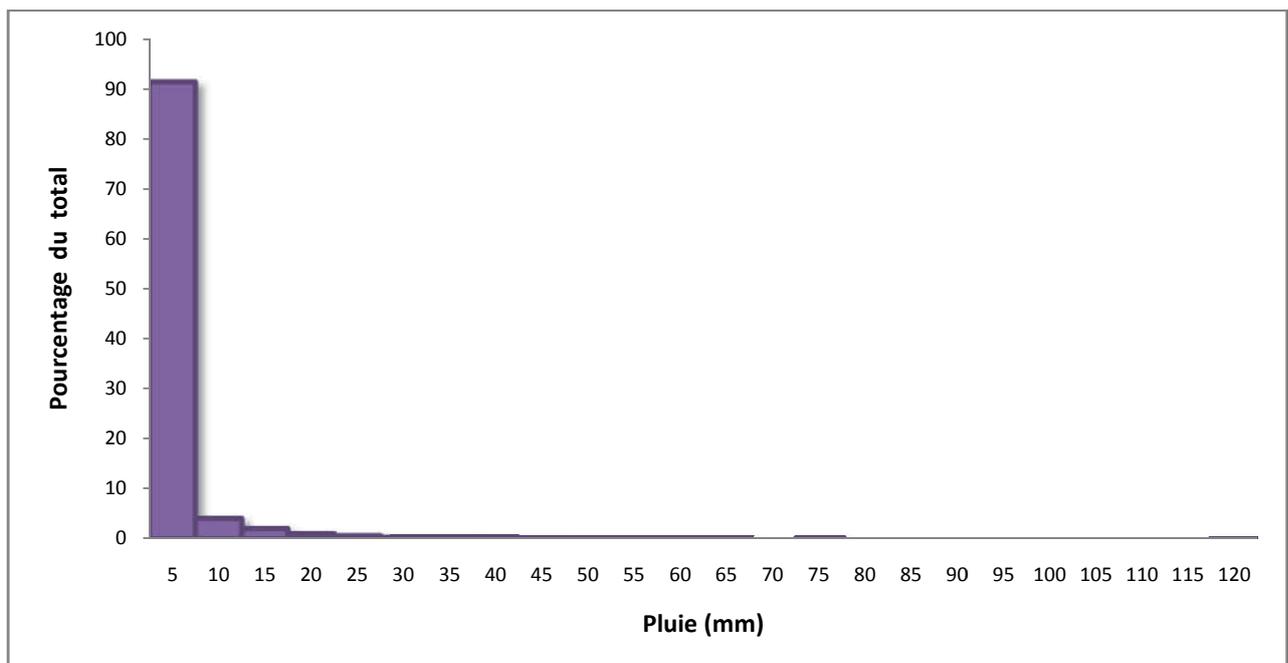


Figure 4-7 : Histogramme de pluies journalières de la station de Bouchegouf

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

L'analyse des histogrammes indique, que plus de 90% des pluies sont compris entre 0 et 5mm, avec la présence de quelques pics de pluie, ce qui correspond effectivement aux caractéristiques du climat tempéré – semi-aride dont fait partie le nord d'Algérie.

Pour avoir une vue générale sur les données hydrométéorologiques recueillies, plus précisément, les données de pluie et de débit, on trace un graphe qui représente les variations du débit et de débit en fonction du temps (fig. 4-8).

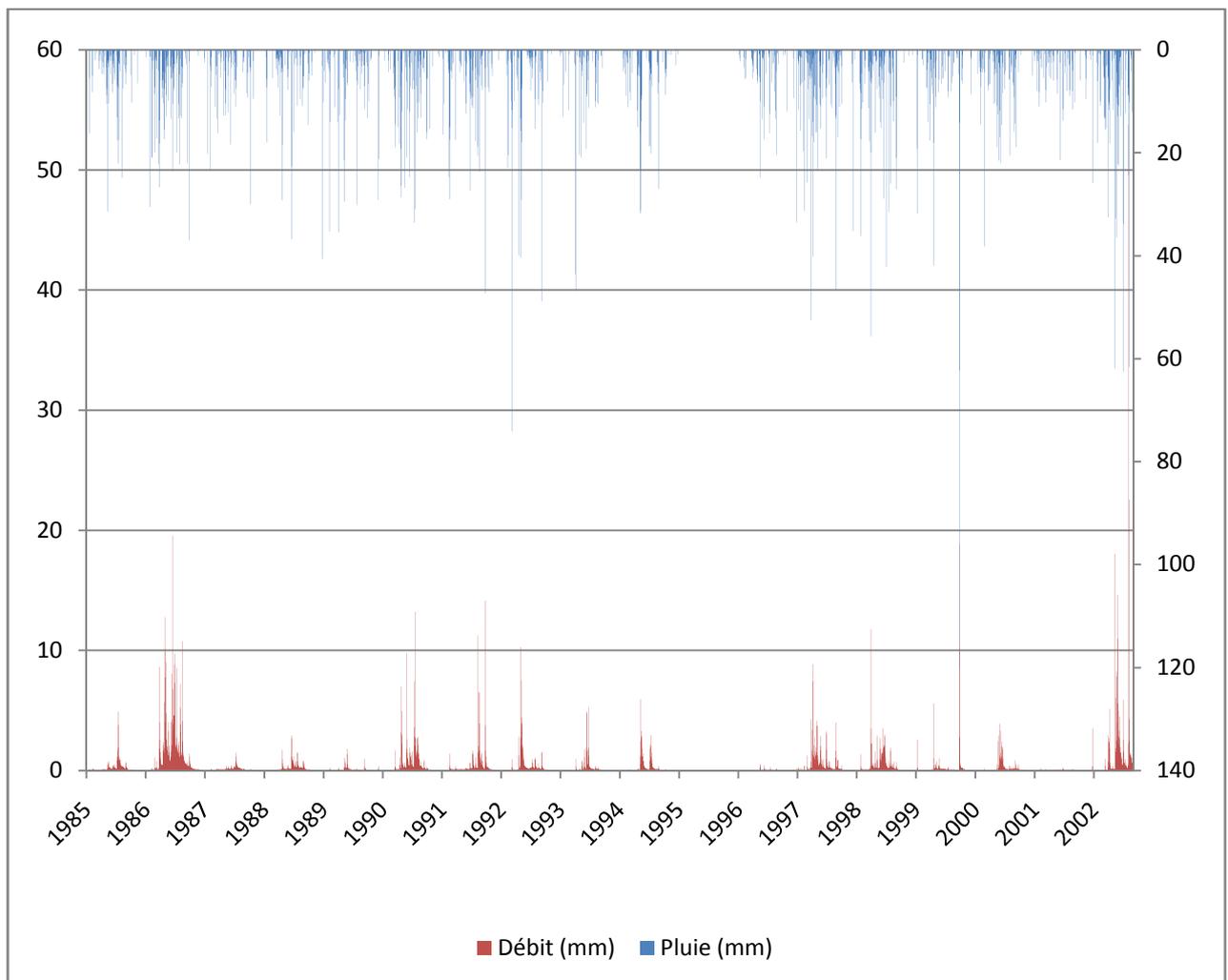


Figure 4-8 : L'hydrogramme résultant d'un hyétogramme donné pour toute la période d'étude

D'après cette figure, on remarque que l'année hydrologique qui s'étale entre le 01/09/1995 et le 31/08/1996 est manquante. Cela est adapté en hydrologie appliquée, on est amené à considérer la première période comme période de calage et la seconde comme période de validation, et puis on trouve que ce choix est compatible avec l'approche 2/3 et 1/3.

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

3.3. 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 des végétaux. [3]

En comparant quatre modèles conceptuels sur plus de 300 bassins versants européens et autres, les tests réalisés par Oudin en 2004, ont confirmé qu'une donnée précise (datée) d'évapotranspiration n'apporte pas d'amélioration systématique des performances des modèles pluie-débit, et que des données d'ETP à grande échelle fournissent des entrées aussi acceptables pour les modèles. [3]

Plusieurs méthodes peuvent estimer l'évapotranspiration potentielle, soit par des évaporomètres, soit par des formules empiriques.

Dans notre cas, nous avons opté pour le modèle de Oudin en calculant l'ETP par la température et la latitude. Les données de la température sont importées du site « Global Weather Data for SWAT » pour une période de 200 mois du 01/09/1985 jusqu'au 31/04/2003.

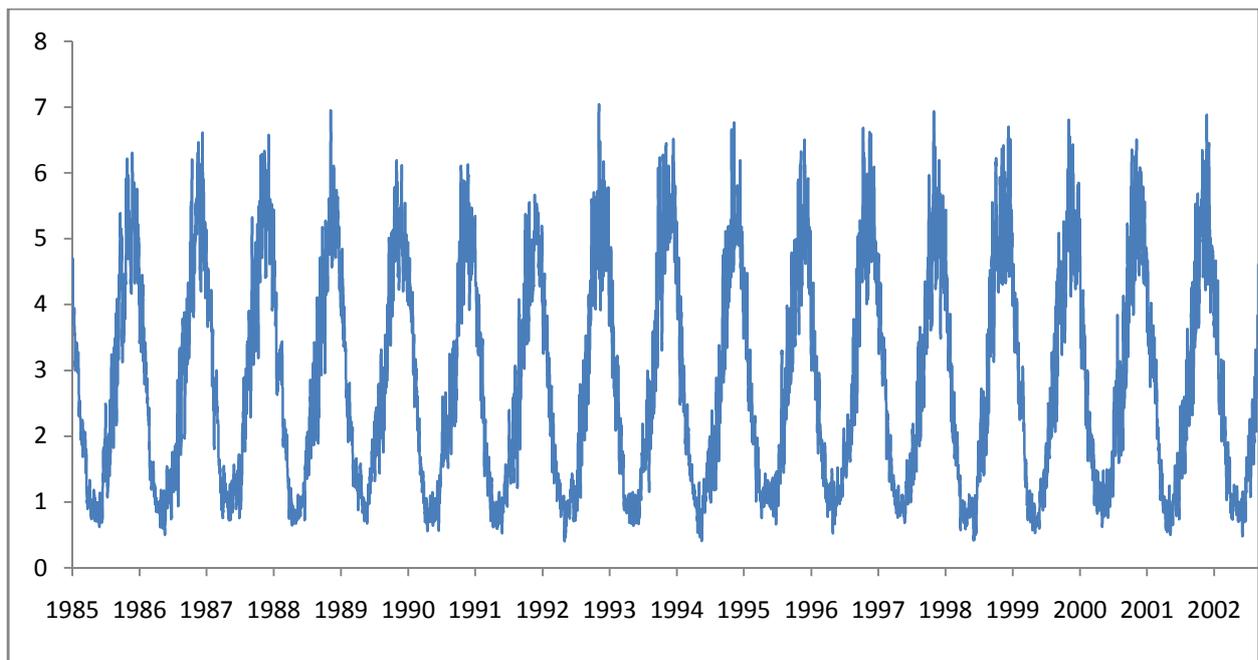


Figure 4-9 : Données de l'évapotranspiration (mm) de la région de Bouchegouf pour toute la période d'étude

Dans le tableau ci-dessous, on résume les statistiques simples des données hydrométéorologiques recueillies, à savoir les précipitations, et le débit observé de la station de Bouchegouf, et l'évapotranspiration pour l'ensemble de la région.

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

Tableau 4-6 : Statistiques descriptées des données d'Oued Mellah, Bouchegouf

Statistique (mm)	Pluie	Débit	ETP
Min	0	0	0.40
1 ^{er} quantile	0	0.0212	1.23
Médiane	0	0.0526	2.28
Moyenne	1.46	0.2989	2.79
3 ^{ème} quantile	0	0.152	3.92
Max	120	53.731	7.04

4. Critiques des données

Les données pluviométriques et hydrométriques proviennent d'une mesure peuvent comporter des erreurs (systématiques ou accidentelles), et pour garantir la qualité des données, on doit les critiquer en suivant les étapes suivantes [9]:

- Compléter les données manquantes dans les séries d'observations ;
- Détecter et corriger les erreurs ;
- Vérifier la permanence des données dans le temps.

4.1. Comblement de lacunes

Dans la pratique courante, de nombreuses causes concourent pour entraîner l'absence de certaines informations : absences de mesure, défaut de transmission, erreur de stockage, manipulation erronée, etc. Cela fait que dans les fichiers disponibles certaines données sont manquantes [9].

Le comblement des données manquantes peut se faire soit par [9]:

- Le calcul de la moyenne journalière interannuelle ;
- La regression Linéaire ;
- La simulation.

La station de Bouchegouf ne présente pas beaucoup de valeurs manquantes, donc il est approprié de combler les lacunes par la méthode de la moyenne journalière interannuelle.

Chapitre 4. Présentation de la zone d'étude

La méthode de la moyenne journalière interannuelle consiste à présenter les données journalières sous forme d'une matrice à n lignes représentant les années et p colonnes représentant les jours, malheureusement cette matrice peut contenir des vides correspondant aux lacunes d'observations [9].

$$[X]= \begin{pmatrix} X(1,1) & Inconnu & \dots & X(1,j) & \dots & X(1,p) \\ X(2,1) & X(2,2) & \dots & X(2,j) & \dots & Inconnu \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Inconnu & \dots & \dots & \dots & \dots & Inconnu \\ X(i,1) & X(i,2) & \dots & X(i,j) & \dots & X(i,p) \\ \dots & Inconnu & \dots & Inconnu & \dots & \dots \\ X(n,1) & X(n,2) & \dots & X(n,j) & \dots & X(n,p) \end{pmatrix}$$

Le nombre d'observations et de $(n \times p)$, le comblement des valeurs manquantes se fait en remplaçant la valeur manquante par la moyenne journalière interannuelle, telle que [9]:

$$M_j = \frac{1}{q_j} \sum_{i=1}^p X(i,j)$$

Avec :

$$q_j = n - (\text{nombre d'inconnues de la colonne } j)$$

4.2.Détection des valeurs singulières

Il arrive fréquemment que des erreurs se glissent dans les données de base et en dénaturent complètement le contenu. Cela peut se produire au cours de la mesure, de la transmission, du codage, du stockage ou du décodage des données d'observations. Il est important donc avant tout traitement de détecter les erreurs grossières de ce genre afin que l'on puisse effectuer une analyse plus fine pour décider si cette donnée douteuse est aberrante et doit être éliminée, ou si c'est une donnée exceptionnelle, qui par conséquent doit être au contraire précieusement conservée.

Le test statistique élaboré par Grubbs et Beck permet de détecter les erreurs douteuses dans les valeurs observées.

4.2.1. Test de Grubbs et Beck

Ce test est très utilisé à cause de sa simplicité. Il peut détecter les points singuliers de la série en calculant la statistique suivante [9];

$$X_h = EXP(\bar{X} + K_n * S)$$

$$X_l = EXP(\bar{X} - K_n * S)$$

Tel que :

X_h : la valeur maximale que ne doivent pas dépasser les valeurs de l'échantillon.

X_l : la valeur minimale que ne doivent pas atteindre les valeurs de l'échantillon.

\bar{X} et S : sont respectivement la moyenne et l'écart-type des logarithmes népériens des éléments constituant l'échantillon.

K_n : la valeur statistique du test de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillon et de niveaux de signification.

Avec n : la taille de l'échantillon.

Au niveau de 10% l'approximation polynomiale suivante a été donnée par Bobée (1991) :

$$K_n = -3.62201 + 6.28446 * n^{\frac{1}{4}} - 2.49835 * n^{\frac{1}{2}} + 0.491436 * n^{\frac{3}{4}} - 0.037911 * n$$

Pour $n = 418$ (les valeurs >1 seulement) la valeur statistique de Grubbs et Beck est :

$$K_n = 10.5429$$

En appliquant ce test, toutes les valeurs de l'échantillon supérieures à X_h ou inférieures à X_l sont considérées comme valeurs singulières. Dans notre cas, aucune valeur singulière n'a été détectée. Par contre, l'application de ce test a détecté les valeurs nulles comme des valeurs singulières, mais nous ne pouvons les rejeter car ils correspondent aux mois secs.

D'autre part, l'application des tests de l'indépendance et de l'homogénéité ne sont pas nécessaires, car le du filtre de Kalman a la capacité de détecter et de corriger les erreurs et les valeurs douteuses automatiquement.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, une description plus ou moins détaillée sur la région de Bouchegouf a été présentée, ainsi que ses caractéristiques géomorphologiques et morphométriques. D'autre part, nous avons évoqué le type de climat qui domine la région d'Oued Mellah, ce dernier est très important pour le choix des types de Tank Model qu'on doit y appliquer (humide ou bien aride) sur ce bassin versant.

Par la suite, nous avons critiqué les données météorologiques utilisées par la méthode de comblement des lacunes, ainsi par le test de Grubbs et Beck pour vérifier les valeurs singulières.

Dans le chapitre suivant, on va présenter les résultats obtenus de la simulation sur cette région d'étude par le modèle mentionné déjà.

Chapitre 5 . RESULTATS ET DISCUSSION

1. Introduction

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

La comparaison de la performance de différentes valeurs initiales va nous orienter vers ces conditions et leur choix. Autrement dit, nous allons pouvoir répondre à la question : Quelles valeurs initiales faut choisir pour caler un modèle hydrologique, et selon quel objectif ? La réponse à cette question va être discutée dans la prochaine partie, en analysant les résultats du calage du Tank Model.

Toute opération de calage a été effectuée en utilisant, le Tank Model en premier lieu, et le couplage Tank Model au filtre de Kalman au deuxième lieu. Le filtre de Kalman a été exploité directement dans cette partie de travail en faisant confiance à sa supériorité explicitement détaillée dans le chapitre 3. Cependant, tout calage manuel doit être effectué avec une grande précision, et aucun résultat obtenu ne doit être pris en garantie. Une appréciation du modélisateur doit tout le temps régner sur toute l'opération de calage.

Nous espérons à la fin de ce travail, déterminer en première partie les meilleures valeurs initiales des paramètres qui permettra la meilleure évaluation du calage du modèle hydrologique Tank Model, mais aussi en deuxième partie, déterminer les matrices de transition et de covariance du filtre de Kalman qui s'ajustera au mieux aux données des régions sous un climat tempéré et semi-aride du Nord Algérien.

Il est très important, avant d'entamer l'opération de calage d'un modèle hydrologique, de considérer plusieurs facteurs reliés à la série historique considérée, tels que la longueur de la série, la bonne répartition de cette série en deux périodes, calage, et validation, et le bon choix de l'intervalle des paramètres du modèle. Prendre en considération tous ces aspects améliore les résultats obtenus en calage et ainsi ajuste très bien le modèle afin de pouvoir l'utiliser par la suite en fonction de l'objectif de l'étude.

Cette application de couplage filtre de Kalman avec le Tank Model aura lieu la première fois en Algérie sur des bassins versants du nord, et pour cela, de bons résultats vont encourager les hydrologues pour exploiter ce modèle au futur.

2. Modélisation Pluie-Débit par le Tank Model

Le Tank Model testé dans ce chapitre sera appliqué à la station hydrométrique de Bouchegouf.

La taille des séries hydrométriques et pluviométriques utilisées dans cette étude sont concomitantes, correspond à une durée d'observations de 200 mois (16 ans et 8 mois).

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

Dans cette première partie, nous allons étudier la modélisation pluie-débit pour le bassin versant de Bouchegouf par une calibration manuelle (Trial & Error) en utilisant le Tank Model seulement, c'est-à-dire, sans faire appel au filtre.

- ***Initialisation***

Etant donné que la période de simulation commence par l'année calendaire(Septembre), les niveaux des réservoirs du modèle seront initialisés par des valeurs faibles ou modérés. Par exemple, les niveaux initiaux des réservoirs sol (S) du modèle seront entre 5 et 80 mm pour ce bassin. En outre, les paramètres du modèle commençant par les hauteurs de l'ouverture des débits jusqu'aux paramètres de ruissellement et les paramètres d'infiltration seront initialisés par des valeurs qui conviennent à la région d'étude et au mois qui démarre la saison de la période d'étude. Les paramètres de ruissellement doivent eux aussi convenir au mois de début de simulation, qui est Septembre, et les valeurs adoptées (coefficients) sont comprises entre 0.01 et 0.1. Par contre, les valeurs des coefficients d'infiltration et les hauteurs des ouvertures sont liées à la région d'étude, elles sont comprises respectivement entre 0.01 et 1 au maximum, et les hauteurs des ouvertures entre 1 et 5 mm.

Toutes les valeurs de ces paramètres sont initialisées par expérience, mais en général, elles appartiennent à des intervalles bien déclarés, donc ce n'est pas difficile de les introduire, cependant, les vraies valeurs sont fixées toujours par la méthode Trial & Error.

Le calage du modèle est simple comme déjà mentionné. Ainsi, l'algorithme du Tank Model simple suit les mêmes étapes da la fig. 3-2 du chapitre 3, en utilisant seulement les équations déjà mentionnées au chapitre 2. Le débit total est la somme de tous les débits qui sortent latéralement.

Le calage se fait en essayant d'optimiser les paramètres jusqu'à trouver les meilleures valeurs des critères d'évaluation possibles. Mais dans cette technique et surtout dans la deuxième partie, le calage se fait pour une estimation de tous les critères à la fois (Nash, R^2 , RSR, PBIAS), c'est-à-dire, on ne prend pas chaque critère seul et on essaye de l'optimiser, car à ce type de modélisation, la convergence de tous les paramètres est presque similaire.

En utilisant la méthode de Trial & Error, les résultats obtenus sont données dans le tableau ci-dessous. Il est à noter que ces valeurs ont été optimisées, et donc, c'est les meilleures valeurs des paramètres possibles :

Tableau 5-1 : Valeurs initiales des paramètres du Tank Model pour le bassin de Bouchegouf

Réservoirs	Stockage su sol (mm)		Coefficients des débits de ruissellement		Coefficients des débits d'infiltration		Hauteurs des ouvertures (mm)	
	S	mm	A	mm	B	mm	H	mm
Premier réservoir	S1	5	A1	0.03	A0	1	HA1	5
			A2	0.01			HA2	3
Deuxième réservoir	S2	10	B1	0.08	B0	0.5	HB	2
Troisième réservoir	S3	40	C1	0.01	C0	0.01	HC	2
Quatrième réservoir	S4	80	D1	0	D0	0	HD	0

- **Résultats**

Les résultats de la modélisation du Tank Model simple pour les périodes de calage et de validation du bassin de Bouchegouf sont présentés respectivement dans le tableau suivant :

Tableau 5-2 : Résultats de calage et validation par le Tank Model simple

Critères	Nash	R ²	PBIAS	RSR
Calibration	0.334	0.339	14.27	0.816
Validation	0.361	0.384	-19.21	0.799

➤ Evaluation graphique

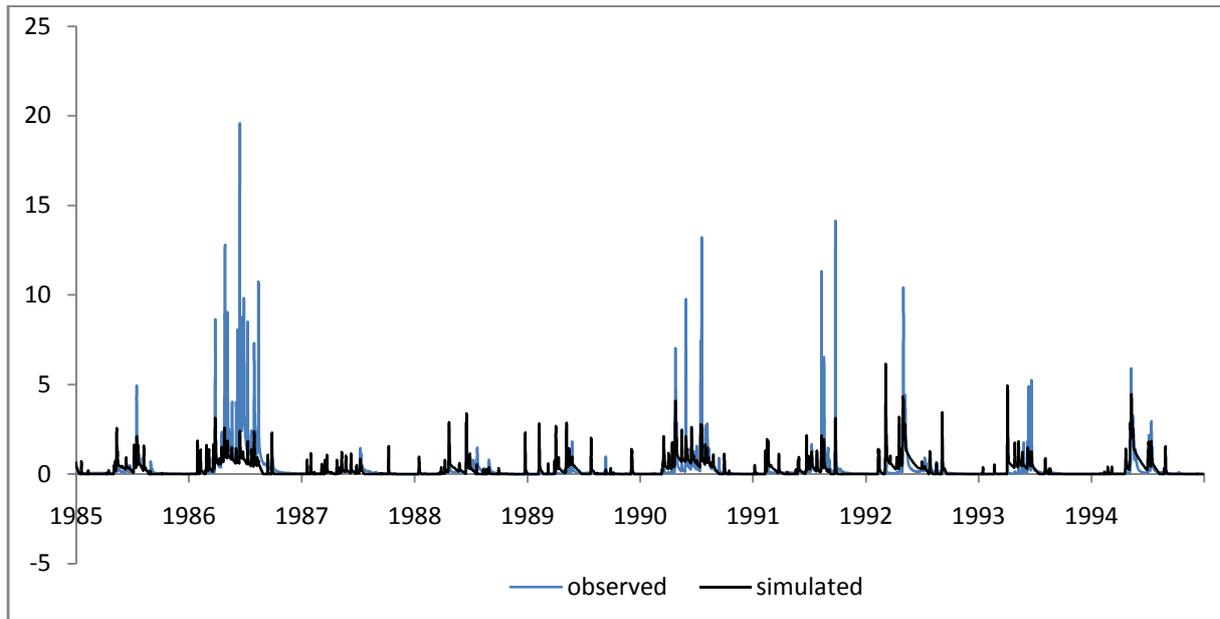


Figure 5-1 : Simulation des débits en phase de calibration par le Tank Model

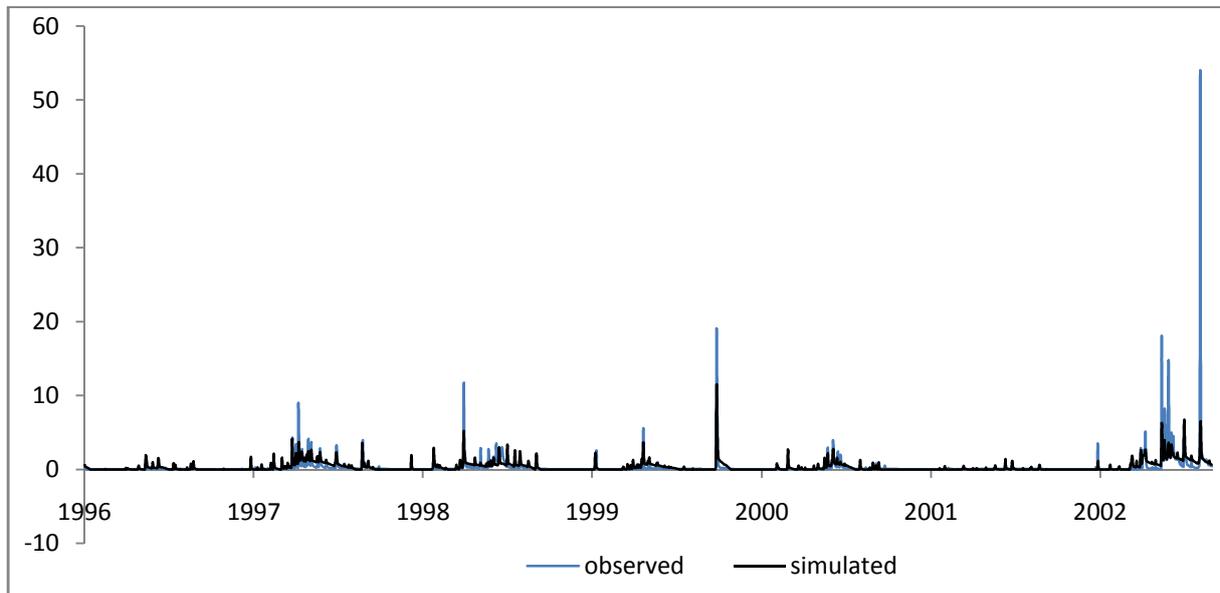


Figure 5-2 : Simulation des débits en phase de validation par le Tank Model

A la première vue, on remarque bien que le modèle ne simule pas les débits élevés (>10mm), mais reproduit bien les débits moyens et les débits d'étiages. En effet les volumes de ces débits de crue sont nettement sous-estimés pour le modèle.

D'après ces résultats présentés dans le tableau ci-dessus, nous remarquons que la modélisation par le Tank Model simple n'est pas bonne du tout. En effet, les efficacités de Nash et le R^2 ne dépassent pas les 40% que ce soit en période de calage ou en période de validation, ceci se traduit graphiquement par des pics assez loin de celles observés (fig. 5-1 et 5-2). Il en est de même que le PBIAS est loin de sa valeur type, ce qui se traduit graphiquement par une évolution quelconque des débits simulés. Il est à noter que le critère du RSR n'est pas loin de sa valeur type mais il est insatisfaisant. Par conséquent, on considère que la modélisation de la relation pluie-débit par le Tank Model simple pour le bassin versant de Bouchegouf est inefficace et nécessite une autre démarche pour l'améliorer.

Nous avons opté alors pour le couplage du Tank Model au filtre de Kalman pour voir l'impact de ce dernier sur les résultats obtenus.

3. Modélisation Pluie-Débit par le couplage Tank Model au filtre de Kalman

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. La performance du filtre de Kalman a attiré ces chercheurs comme un outil permettant d'enlever le bruitage dû aux erreurs (mesures, systèmes).

Dans cette partie, on va présenter la modélisation pluie-débit par un couplage Tank Model au filtre de Kalman, et ceci en expliquant le comportement de tous les paramètres reliés au modèle et au filtre.

Pour le choix de la période calage / validation, on adopte la même que pour le Tank Model simple.

- ***Initialisation***

Etant donnée que la période de simulation est la même que la partie précédente, les intervalles des paramètres utilisés seront les mêmes que pour la première partie, sauf que, les valeurs ne seront pas les mêmes puisque la simulation est différente. La méthode de calibration manuelle T&E est utilisée pour optimiser les paramètres d'une façon à rendre les critères d'évaluation plus performants.

La méthode de calibration se fait pour deux types :

- La première consiste à optimiser les matrices initiales du filtre de Kalman qui sont, la matrice de covariance $P(k-1|k-1)$, la covariance de bruit de processus $M(k)$ et la covariance de bruit de mesure $R(k)$. On fixe ces paramètres, puis, on peut entamer le deuxième type de calibration.

On rappelle toujours que cette calibration se fait par l'adoption de matrices déjà utilisées dans les anciens travaux, puis par tâtonnement on détermine les valeurs optimales de ces matrices.

- La deuxième consiste à optimiser le vecteur d'état initial $X(k-1|k-1)$, pour les paramètres de ruissellement, d'infiltration et les hauteurs de l'ouverture des débits, puis les valeurs du stockage initial. Ce type de calibration concerne les paramètres du Tank Model.

Si en adoptant tous ces paramètres et que la simulation ne donne pas de bons, on garde alors les matrices initiales de filtre de Kalman fixes mais on change les valeurs des paramètres du Tank Model, c'est-à-dire le vecteur d'état initial $X(k-1|k-1)$, et les stockages « S ».

➤ Optimisation des matrices d'entrée pour le filtre de Kalman

Dans cette partie, on présente les matrices initiales déjà utilisées, puis on montre la modification apportée pour les optimiser par rapport aux données du bassin versant étudié.

- **La covariance de bruit de mesure $R(k)$**

Cette valeur représente l'écart type de la probabilité de bruit de mesure $\mathbf{p}(\mathbf{v}(k))$ qui suit la loi normale avec une distribution gaussienne de moyenne nulle.

La valeur de $R(k)$ est fixe, et donc le choix de cette variable doit être fait avec une véritable précision car n'importe quel mauvais choix conduira à une divergence des critères puisque cette variable influe énormément sur les résultats.

La surestimation de cette variable donne de mauvais résultats des critères d'évaluation. Par contre la sous-estimation influe directement sur le gain de Kalman puisque l'inverse de la covariance de l'innovation $S(k)$ devient trop petit jusqu'à moins l'infini avec le temps puisque le déterminant est calculé sur des valeurs nulles.

Pour la modélisation Pluie-débit du bassin versant de Bouchegouf, la valeur de $R(k)$ a été calibrée avec la méthode Trial & Error pour déterminer ensuite la valeur $\mathbf{R}(k) = \mathbf{0.0001}$.

- **La covariance de bruit de processus $M(k)$**

La covariance de bruit du processus $M(k)$ est une matrice diagonale qui représente l'écart type de la probabilité de bruit de processus $\mathbf{p}(\mathbf{w}(k))$ qui suit la loi normale avec une distribution gaussienne de moyenne nulle.

La matrice $M(k)$ est aussi fixe. On doit choisir Les valeurs de la diagonale de cette matrice avec une grande prudence, car l'influence de cette matrice sur le calcul est grande, puisque un mauvais choix ne conduira pas juste à une divergence, mais plutôt l'arrêt de l'exécution du programme.

La sous-estimation de cette matrice influe sur la covariance $P(k|k)$ de tel sorte que cette covariance devient presque constante avec le temps, ce qui influe sur les résultats.

Pour la modélisation pluie-débit du bassin versant de Bouchegouf, la matrice de $M(k)$ a été calibrée avec la méthode Trial & Error pour déterminer ensuite la matrice $\mathbf{M}(k)$ tel que :

$$\mathbf{M}(k) = 10^{-4} * \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{pmatrix}$$

La dimension de $M(k)$ est $(n \times n)$ tel que $n =$ le nombre des paramètres du Tank Model. Dans notre cas, c'est 14 paramètres.

- **La matrice de covariance $P(k - 1|k - 1)$**

La matrice de covariance est la plus importante matrice initial du filtre de Kalman, car elle a une relation directe avec le gain de Kalman. Elle s'exécute en deux étapes, la première c'est la prédiction définie par $P(k|k - 1)$, la deuxième c'est après la correction, connue aussi par la mise à jour $P(k|k)$. La matrice de covariance $P(k - 1|k - 1)$ est représentée comme suit :

$$P(k - 1|k - 1) = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2 & \dots & \dots & \dots & \sigma_1\sigma_n \\ \sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ \sigma_n\sigma_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}$$

La dimension de $P(k - 1|k - 1)$ est $(n \times n)$ tel que $n =$ le nombre des paramètres du Tank Model.

Pour notre étude, nous avons adopté la matrice diagonale de covariance $P(k - 1|k - 1)$ proposé par Lee & Singh en 2013 comme matrice de départ, puis nous l'avons ensuite modifié et corrigé par rapport aux données du bassin versant étudié.

La diagonale de la matrice de covariance est :

$$P(k - 1|k - 1) = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5 \ \sigma_6 \ \sigma_7 \ \sigma_8 \ \sigma_9 \ \sigma_{10} \ \sigma_{11} \ \sigma_{12} \ \sigma_{13} \ \sigma_{14}]$$

En remplaçant les sigmas par les valeurs réelles, on obtient :

$$P(k - 1|k - 1) = [0.25 \ 0.25 \ 0.1 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3]$$

➤ **Optimisation des paramètres du Tank Model**

Cette partie consiste à optimiser les paramètres du Tank Model placés dans le vecteur d'état initial $X(k - 1|k - 1)$ et aussi les stockages.

Ces paramètres dont les coefficients des débits de ruissellement et d'infiltration et les hauteurs des ouvertures sont les plus importants dans la phase Trial & Error, car ils sont les premiers à

modifier lors de la divergence des critères d'évaluation. Les hauteurs des ouvertures ne sont pas d'une grande importance vu qu'ils n'ont pas un grand impact sur les résultats, néanmoins elles doivent être dans les intervalles logiques.

Par contre, les paramètres des débits de ruissellement et d'infiltration doivent être calés avec une grande prudence car un petit changement peut donner de mauvais résultats.

Il est à noter que ces paramètres sont différents de ceux optimisés dans la première partie puisque chaque application a sa propre méthode.

Concernant les stockages S, ces valeurs ont été optimisées de la même manière que la première partie, c'est-à-dire, selon le mois du début de la période d'étude.

Le calage du modèle est simple. Ainsi, l'algorithme du couplage suit les mêmes étapes de la fig. 3-2.

Le tableau ci-dessus obtenu par la méthode de Trial & Error présente les valeurs des paramètres initiaux du modèle.

On note que ces valeurs ont été optimisées, et donc, c'est les meilleures valeurs des paramètres possibles :

Tableau 5-3 : Valeurs initiales des paramètres du modèle par le couplage Tank Model au filtre de Kalman

Réservoirs	Stockage su sol (mm)		Coefficients des débits de ruissellement		Coefficients des débits d'infiltration		Hauteurs des ouvertures (mm)	
	S	mm	A	mm	B	mm	H	mm
Premier réservoir	S1	5	A1	0.08	A0	1	HA1	20
			A2	0.07			HA2	10
Deuxième réservoir	S2	10	B1	0.05	B0	1	HB	8
Troisième réservoir	S3	40	C1	0	C0	0	HC	0
Quatrième réservoir	S4	80	D1	0	D0	0	HD	0

- **Résultats**

Les résultats de la modélisation du couplage Tank Model en filtre de Kalman pour les périodes de calage et de validation du bassin de Bouchegouf sont présentés respectivement dans le tableau suivant :

Tableau 5-4 : Résultats de calage et validation par le couplage Tank Model au filtre de Kalman

Critères	Nash	R ²	PBIAS (%)	RSR
Calibration	0.970	0.972	8.22	0.171
Validation	0.992	0.993	1.14	0.087

On traduit le taux de performance de chaque critère dans le tableau suivant :

Tableau 5-5 : Taux de performance de calage et validation pour le couplage Tank Model au filtre de Kalman

Critères	Nash	R ²	PBIAS	RSR
Calibration	Très bon	Très bon	bon	Bon
Validation	Très bon	Très bon	Très bon	Très bon

D'après les résultats obtenus dans ces tableaux du couplage Tank Model au filtre de Kalman, nous constatons que les valeurs des critères de Nash et le R² dépassent 99% en phase validation.

Nous remarquons aussi que les résultats de la période de validation sont nettement meilleurs que ceux de la période de calibration.

Ainsi, les critères d'évaluation ont bien réagi à ce couplage. En effet, le Nash est très bon pour les deux périodes, ce qui se traduit par une reproduction quasi parfaite des débits observées (fig. 5-3 et 5-4) surtout aux forts écarts (période de crue).

Le PBIAS indique que la tendance de la prédiction suit la tendance des observations d'une façon plus ou moins bonne dans la calibration (8%), et très bon dans la validation (1%) avec une sous-estimation en phase calibration et validation du biais puisque les valeurs du PBIAS sont positives.

L'indice d'erreur RSR a donné de bons résultats pour les deux phases, et cela indique que les erreurs du modèle ne sont toutefois pas aussi importantes.

Le coefficient de détermination R² donne une bonne indication en phase calage et validation, ce qui exprime une bonne distribution entre les valeurs simulées et observées. Les faibles débits et même les grands sont parfaitement reproduits en calage et en validation.

➤ Evaluation graphique

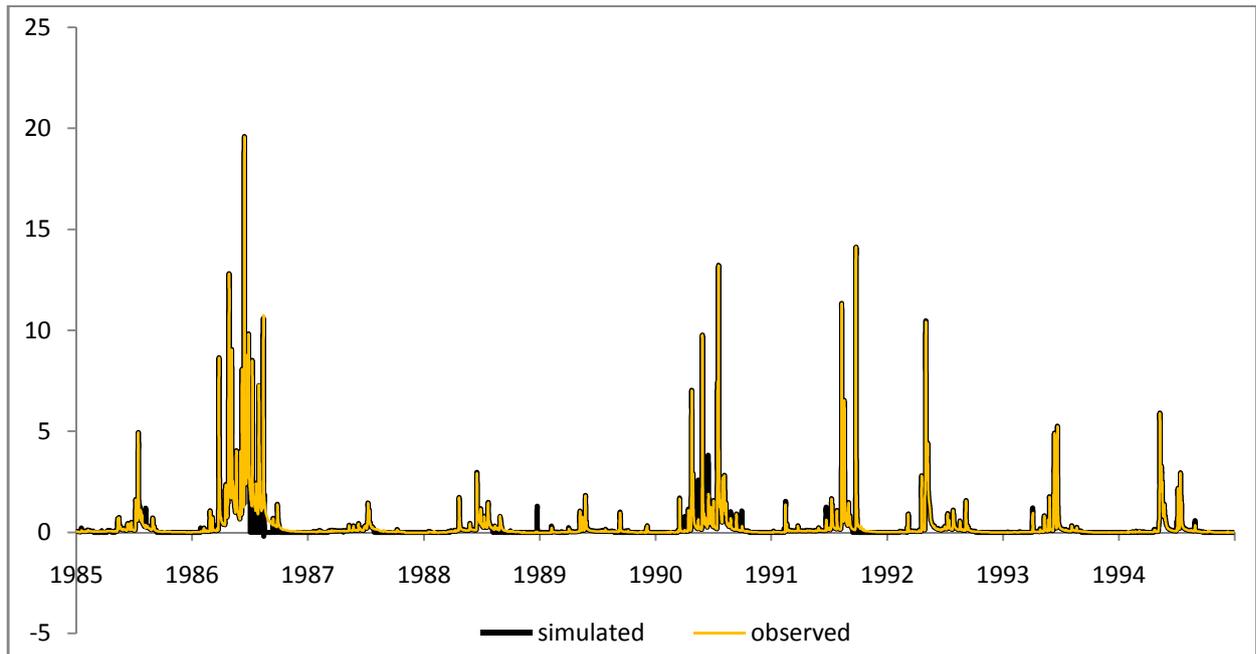


Figure 5-3 : Simulation des débits en phase de calibration par le couplage TM-FK

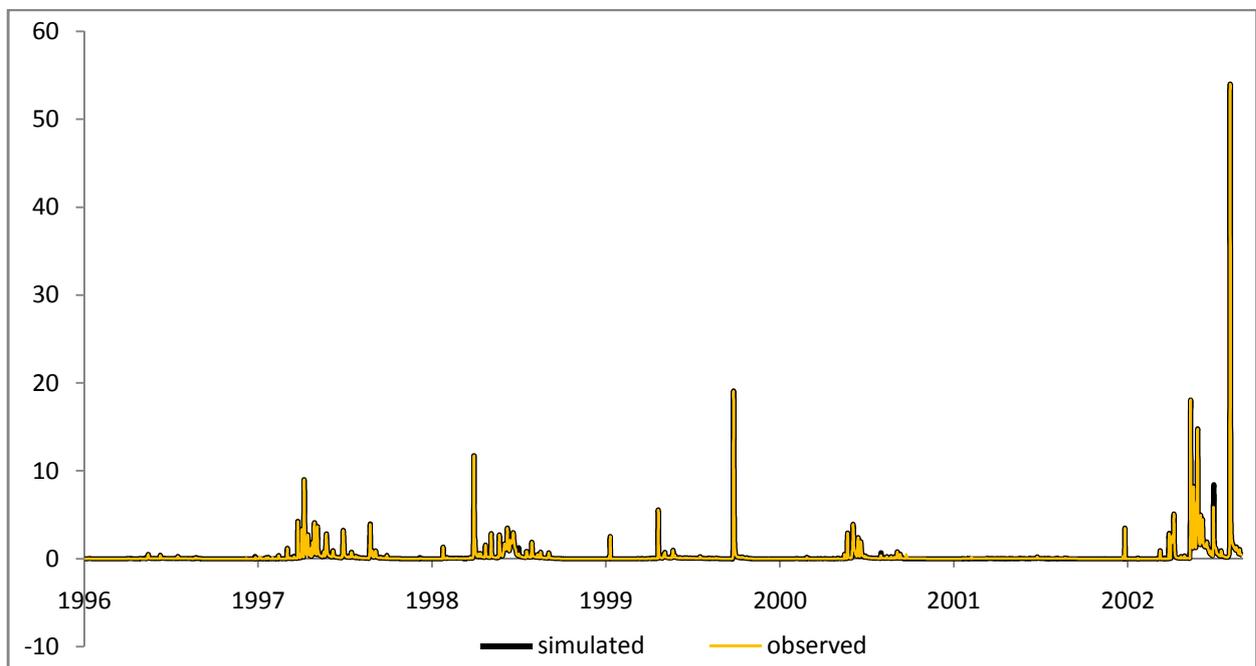


Figure 5-4 : Simulation des débits en phase de validation par le couplage TM-FK

D'après ces figures, on remarque déjà que les débits simulés ont bien suivi les valeurs observés, ce que confirme les résultats analytiques représentés dans le tableau 5-4, ainsi, pour la calibration, on remarque que dans quelque cas le filtre de Kalman simule une valeur

différente de celle observé et ceci est dû au bruit de l'observation, par exemple, en mars et avril 1987, le filtre a simulé une valeur nulle, par contre, la valeur indiquée comme observée est variable, et dans ce cas, en revenant aux archives, on voit qu'il y n'avait pas de pluie en cette période, et donc le filtre a bien simulé la valeur réelle et corrigé l'erreur.

Pour la validation, le filtre continue à corriger de la même façon, par exemple, en 01/03/2003, le filtre a simulé une valeur intéressante, par contre, la valeur observée est petite, si on revient à l'historique, on remarque que à cette journée il y avait une pluie remarquable, donc le filtre donne toujours sa correction dans les cas pareils.

• Représentation Débits observés- simulés

Pour conforter les résultats obtenus précédemment et apprécier d'avantage l'écart entre les valeurs simulées et observées par le couplage Tank Model au filtre de Kalman, on a comparé les débits simulés à ceux observés graphiquement pour les deux périodes calage et validation (fig. 5-5 et 5-6).

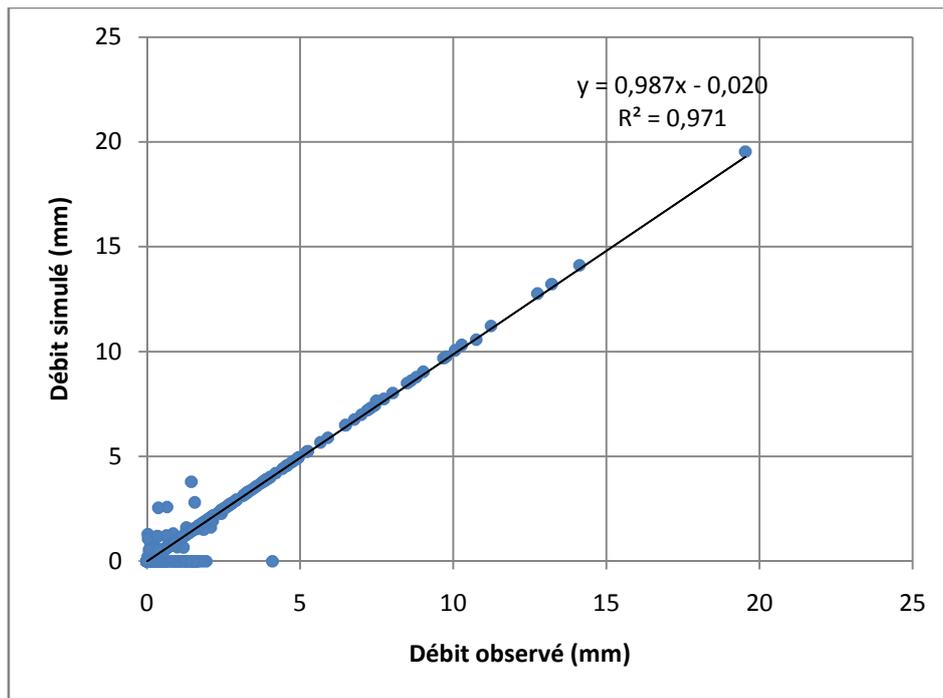


Figure 5-5 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase calibration pour le couplage TM-FK

Dans la calibration, on remarque que la majorité des débits sont entre 0 et 10 mm avec quelques pics, ainsi, le filtre de Kalman simule bien les débits de crue, et ceci est représenté par un coefficient de détermination de $R^2 = 0.97$, mais il n'arrive pas à simuler parfaitement les débits d'étiage.

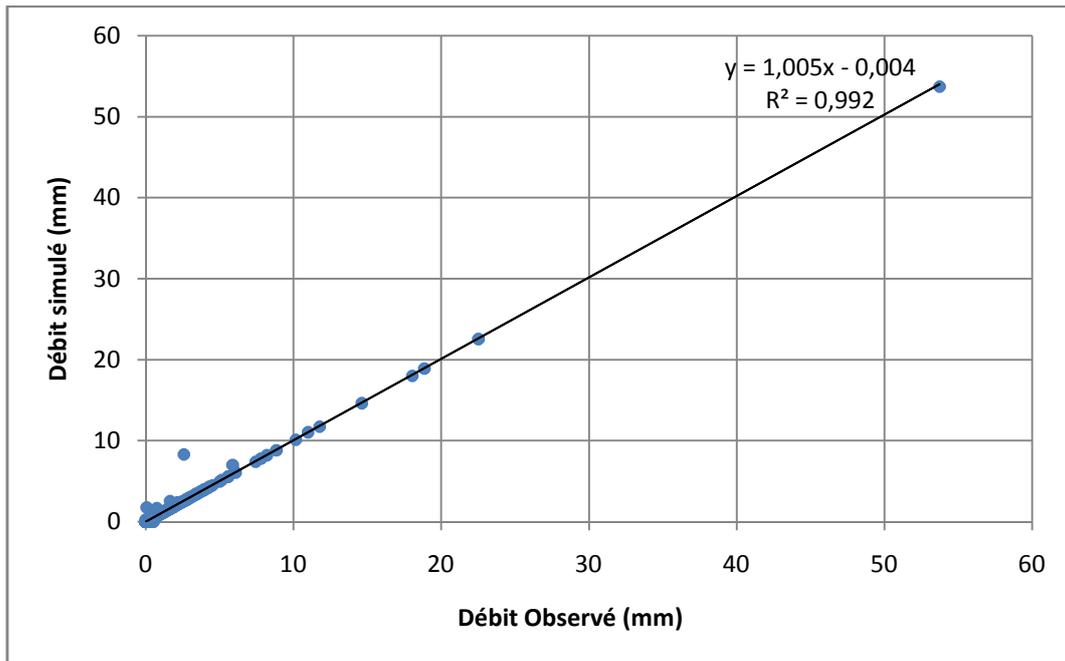


Figure 5-6 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase validation pour le couplage TM-FK

En phase de validation, le filtre simule très bien les débits même en période d'étiage, avec des résultats plus éloquentes que ceux de la calibration.

- **Résidus**

On peut aussi apprécier la performance du filtre de Kalman, en traçant les variations des résidus (différences entre les débits simulés et observés) pour savoir si, lorsque le débit augmente, les résidus augmentent, c'est-à-dire, si les erreurs seront grandes en période de crue.

Les deux figures suivantes représentent les résidus en fonction des débits simulés en période de calage et de la validation :

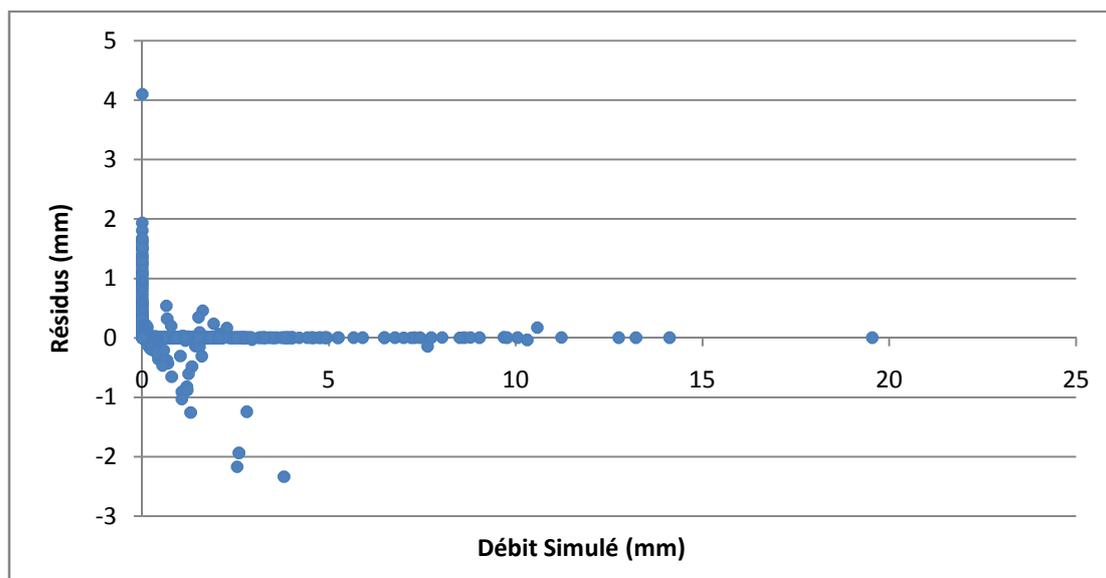


Figure 5-7 : Résidus en période de calibration

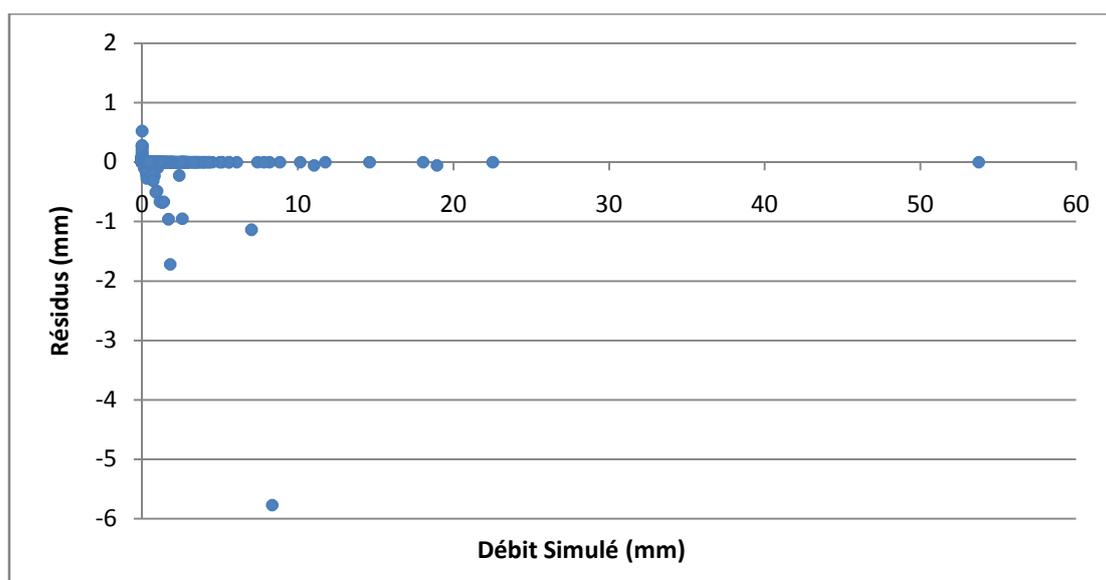


Figure 5-8 : Résidus en période de validation

D'après ces figures qui représentent les résidus en période de calibration et de validation, on voit bien que lorsque le débit augmente, les résidus se stabilisent vers une valeur presque nulle, et donc, la réaction du filtre n'a pas une relation avec les périodes de crue, où il est clair que pour $Q = 20$ mm en calibration, le résidu est presque nulle, et c'est pareil en période de validation pour une valeur de $Q = 54$ mm. Par contre pour les débits faibles (étiages) et moyens, il existe des cas bien sur où les résidus sont importants même si les débits sont petits, ce qui confirme les résultats données en fig. 5-5 et 5-6.

- **L'innovation (INN)**

L'innovation est un des paramètres les plus importants du filtre de Kalman avec le gain de Kalman, elle représente la différence entre le débit observé et le débit de prédiction. Cette différence est en fonction des valeurs de stockages du vecteur H, et donc c'est un paramètre qui sert à calculer avec le débit simulé pour chaque pas de temps.

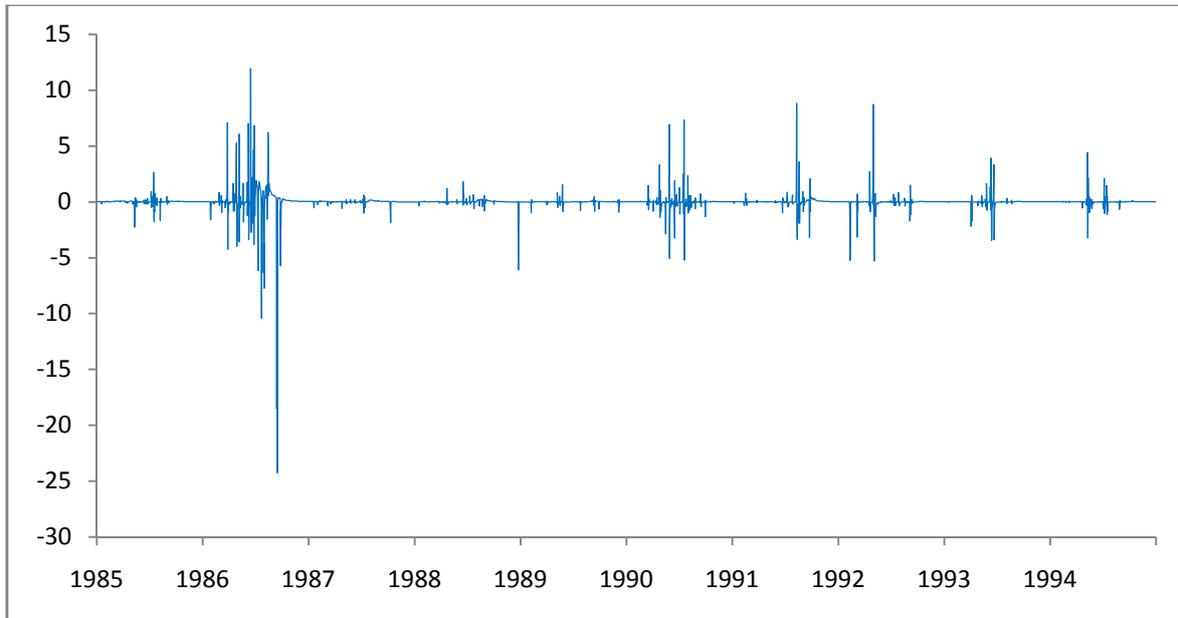


Figure 5-9 : Innovation du filtre de Kalman en période de calibration

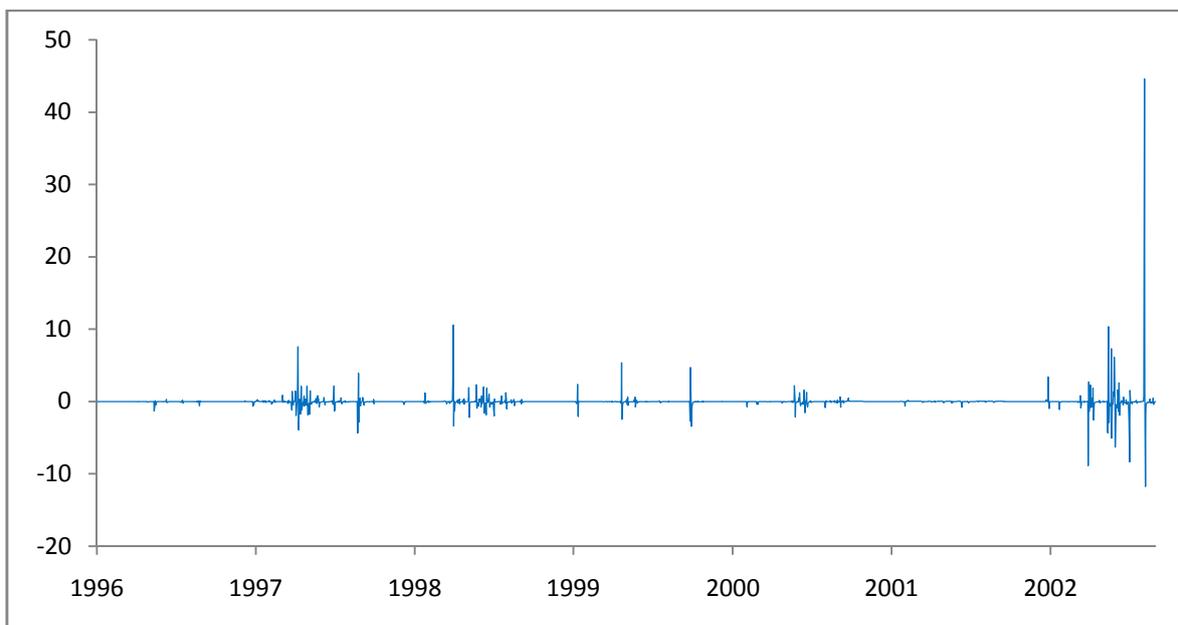


Figure 5-10 : Innovation du filtre de Kalman en période de validation

D'après les deux figures 5-9 et 5-10, on remarque bien que l'innovation peut être positive comme négative, et cela dépend de la différence entre la prédiction et la simulation des débits. D'autre part, si on compare les deux graphes précédents avec ceux de l'évaluation des débits observés et les pluies en fonction du temps, on peut connaître comment le débit simulé est calculé, car dans les périodes où on trouve une forte pluie, la valeur de l'innovation est grande quelque soit son signe, et cela conduira évidemment à un débit grand.

- **Explication**

D'après les résultats numériques et graphiques et les figures présentées en période de calibration et de validation pour le couplage du Tank Model au filtre de Kalman, on remarque que les critères d'évaluation (Nash, R^2 , PBIAS, RSR) ont beaucoup évolués par rapport à la modélisation du Tank Model seulement, et ceci revient clairement au filtre de Kalman, car la puissance de ce filtre se trouve dans sa manière à réagir devant les données bruitées, puisque la première étape du travail de ce filtre est la prédiction, dans ce cas, il calcule la valeur prévue et il la compare avec celle observée, si la différence est grande, donc l'erreur est grande, dans ce cas, il s'appuie sur la valeur calculée après l'avoir mis à jour, mais dans le cas contraire, il s'appuie sur la valeur observée en la considérant comme une valeur juste.

- **Les variables du modèle**

Dans cette partie, on va étudier l'évolution des variables du modèle : le débit de ruissellement, d'infiltration, et les stockages d'eau en fonction du temps. Cela montre l'efficacité du modèle, car au filtre de Kalman, on peut trouver de très bonnes valeurs des critères d'évaluation, mais des valeurs de débits irréelles. Ceci est une des faiblesses de ce filtre.

- **Débit de ruissellement**

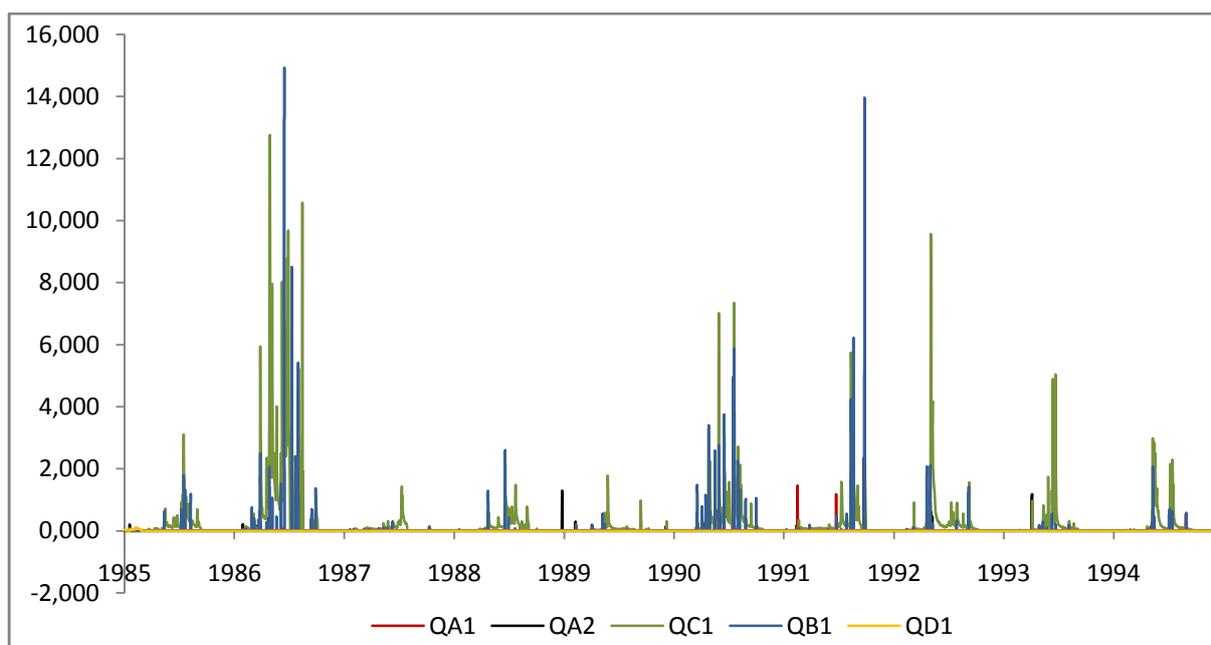


Figure 5-11: Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de calibration

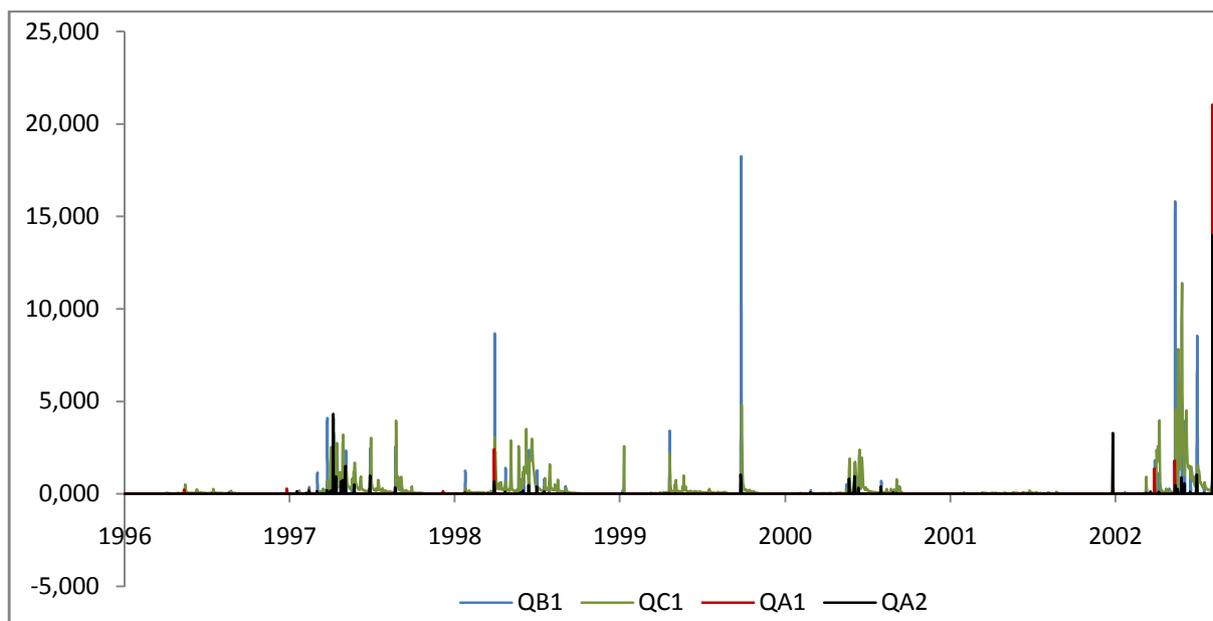


Figure 5-12 : Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de validation

Depuis ces figures, on voit que le débit QD1 du dernier réservoir est presque nul dans la partie calibration, et complètement nul en validation (c'est pour cela qu'il n'est pas tracé). Ainsi, les débits du deuxième et troisième réservoir, QB1 et QC1 respectivement représentent les plus grands débits, et cela montre que dans les régions tempérées et semi-aride, l'écoulement intermédiaire et l'écoulement sus-basique représentent les plus grands débits de ruissellement.

➤ Débit d'infiltration

Les variations des débits d'infiltration en fonction du temps pour les deux périodes sont présentées dans les figures suivantes :

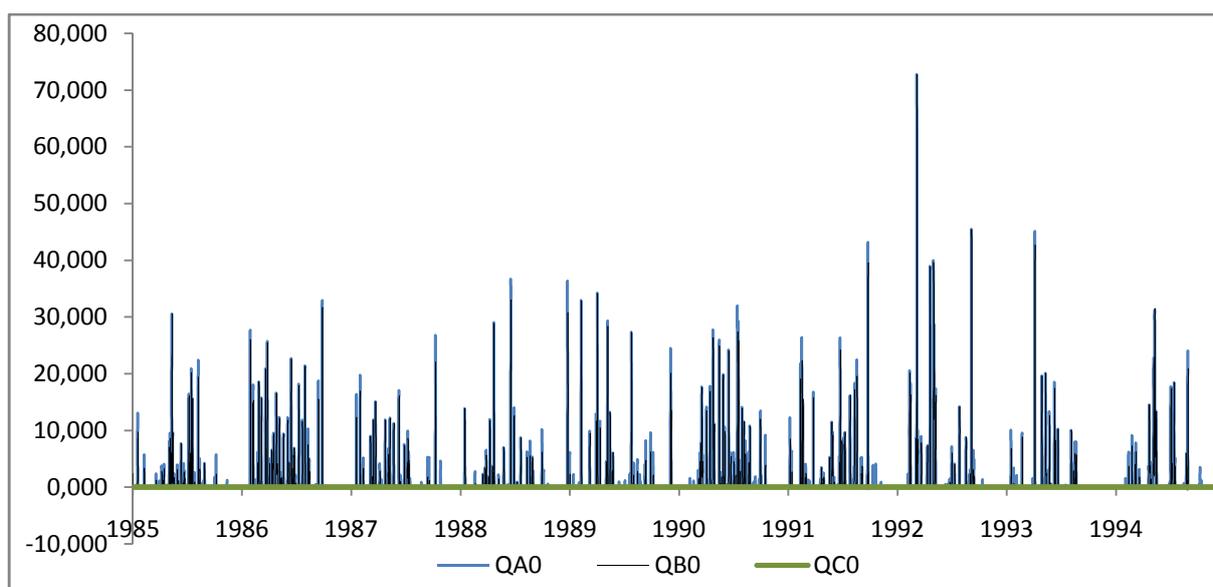


Figure 5-13 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de calibration

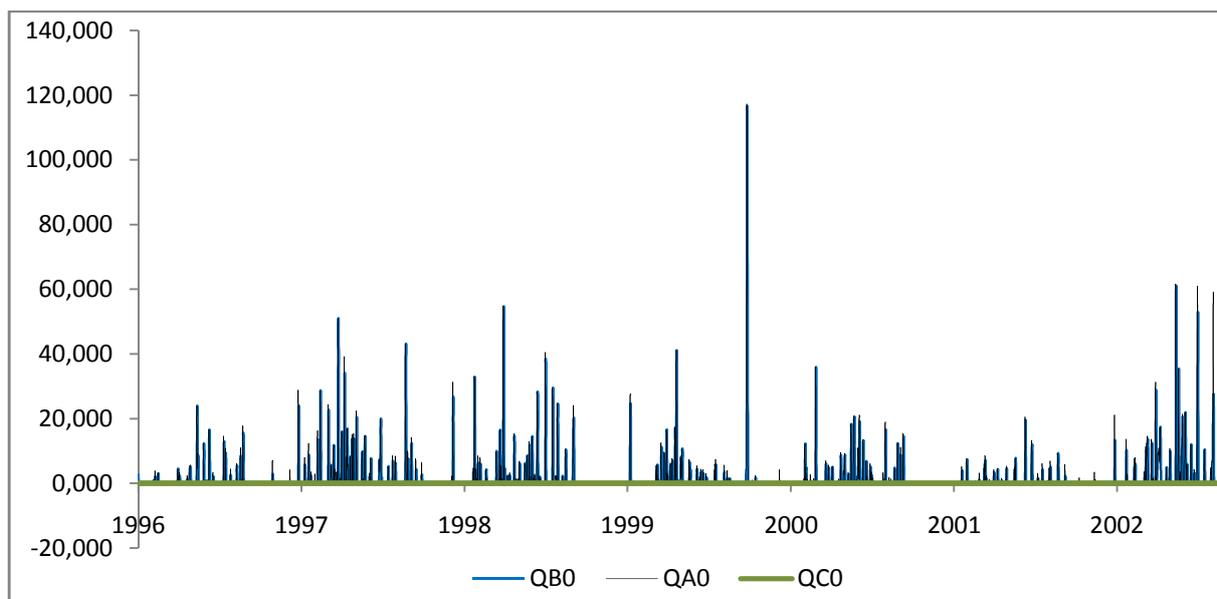


Figure 5-14 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de validation

D'après ces graphes, on remarque que le débit QC0 du troisième réservoir est presque nul dans la partie calibration et en validation. Ainsi, le débit QD0 du dernier réservoir est nul (c'est pour cela qu'il n'est pas tracé). En plus, les débits du premier et deuxième réservoir, QA0 et QB0 respectivement représentent les plus grands débits.

D'après ces quatre graphes, on remarque bien que le dernier réservoir ne rentre pas en jeu, donc on va suivre les autres résultats pour pouvoir dire s'il peut être négligé ou pas.

➤ **Stockage d'eau dans le sol**

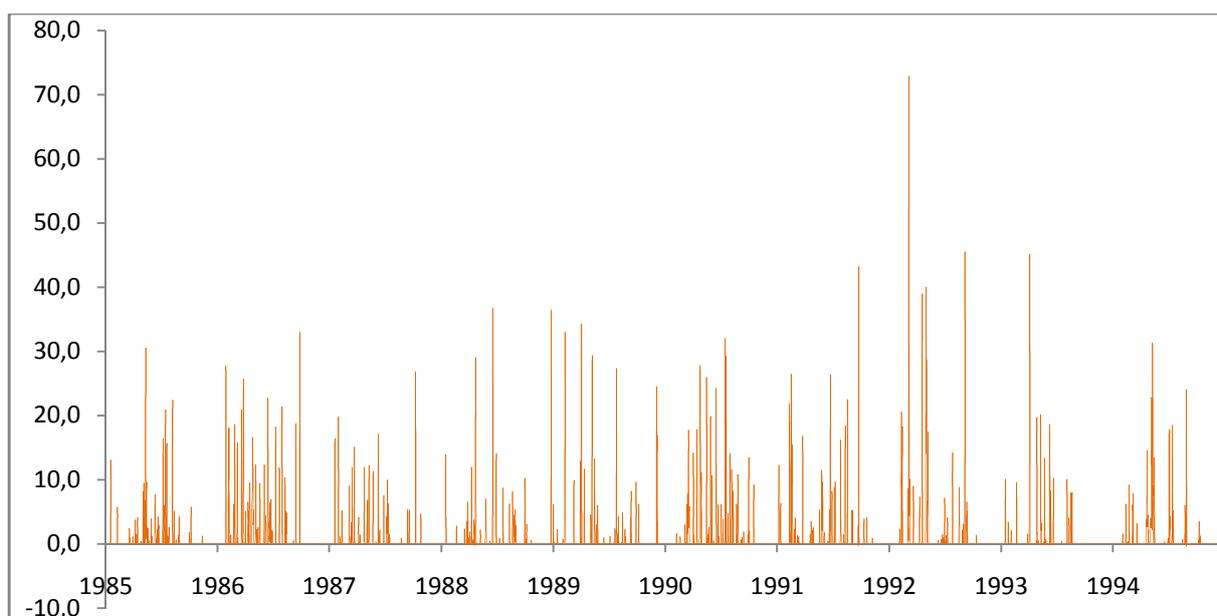


Figure 5-15 : Evolution du stockage d'eau dans le premier réservoir en fonction du temps pour la période de calibration

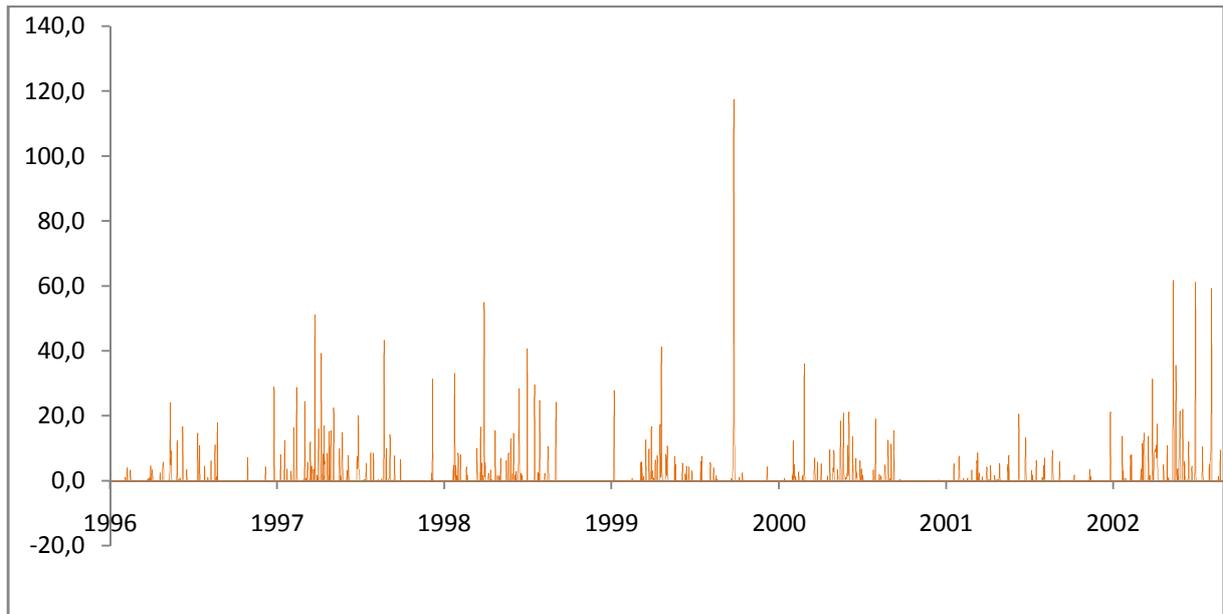


Figure 5-16 : Evolution du stockage d'eau dans le premier réservoir en fonction du temps pour la période de validation

On remarque que le stockage dans le premier réservoir varie avec le temps, et il arrive jusqu'à 72mm en calibration et 120mm en validation. Ainsi, on voit bien que ce stockage suit parfaitement les variations de la pluie.

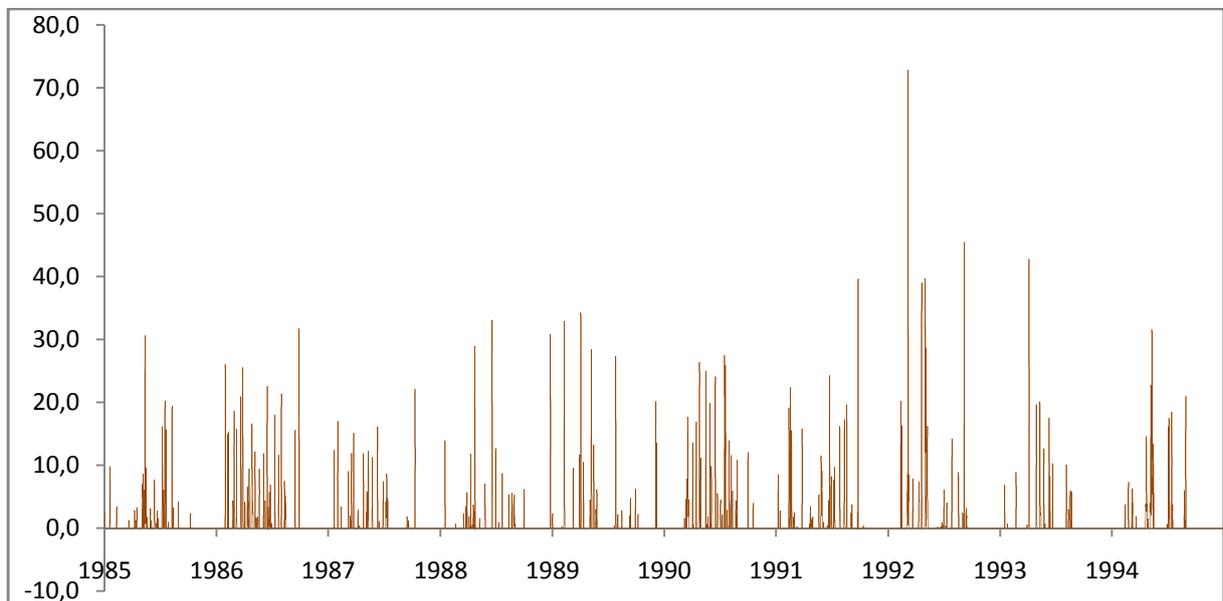


Figure 5-17 : Evolution du stockage d'eau dans le deuxième réservoir en fonction du temps pour la période de calibration

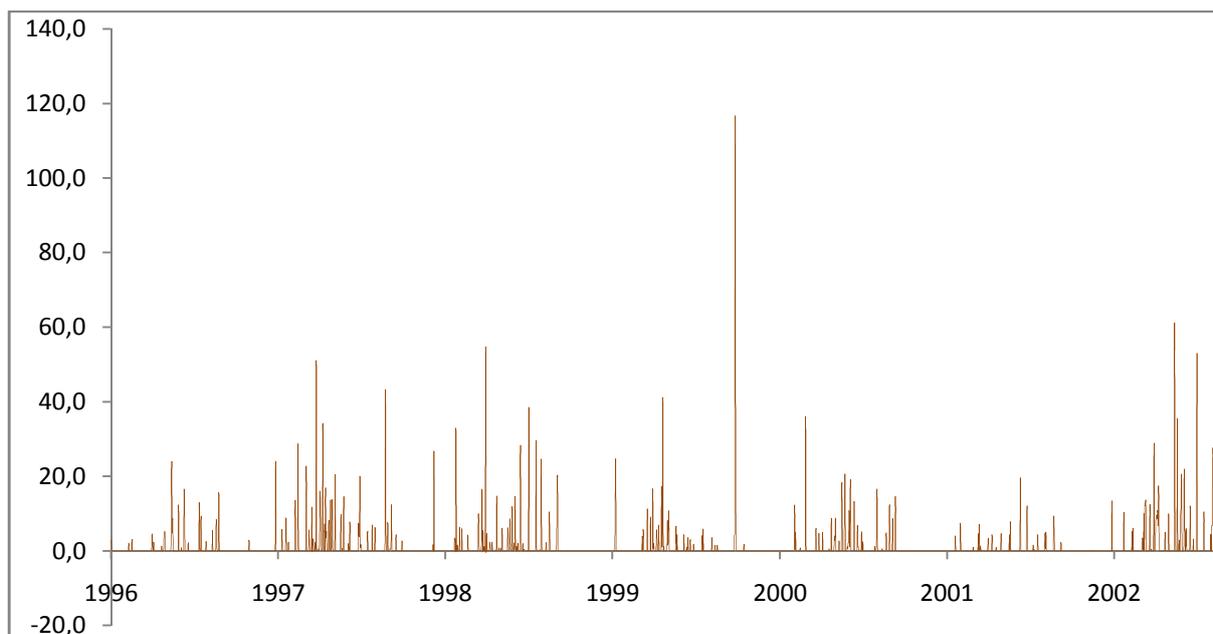


Figure 5-18 : Evolution du stockage d'eau dans le deuxième réservoir en fonction du temps pour la période de validation

On remarque que le stockage dans le deuxième réservoir ressemble beaucoup à celui du premier, et cela est dû à la grande infiltration du premier vers le deuxième, et en même temps le petit débit de ruissellement sortant du premier réservoir.

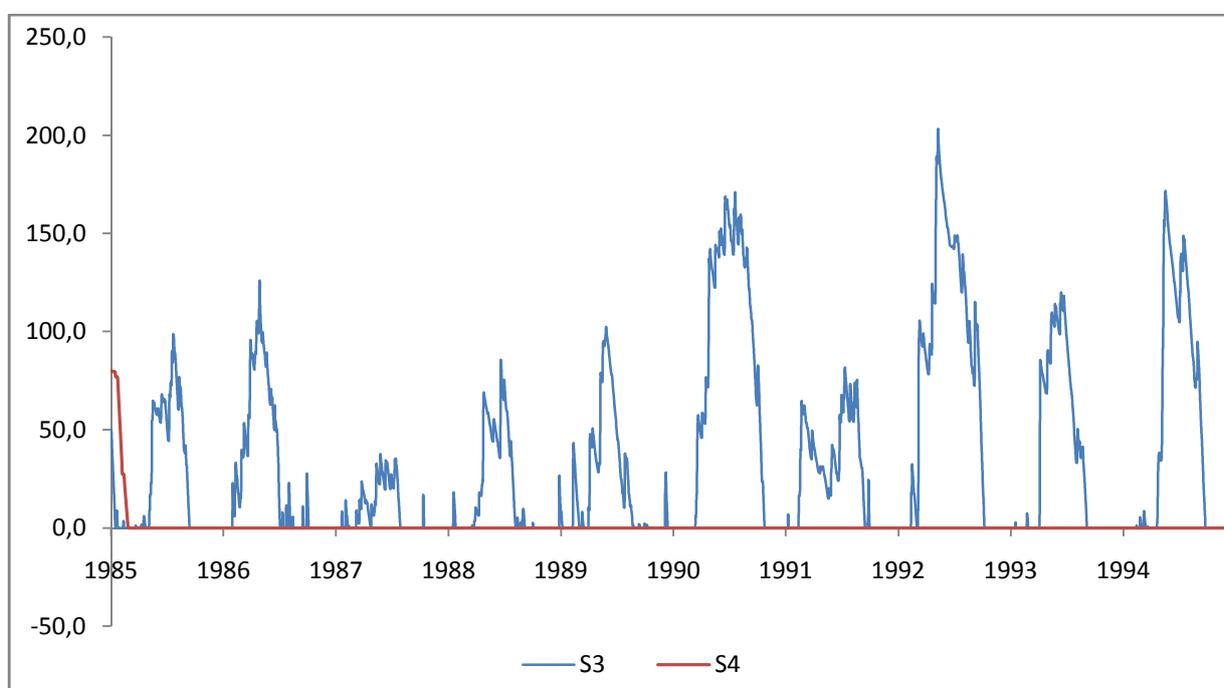


Figure 5-19 : Evolution du stockage d'eau dans le troisième et le quatrième réservoir en fonction du temps pour la période de calibration

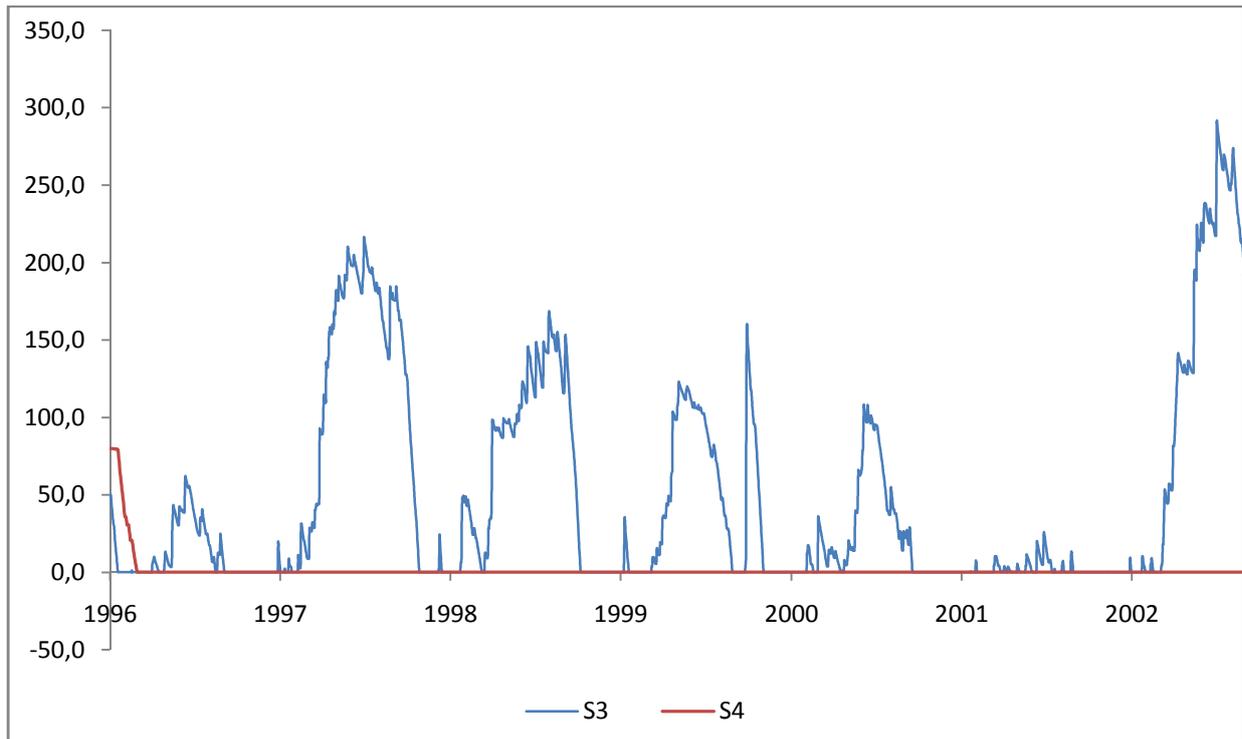


Figure 5-20 : Evolution du stockage d'eau dans le troisième et le quatrième réservoir en fonction du temps pour la période de validation

On remarque que le stockage d'eau dans le troisième réservoir suit des diagrammes périodiques, où il se remplit progressivement dans la saison humide jusqu'à atteindre le sommet, par exemple, 200mm en calibration et 300mm en validation, puis il commence à se vider jusqu'à atteindre la valeur nulle dans la saison sèche, avec des cas exceptionnelles, dans les périodes des crues, où il se remplit rapidement même s'il était complètement vide.

Par contre le stockage dans le dernier réservoir commence par une chute puis il sera complètement vide pour toute la période, cela renforce l'hypothèse de négliger ce dernier réservoir.

- **Les paramètres du modèle**

Dans cette partie, on va présenter l'évolution des paramètres du modèle en fonction du temps à servir les coefficients des débits latéraux, les coefficients d'infiltration, et les hauteurs des ouvertures. L'ensemble de ces paramètres représentent le vecteur d'état.

➤ Coefficients de ruissellement latéraux

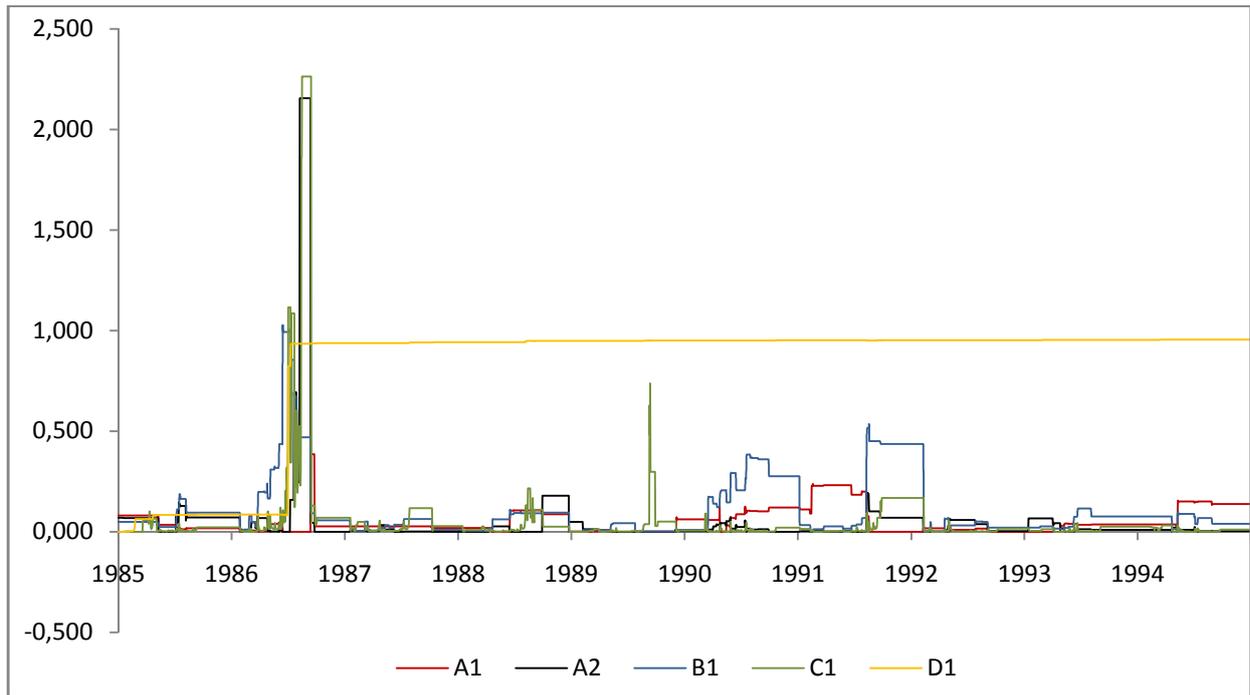


Figure 5-21 : Evolution des coefficients de ruissellement latéraux en fonction du temps pour la période de calibration

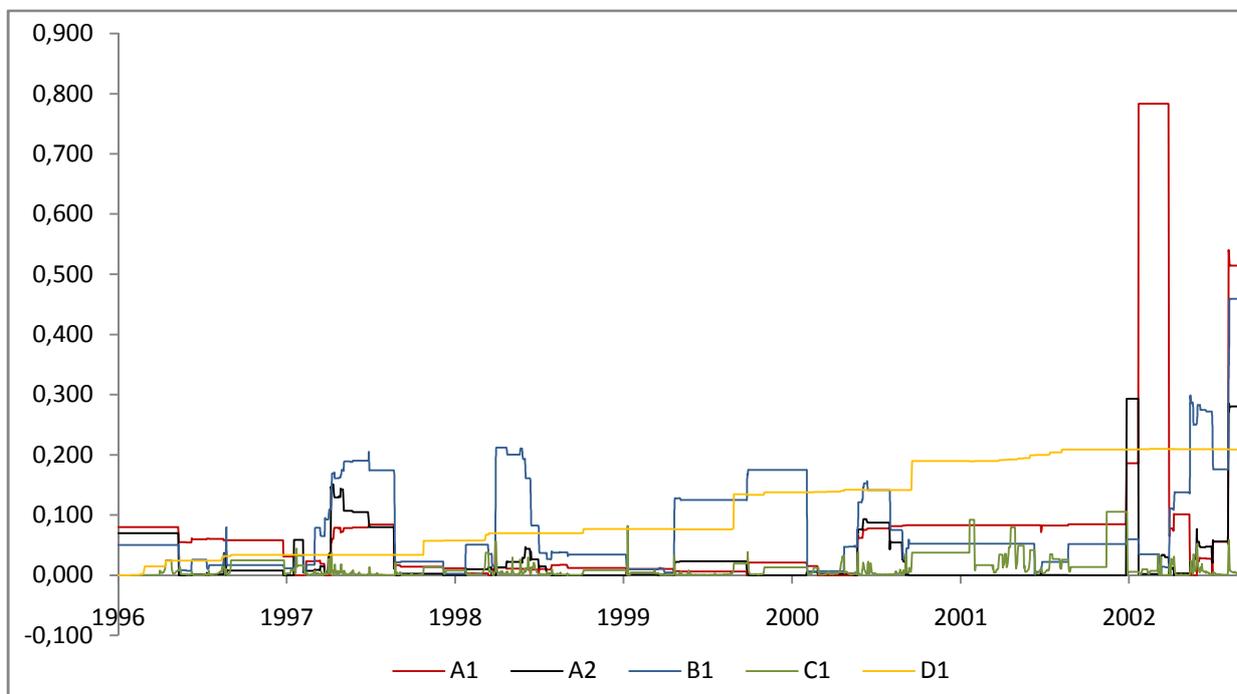


Figure 5-22 : Evolution des coefficients de ruissellement latéraux en fonction du temps pour la période de validation

D'après les figures 5-21 et 5-22, on voit que les coefficients du premier réservoir A1 et A2 ne prend pas de grandes valeurs, sauf en période de crue où ils touchent un sommet à cause de la position de leur réservoir comme c'est le premier qui prend la quantité de la pluie. Ainsi, le coefficient du deuxième réservoir B1 prend des valeurs moyennes en saison humide et trop petites en saison sèche, et cela est dû à l'infiltration importante du premier réservoir. Le coefficient du troisième réservoir C1 prend en général des valeurs petites sauf en période de crue en phase calibration où il a pris la plus grande valeur possible de 2,3.

Le coefficient du quatrième réservoir augmente directement en calibration avec une stabilisation après, et progressivement en validation, mais dans tous les cas il est négligé puisque le stockage est nul, et donc pas de débit.

➤ Coefficients d'infiltration

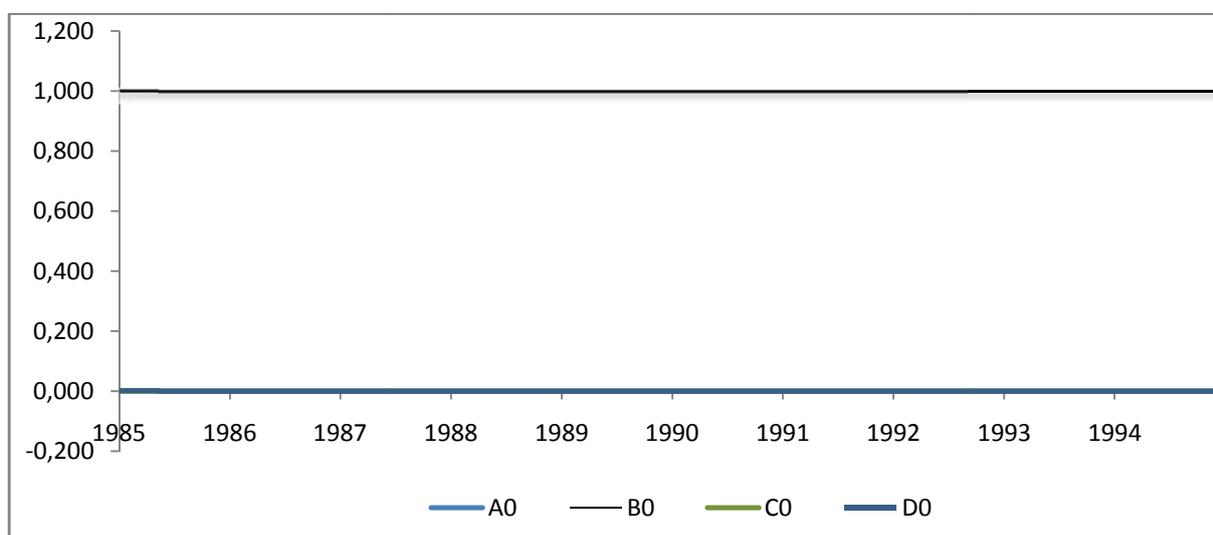


Figure 5-23 : Evolution des coefficients d'infiltration en fonction du temps en calibration

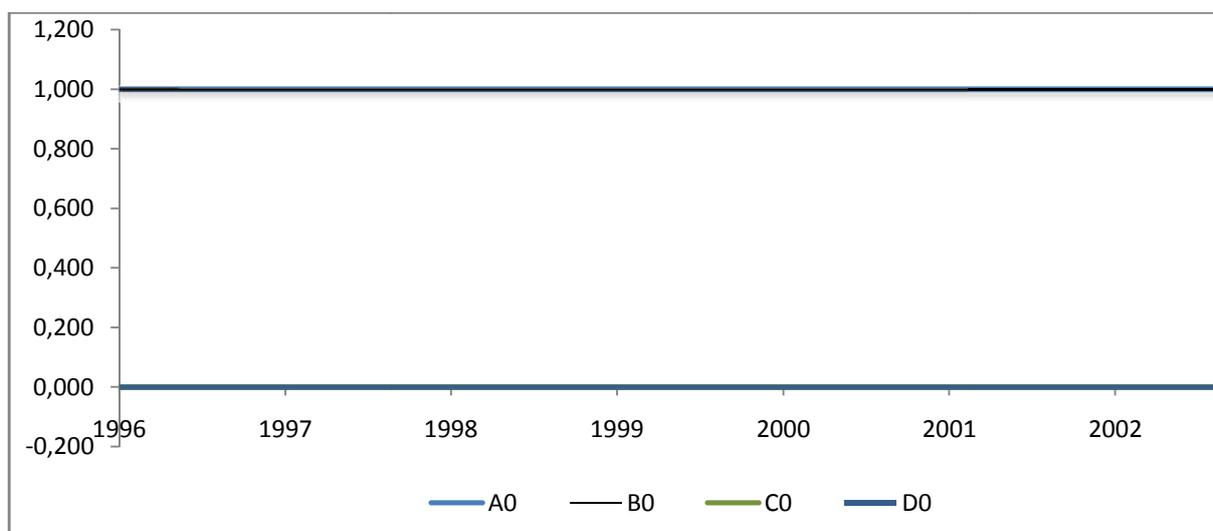


Figure 5-24 : Evolution des coefficients d'infiltration en fonction en validation

On voit bien que les coefficients d'infiltration sont stables pour la période de calibration et de validation, et cela montre que le débit d'infiltration est influencé beaucoup plus par le stockage d'eau des réservoirs, et aussi par la valeur initiale de ce coefficient puisqu'il ne varie pas dans le temps.

➤ Hauteurs des ouvertures

Dans les figures suivantes, on va présenter l'évolution des hauteurs des ouvertures en fonction du temps pour les deux périodes :

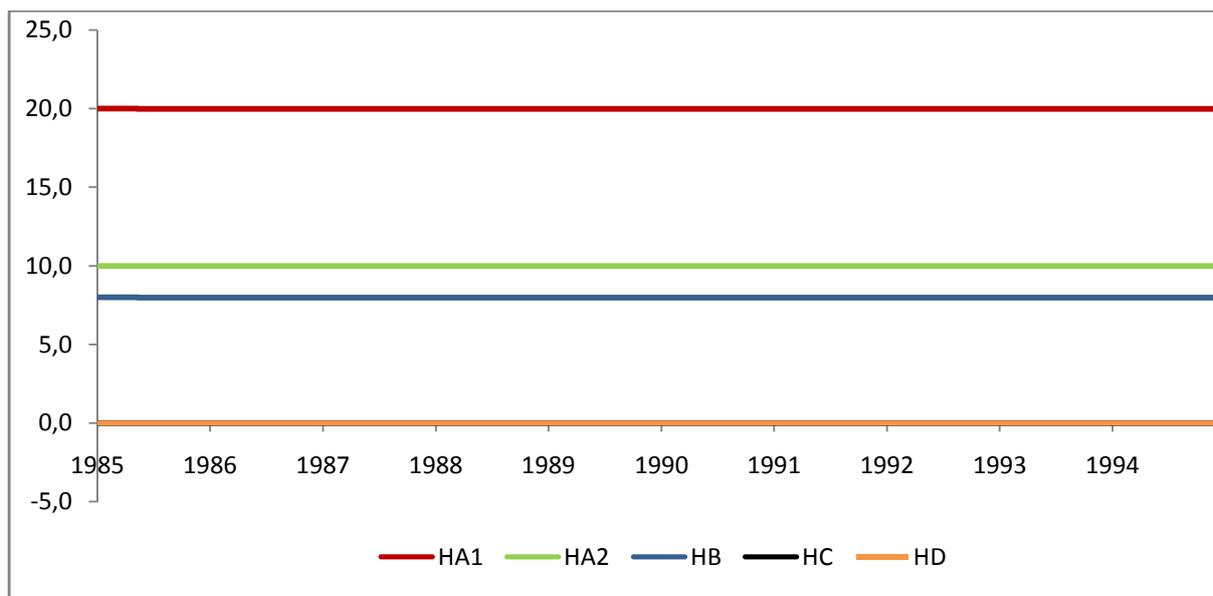


Figure 5-25 : Hauteurs des ouvertures en fonction du temps pour la période de calibration

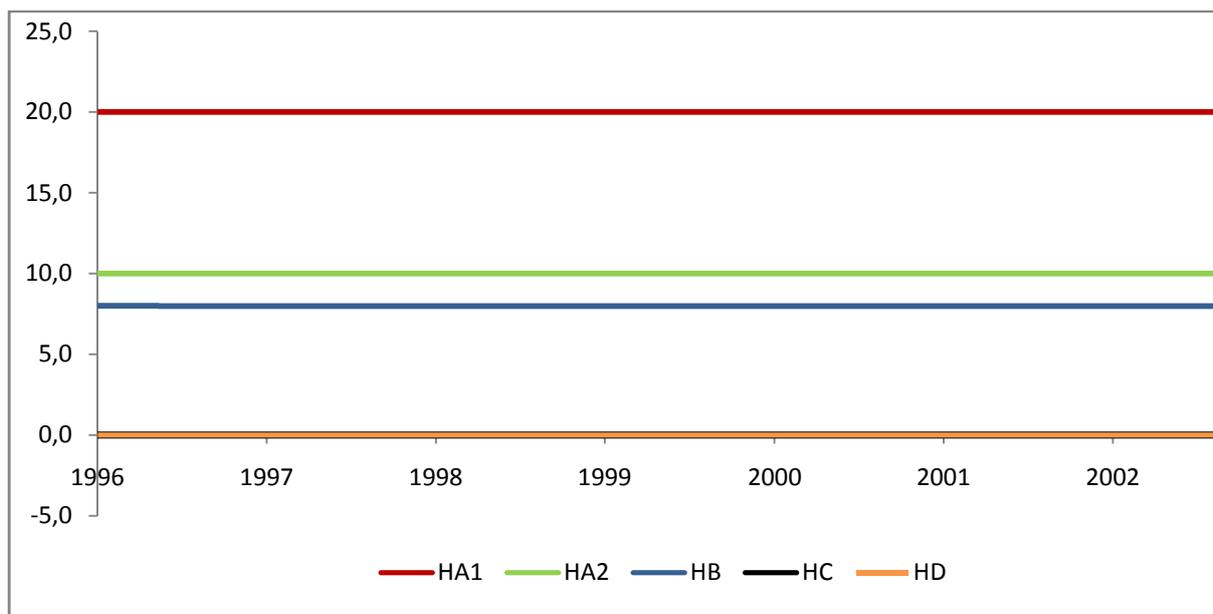


Figure 5-26 : Hauteurs des ouvertures en fonction du temps pour la période de validation

On voit bien que les hauteurs des ouvertures sont stables que ce soit pour la période de calibration ou de validation, et cela montre que ces hauteurs ne sont influencées ni par le stockage d'eau ni par la pluie. Par contre, le choix de la valeur initiale est très important pour la convergence des critères malgré que sa valeur n'influe pas beaucoup sur les résultats.

4. Modèle adopté

D'après les résultats précédents, le couplage du Tank Model au filtre de Kalman a donné d'excellents résultats pour trois réservoirs seulement, donc, on néglige le dernier réservoir complètement avec la sortie d'infiltration du troisième réservoir, et ceci pour donner moins de réservoirs à notre modèle, et aussi pour minimiser les paramètres d'entrée à (A_1 , A_2 , A_0 , HA_1 , HA_2 , B_1 , B_0 , HB , C_1 , HC).

Le schéma du modèle est représenté dans la figure suivante :

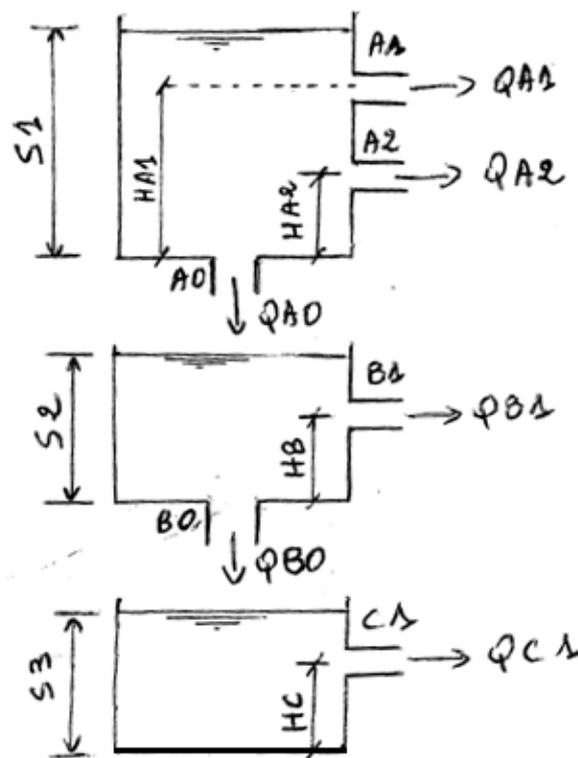


Figure 5-27 : Représentation du Tank Model par trois réservoirs

5. Conclusion

A notre connaissance, le couplage du Tank Model au filtre de Kalman n'a jamais été utilisé en Algérie, et ce travail représente une nouveauté pour les hydrologues.

Dans notre travail, le Tank Model a donné des résultats insatisfaisants à cause du besoin d'introduire soit une technique d'optimisation comme le Shuffled Complex Evolution, ou un filtre qui sert à enlever le bruit des valeurs observées.

Plusieurs auteurs ont déjà recommandé l'utilisation du filtre de Kalman (vu son efficacité) en combinaison avec un modèle de transformation pluie-débit. La procédure présentée dans le présent travail a été testée pour la mise à jour des variables d'état du Tank Model. Elle constitue une solution possible pour l'analyse de l'incertitude dans les modèles hydrologiques conceptuels.

Le Tank Model couplé au filtre de Kalman donne d'excellents résultats au pas de temps journalier. Dans ce cas, ces résultats trouvés nous ont permis de réduire le modèle aux trois réservoirs seulement.

CONCLUSION GENERALE

En réponse à un événement pluvieux l'hydrologie d'un bassin versant se trouve modifiée. Ceci peut notamment s'observer à travers les composantes suivantes : l'écoulement de surface, l'écoulement dans la zone saturée et non saturée du sol et l'évapotranspiration. Cependant, la réponse du bassin (c'est-à-dire la variation du débit à cet événement pluvieux) varie en fonction de plusieurs facteurs d'abord propres aux variables climatiques telles que les pluies et leur intensité, puis des caractéristiques du bassin versant telles que sa superficie, les conditions pédologiques et morphométriques.

Les modèles hydrologiques sont des outils numériques qui servent à représenter le fonctionnement d'un bassin versant. L'objectif de cette modélisation est de simuler l'une ou plusieurs de ces composantes pour une échelle de temps et d'espace.

L'objectif essentiel de ce mémoire est d'évaluer les qualités des modèles développés, de les tester en milieu tempéré algérien, caractérisé par une forte variabilité annuelle et inter-annuelle, et des cycles de sécheresses qui sévissent d'une période à l'autre pour explorer les voies d'amélioration possibles de ces modèles. La recherche de modèles plus satisfaisants a en effet, des enjeux importants. Elle permet tout d'abord une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant. Elle garantit ensuite une meilleure fiabilité aux applications qui utilisent les simulations du modèle dans un contexte opérationnel.

Deux approches de modèle ont été exploitées dans ce mémoire : le Tank Model simple et le couplage Tank Model au filtre de Kalman.

Ce modèle a été appliqué au bassin versant de Bouchegouf au Nord-est de l'Algérie, à un pas de temps journalier caractérisé par la complexité de ce processus.

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

Le filtre de Kalman est donc un ensemble d'équations très efficace pour obtenir la solution optimale d'un problème dont on n'a qu'une connaissance partielle. Ce type de filtre a été déjà utilisé en hydrologie par plusieurs chercheurs (ex : Lee & Singh), et est en général couplé au Tank Model.

Le filtre de Kalman reste un test puissant malgré son défaut, qui est la divergence, car lorsque les conditions initiales sont mal définies par le calage manuel (trial & error), le système ne converge pas.

Dans ce travail, nous avons testé en premier lieu le Tank Model simple, et ce dernier a donné des résultats insatisfaisants à cause du besoin d'introduire soit une technique d'optimisation comme le Shuffled Complex Evolution ou le filtre.

En deuxième lieu, nous avons couplé ce Tank Model au filtre de Kalman en suivant les recommandations de plusieurs auteurs ayant déjà abordés le thématique de la transformation pluie-débit, et comme prévu, les résultats se sont nettement améliorés.

Le Tank Model couplé au filtre de Kalman a donné d'excellents résultats au pas de temps journalier. Et ont permis de réduire le modèle à trois réservoirs seulement.

Le couplage constitue donc une solution possible pour l'analyse de l'incertitude dans les modèles hydrologiques conceptuels.

Afin de développer ce couplage, on propose de tester au futur un Tank Model avec seulement deux réservoirs avec trois ou deux sorties du premier réservoir, et essayer ainsi d'initialiser le programme avec une calibration automatique.

Bibliographie

- [1] **Alazard D** Introduction au filtre de Kalman [Livre]. - [s.l.] : SUPAERO, 2006. - Université de Toulouse.
- [2] **Amireche M [et al.]** Comparative assessment between GR model and tank model for rainfall-runoff analysis using Kalman filter - application to Algerian basins [Revue]. - [s.l.] : University of Sharjah, UAE, 2017.
- [3] **BENKACI A. T** Modélisation Pluie-Débit Mensuelle ET Journalière Par Les Modèles Conceptuels Et Les Systèmes Neuro-Flous (Application Aux Bassins Algériens) [Rapport] : Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. - Alger : INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE, 2006.
- [4] **CHAOUI W** Impact de la pollution organique et chimique des eaux de l'Oued Seybouse et de l'Oued Mellah sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de Bouchegouf (Guelma) [Rapport] : Mémoire du diplôme de MAGISTER. - [s.l.] : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2007.
- [5] **Enzo C, Kellya C et Thibaut D** Etude de cas : Filtre de Kalman [Section du livre]. - Paris : Telecom ParisTech, 2010.
- [6] **Ferdinand Piette** Le filtre de Kalman : intérêts et limites [Article]. - 2012. - <http://www.ferdinandpiette.com>.
- [7] **Ferdinand Piette** Le filtre de Kalman étendu : principe et exemple [Revue]. - [s.l.] : <http://www.ferdinandpiette.com>, 2011.
- [8] **KALMAN R. E** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [Revue] // Transactions of the ASME. - [s.l.] : Journal of Basic Engineering Vol. 82, 1960. - pp. 35-45.
- [9] **LAZZOUZI S** Contribution à l'étude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie sur le littoral Algérien [Rapport] : Projet de fin d'études. - [s.l.] : Ecole Nationale Polytechniques, 2015.
- [10] **LEE Y. H et SINGH V. P** Tank Model Using Kalman Filter [Revue]. - Korea : JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING, 1999. - 344-349.
- [11] **LIU J, DOAN C D et LIONG S** Conceptual Rainfall-Runoff Model With Kalman Filter For Parameter And Outflow Updating [Revue] // World Scientific Publishing Company. - Singapore : Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore, 2010.

- [12] **LOUAMRI A** Le bassin versant de la Seybouse (Algérie orientale): Hydrologie et Aménagement des eaux [Rapport]: Thèse de Doctorat. - [s.l.]: UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1, 2013.
- [13] **Moriasi D. N [et al.]** MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS [Revue]. - USA : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. - 0001-2351.
- [14] **MOUCHARA N** Impacts des lâchées de barrage Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie amont (Nord-Est Algérien) [Rapport] : Mémoire de Magister. - [s.l.] : Université Badji Mokhtar-Annaba, 2009.
- [15] **MOULAHOU M. A. W** Etude de Performance de deux Algorithmes d'Optimisation Globale : Le Shuffled Complex Evolution (SCE) et l'Algorithme Génétique fGAI [Rapport] : Master en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [16] **NDJENG A** Localisation robuste multi-capteurs et multi-modèles [Revue] // Thèse de Doctorat. - [s.l.] : Université D'evry Val d'Essonne. France.
- [17] **OUACHANI R, BARGAOUI Z et OUARDA T** Intégration d'un filtre de Kalman dans le modèle hydrologique HBV pour la prévision des débits [Revue] // Hydrological Sciences Journal. - 2007. - 318-337.
- [18] **SUGAWARA M** Automatic calibration of the tank model [Revue]. - Tokyo 157, Japan : Hydrological Sciences Bulletin, 2009. - 0303-6936.
- [19] **SUGAWARA M** Tank Model [Livre]. - Tokyo : Hydrological Sciences Bulletin, 1979.
- [20] **YTOUI Y** Modélisation De La Relation Pluie-Débit Aux Pas De Temps Mensuel ET Journalier Par Les Modèles Conceptuels Et Neuro-Flous (Application Au Bassin Versant De l'ISSER) [Rapport] : Projet de fin d'études pour l'ingéniorat en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2012.