

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



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

Mémoire de Master *en Hydraulique*

---

**Étude comparative de deux formulations de la  
modélisation de la relation Pluie- Débit par le  
Tank Model couplé au Filtre de Kalman  
Application au bassin versant de BOUCHEGOUF**

---

**Abdelkader IZERROUKYENE**

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

Codirigé par **M. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2017

**Composition du Jury :**

<i>Président</i>	M. Abdelouaheb LEFKIR	MCA	ENSTP
<i>Promoteur (s)</i>	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
	M. Mohamed AMIRECHE	MAA	U-OEB
<i>Examineur</i>	M. Houari KHEMISSI	MAA	U-Boumerdes
	M. Samir BENGHERIFA	Doctorant	ENP



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 Master *en Hydraulique*

---

**Étude comparative de deux formulations de la  
modélisation de la relation Pluie- Débit par le  
Tank Model couplé au Filtre de Kalman  
Application au bassin versant de BOUCHEGOUF**

---

**Abdelkader IZERROUKYENE**

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

Codirigé par **M. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2017

**Composition du Jury :**

<i>Président</i>	M. Abdelouaheb LEFKIR	MCA	ENSTP
<i>Promoteur (s)</i>	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
	M. Mohamed AMIRECHE	MAA	U-OEB
<i>Examineur</i>	M. Houari KHEMISSI	MAA	U-Boumerdes
	M. Samir BENGHERIFA	Doctorant	ENP

**ENP 2017**

# 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

تم تطبيق في هذه الدراسة طريقتين للمنهجية الامطار- التدفق باستعمال الاقتران لنموذج الخزان و مرشح كالمان : تحديث المعلمات و تحديث التدفقات. الاولى جربت في مذكرة مهندس دولة و سنقارنها مع الثانية باستعمال اربع خزانات ثم اثنين فقط. هذا الاقتران تم تطبيقه في الحوض المائي لبوشغوف. النتائج اظهرت ان الطريقة الثانية ترشح البيانات بطريقة واقعية لكن رغم ذلك نحن بعيدون على ان نقول انها الافضل. المقارنة الاخرى سمحت لنا بتقليص عدد الخزانات الى اثنين فقط ومنه انقاص عدد المعلمات مع ابقاء نفس فعالية معايير التقييم.

كلمات البحث : مرشح كالمان، نموذج الخزان، تحديث المعلمات، تحديث التدفقات.

## Abstract

Two approaches to modeling Rainfall-Runoff using the Tank Model coupled to the Kalman filter were examined in this work : parameters updating and outputs updating. The first one was tested in our memory of PFE, it will be compared with the second using four and then two tanks. This coupling is applied to simulate the flows of Bouchegouf watershed. The results showed that the second approach filters the data in a more real way, however, it is far to say that it's the best. The second comparison allowed us to reduce the number of reservoirs to only two, and thus to minimize the number of parameters while maintaining the same performance of the evaluation criteria.

Key words : Kalman filter, Tank Model, parameters updating, outputs updating.

## Résumé

Deux approches de la modélisation Pluie-Débit en utilisant le Tank Model couplé au filtre de Kalman ont été examinées dans ce travail : la mise à jour des paramètres et la mise à jour des débits. La première a été testée dans notre mémoire de PFE, elle sera comparée avec la deuxième en utilisant quatre et ensuite deux réservoirs. Ce couplage a été appliqué pour simuler les débits du sous bassin versant de Bouchegouf. Les résultats ont montré que la deuxième approche filtre les données d'une façon plus réelle, néanmoins, on est loin de dire que c'est la meilleure. La deuxième comparaison nous a permis de réduire le nombre des réservoirs à deux seulement, et donc de minimiser le nombre de paramètres en gardant la même performance des critères d'évaluation.

Mots clés : Filtre de Kalman, Tank Model, mise à jour des paramètres, mise à jour des débits.

# Table des matières

## Liste des tableaux

## Liste des figures

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 1 . Etat de l'art.....</b>	<b>8</b>
1. Etat de l'art de la modélisation hydrologique .....	9
1.1. Modélisation Pluie-Débit .....	9
1.2. Modélisation dans les bassins versants .....	11
1.3. Applications de la modélisation pluie débit.....	13
1.4. Critères d'ajustement.....	13
2. Etat de l'art de l'application des filtres en hydrologie (modèles pluie-débit) .....	15
2.1. Wavelet Power Spectrum .....	15
2.2. Filtre de Kalman .....	16
<b>Chapitre 2 . Matériels et Méthodes.....</b>	<b>19</b>
1. Matériels .....	20
1.1. Description du sous bassin versant.....	20
1.2. Données Utilisées.....	22
2. Méthodes.....	24
2.1. Tank Model.....	24
2.2. Filtre de Kalman .....	26
2.3. Couplage du Tank Model au Filtre de Kalman.....	28
<b>Chapitre 3 . Résultats Et Discussion.....</b>	<b>31</b>
1. Introduction.....	32
2. Application de la deuxième approche sur quatre réservoirs .....	32
3. Comparaison entre les deux approches pour quatre réservoirs .....	39
4. Comparaison entre l'application de quatre et deux réservoirs par la deuxième approche .....	42
5. Conclusion.....	45
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>47</b>

# Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Intervalles d'appréciation des critères de validation .....	15
Tableau 2-1 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant de Bouchegouf d'après A.N.R.H et (Mebarki, 2005).....	22
Tableau 2-2 : Coordonnées géographiques de la station hydrométrique de Bouchegouf (Louamri, 2013).....	22
Tableau 2-3 : Coordonnées géographiques de la station pluviométrique de Bouchegouf (mouchara, 2009).....	23
Tableau 3-1 : Valeurs initiales des paramètres du Tank Model à quatre réservoirs .....	32
Tableau 3-2 : Résultats de calage et validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre réservoirs .....	33
Tableau 3-3 : Taux de performance de calage et validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre réservoirs .....	33
Tableau 3-4 : Résultats de calibration du couplage Tank Model au filtre de Kalman par les deux approches avec quatre réservoirs .....	39
Tableau 3-5 : Résultats de validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par les deux approches avec quatre réservoirs.....	39
Tableau 3-6 : Valeurs initiales des paramètres du Tank Model à deux réservoirs.....	42
Tableau 3-7 : Résultats de calibration du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre et deux réservoirs.....	43
Tableau 3-8 : Résultats de validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre et deux réservoirs.....	43

# Liste des figures

Figure 2-1 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Seybouse (Louamri, 2012).....	20
Figure 2-2 : Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant de Bouchegouf (ABHCS-M, 2013).....	21
Figure 2-3 : Représentation du Tank Model avec quatre et deux réservoirs (Sugawara, 1979) .....	24
Figure 3-1 : Simulation des débits en phase de calibration par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs.....	34
Figure 3-2 : Simulation des débits en phase de validation par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs.....	35
Figure 3-3 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase calibration par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs .....	36
Figure 3-4 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase validation par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs .....	36
Figure 3-5 : Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de calibration .....	37
Figure 3-6 : Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de validation .....	37
Figure 3-7 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de calibration	38
Figure 3-8 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de validation .	38
Figure 3-9 : Représentation des débits des deux approches par rapport à la pluie.....	40
Figure 3-10 : Comparaison entre les débits des deux approches en fonction des débits observés en phase calibration avec quatre réservoirs .....	41
Figure 3-11 : Comparaison entre les débits des deux approches en fonction des débits observés en phase validation avec quatre réservoirs.....	41
Figure 3-12 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs en phase calibration .....	43
Figure 3-13 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs en phase validation.....	44
Figure 3-14 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs de la deuxième approche en fonction des débits observés en phase calibration .....	44
Figure 3-15 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs de la deuxième approche en fonction des débits observés en phase validation.....	45

# INTRODUCTION GENERALE

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

On entend par les 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 qui se présentent au vu 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 quelle approche doit-on suivre ? 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) couplé au filtre de Kalman sur un sous bassin versant de l'Est Algérien au pas de temps journalier par deux approches, la première « mise à jour des paramètres » utilisée déjà en mémoire de PFE, et la deuxième « mise à jour des débits ».
- En deuxième partie : nous allons étudier le comportement du Tank Model en utilisant seulement deux réservoirs et voir si les résultats restent stable en minimisant le nombre des paramètres.

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.

**Chapitre 1 .**  
**Etat de l'art**

1

## 1. Etat de l'art de la modélisation hydrologique

### 1.1. Modélisation Pluie-Débit

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable des lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes des risques hydrologiques. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié.

Il existe de nombreux modèles hydrologiques. Singh et Woolhiser (2002) décrivent le développement historique de la modélisation hydrologique et listent plusieurs dizaines de modèles disponibles. Ces modèles sont souvent classifiés selon leur mode de schématisation des processus d'écoulement dans le sol. D'un côté se retrouvent les modèles à base physique, comme le Système Hydrologique Européen (SHE; Abott *et al.*, 1986a,b), et de l'autre les modèles conceptuels, comme le modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J; Perrin *et al.*, 2003). Les modèles à base physique représentent les processus hydrologiques selon des équations à base physique et comportent généralement une discrétisation spatiale fine tandis que les modèles conceptuels représentent les processus hydrologiques à l'aide de réservoirs conceptuels dont le comportement est régi par les équations de continuité (le bilan hydrique doit être fermé) et de vidange (le débit sortant est proportionnel au volume stocké). Les modèles se distinguent également par la modélisation spatiale des variables. Les modèles globaux (ex : GR4J) considèrent que tout le bassin versant est homogène, alors que les modèles spatialisés discrétisent le bassin versant en plusieurs unités hydrologiques, généralement à l'échelle des données topographiques (ex : CEQUEAU; Charbonneau *et al.*, 1977). Ces modèles sont très gourmands en données d'entrée. Ces données sont rarement disponibles sur l'ensemble d'un bassin versant. Les modèles semi-spatialisés constituent une forme hybride où certaines zones plus grossières du bassin versant (souvent un sous-bassin versant) vont être traitées comme étant homogènes tout en permettant un certain laminage du débit transféré d'une zone à une autre (Hydrotel; Fortin *et al.*, 2001). Finalement, les modèles distribués regroupent les zones d'un bassin versant en unités de réponse hydrologique (URH) selon les caractéristiques d'un bassin versant, telles que la pente, l'altitude, l'occupation du sol, etc. Ces URH vont par la suite être pondérées selon la fraction du bassin versant (ou sous-bassin versant) qu'ils représentent, sans laminage. Il s'agit principalement d'une approche numériquement rapide pour considérer certaines hétérogénéités d'un bassin versant (ex. : TopModel; Beven et Freer, 2001).

Les modèles peuvent également être classifiés comme étant déterministes ou stochastiques. Les modèles déterministes offrent une solution unique pour une combinaison d'intrants donnée, tandis que les modèles stochastiques, comme les modèles autorégressifs (Box *et al.*, 2015), peuvent en offrir une infinité en utilisant, par exemple, une approche Monte-Carlo

avec des fonctions de distribution de probabilité pour simuler une série temporelle du débit ou d'une quelconque variable.

Les modèles hydrologiques contiennent généralement plusieurs paramètres à ajuster. Un calage est alors requis pour combler cette lacune en minimisant une fonction objective. Bien que le calage manuel soit encore utilisé, de nombreuses méthodes de calage automatique ou semi-automatique ont été développées (Moradkhani et Sorooshian, 2008). Les premières méthodes utilisées étaient des méthodes locales, où un minimum local de la fonction objectif est cherché par itération dans l'espace des paramètres à l'aide d'un jeu de paramètres initial donné. Ces méthodes peuvent être des méthodes directes, comme le simplexe de Nelder et Mead (1965), ou par gradient, comme la méthode de Newton. Des méthodes dites globales, où un minimum global de la fonction objectif est cherché, sont plutôt utilisées depuis une vingtaine d'années, dont la très populaire méthode du *Shuffled Complex Evolution – University of Arizona* (SCE-UA; Duan *et al.*, 1992) et d'autres méthodes émergentes comme le *Dynamically Dimensioned Search* (DDS; Tolson et Shoemaker, 2007). La fonction objective employée lors du calage joue également un rôle très important. Toutes les méthodes de calage automatique résolvent un jeu de paramètres en fonction d'un ou de plusieurs critères de performance regroupés dans la fonction objectif. Le choix de la fonction objectif dépend des besoins de l'utilisateur puisque chaque critère fournit une information différente des autres.

Une fonction objective populaire pour le calage de modèles hydrologique est le critère Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970). Ce critère accorde une importance au bon ajustement du modèle pour simuler les forts débits en particulier. La recherche d'un seul jeu de paramètres optimal n'est cependant pas suffisante pour connaître l'incertitude associée à ce jeu de paramètres. Des approches ont été développées afin de visualiser ou quantifier l'incertitude associée aux paramètres d'un modèle. On regroupe généralement ces approches comme étant informelles, comme le *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE; Beven et Binley, 1992), ou formelles, comme le *Differential Evolution Adaptive Metropolis* (DREAM; Vrugt *et al.*, 2008). Le GLUE propose d'échantillonner l'espace des paramètres un grand nombre de fois pour en obtenir des jeux de paramètres différents, de calculer la performance de ces jeux de paramètre selon un critère de performance au choix et d'en retenir seulement les meilleurs. La distribution de ces paramètres reflèterait ainsi l'incertitude associée aux paramètres. Le DREAM propose plutôt d'estimer la distribution des paramètres en faisant évoluer différents jeux de paramètres simultanément à partir d'une approche de Monte-Carlo par chaînes de Markov. Bien que la communauté scientifique ne soit pas en accord sur la validité des approches formelles et informelles, Vrugt *et al.* (2009) ont montré que les résultats des deux approches sont généralement très similaires.

Certains problèmes liés à l'utilisation des méthodes de calage automatique ont cependant été mis en évidence par Gupta *et al.* (1999). Un premier problème est que les valeurs des paramètres obtenues de cette façon peuvent être physiquement irréalistes. Un second problème est que le jeu de paramètres obtenu peut être surentrainé, de sorte que le modèle peut concorder très bien avec les données de calage pour une période donnée, mais être en fort désaccord avec les données de validation sur une autre période. Un troisième problème est

que le jeu de paramètres obtenu peut varier considérablement selon le choix des données de calage, de la fonction objectif et de la méthode de calage. Un dernier problème est connu sous l'appellation du « problème d'équifinalité », terme introduit par Beven et Binley (1992). Le principe d'équifinalité réfère au fait que plusieurs jeux de paramètres pour un même modèle hydrologique peuvent être aussi performants l'un comme l'autre. Ce problème survient notamment lorsqu'un modèle est surparamétré. L'équifinalité peut survenir lorsqu'il y a une forte dépendance entre deux ou plusieurs paramètres ou lorsque les résultats attendus sont peu ou pas sensibles à un ou plusieurs paramètres. Un ensemble de jeux de paramètres équiparamétrés peut alors être employé pour représenter l'incertitude liée à ces paramètres.

Les méthodes GLUE et DREAM citées plus haut ont été développées suivant cette approche. En absence de données pour diminuer le nombre de paramètres effectifs d'un modèle, ces problèmes suggèrent indirectement de favoriser la parcimonie des modèles. Malgré les nombreux modèles disponibles et les méthodes de calage développées jusqu'à présent, l'existence d'un modèle systématiquement supérieur à tous les autres n'a pas encore été démontrée (OMM, 1975; OMM, 1986; Reed *et al.*, 2004), bien que certaines améliorations soient possibles avec les modèles spatialisés par rapport aux modèles globaux s'il y a suffisamment de données disponibles pour les calibrer (Smith *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2013). Le choix d'un modèle repose donc généralement sur l'utilisation prévue du modèle, la disponibilité des données pour l'alimenter et sur la facilité à le mettre en œuvre.

### 1.2. Modélisation dans les bassins versants

Les premières applications des modèles hydrologiques de type pluie-débit portaient sur des bassins jaugés, Il s'agit de bassins disposant de chroniques de pluies et de débits suffisamment longues pour pouvoir calibrer les paramètres des modèles.

Depuis ces premières applications, la question des bassins non jaugés est devenue une priorité de la décennie 2000 (Blöschl, 2005).

#### 1.2.1. Bassin non jaugé

Selon l'organisation mondiale de la météorologie en 1984, une couverture de stations « admissible » pour un bassin semi aride est de disposer d'au moins un poste pluviométrique tous les 100 à 250 km<sup>2</sup>. Relativement à cette norme, un bassin non jaugé est défini comme un bassin dépourvu de mesures hydrométriques voire même de relevés pluviométriques. Cette situation est souvent rencontrée dans les zones arides et semi-arides.

Et, en effet, quand l'information hydrologique est absente ou rare, les modèles hydrologiques sont difficiles à calibrer. Certains auteurs ont cru pouvoir transposer les données d'un bassin jaugé vers un bassin non jaugé moyennant l'utilisation de méthodes de régionalisation qui exploitent les similarités de comportement sur la base de la proximité spatiale des bassins versants (Stedinger, 1986, Blöschl, 2005).

### ➤ Concept de régionalisation dans les bassins versants non jaugés

Les méthodes de régionalisation proposées pour l'étude des bassins non jaugés portent sur les débits d'étiage ou de crue (Blöschl, 2006), les précipitations (Hingray et al. 2009), et...

Cette transposition des données d'un bassin jaugé vers un bassin non jaugé est le résultat :

- d'une phase d'identification des régions susceptibles d'être considérées comme homogènes relativement aux processus qui y prévalent,
- et d'une phase d'application d'une méthode d'estimation appropriée à la variable transposée. Rojas-Serna (2005) donne une revue exhaustive de ces méthodes tandis que Zhang et Chiew (2009) suggèrent de recourir exclusivement à l'analyse de la proximité spatiale.

#### • Régionalisation par homogénéisation

L'homogénéisation est basée sur l'identification de toute ressemblance entre les bassins jaugés et non jaugés. L'extraction des similarités conduit à l'identification de zones homogènes. Il s'agit de regroupements de bassins ayant un même comportement par rapport à une caractéristique physiographique ou climatique (Rasmussen et al., 1994).

Lorsqu'on s'intéresse aux seules caractéristiques hydrologiques, tels que les débits extrêmes, la délimitation des zones homogènes est délicate suite aux incertitudes affectant les mesures (Parajka, 2005). C'est dire que l'efficacité de la méthode d'homogénéisation dépend de sa capacité à identifier et à délimiter les zones homogènes (Sivapalan et al., 2003).

#### • Régionalisation par régression

Le principe de la méthode consiste à établir par régression linéaire simple ou multiple les relations appropriées entre les variables d'intérêt d'un bassin connu et ses caractéristiques physiographiques et climatiques. Ces relations servent à déduire les variables des bassins non jaugés (non instrumentés). Les paramètres sont alors estimés par la méthode des moindres carrés pondérés (Stedinger et Tasker, 1986).

Cette technique de régionalisation demeure difficile à interpréter et n'aboutit pas toujours à un résultat. Elle est, cependant, la seule issue pour pallier aux problèmes de mesures des bassins non jaugés. Parajka et al. (2005) ainsi que Post et Jakeman (1997) l'ont expérimentée avec succès contrairement à Seibert (1999) et Peel et al. (2000). Pour cette raison, selon Parajka et al. (2005), les méthodes géostatistiques constituent une alternative qui donne de meilleurs résultats.

### 1.2.2. Bassin peu jaugé

Peu jaugé, faiblement jaugé ou tout simplement bassin comportant peu de données sont les qualificatifs utilisés pour désigner des systèmes ayant des réseaux de stations de mesures hydrométriques et/ou pluviométriques peu développés.

Se pose alors la question de savoir à partir de quand on peut considérer un bassin comme étant non jaugé ?

Hingray et al. (2009), conviennent de définir une classe intermédiaire, dite classe de bassins peu jaugés, où les mesures hydrologiques sont peu informatives. D'aucuns assimilent ces bassins à des bassins non jaugés du moment que les mesures disponibles ne permettent pas d'en donner une bonne représentation.

### 1.3. 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 (Ytoui, 2012) :

- 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,
- 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.

### 1.4. Critères d'ajustement

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 (Benkaci, 2006). On distingue deux types de critères :

#### 1.4.1. 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.

### 1.4.2. Critères numériques

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).

#### 1.4.2.1. 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 :

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

#### 1.4.2.2. 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 :

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

#### 1.4.2.3. L'indice d'erreur 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.

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

#### 1.4.2.4. 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.

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

## 1.4.3. 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 (Moriasi, et al.) :

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

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

## 2. Etat de l'art de l'application des filtres en hydrologie (modèles pluie-débit)

### 2.1. Wavelet Power Spectrum

En raison de sa capacité à élucider à la fois des informations spectrales et temporelles dans le signal. L'analyse des transformées en wavelet est devenue un outil d'analyse populaire.

Addison en 2001 a utilisé dans son article l'analyse de la transformée en wavelets à une variété de flux de sillage de canal ouvert. Il a constaté que la transformée en wavelets continue est la méthode conseillée pour la détection des caractéristiques dans les signaux temporels de la vitesse du fluide. Kim et Valdes en 2003 ont développé un modèle non linéaire pour la prévision de la sécheresse basé sur une conjonction de transformées de wavelet et de réseaux de neurones dans le bassin de la rivière Conchos au Mexique. Les résultats indiquent que le modèle de conjonction utilisant une transformée en wavelets dyadiques améliore significativement la capacité du réseau neuronal dans la prévision.

Rao et Krishna en 2009 ont procédé à la modélisation à l'aide des données de la Série météorologique hydrologique adoptant le Wavelet-Neural Network pour quatre rivières qui coulent vers l'ouest en Inde, Les résultats de la modélisation quotidienne du flux et de la série mensuelle des eaux souterraines indiquent que les performances des modèles WNN sont plus

efficaces que les modèles ANN. Nourani et al. en 2009 ont étudié la modélisation pluie-débit en utilisant l'approche Wavelet- ANN pour les prédictions de l'écoulement écoulé un jour avant le bassin hydrographique de Ligvanchai à Tabriz, en Iran. Les résultats du modèle montrent que la fonction mère « Haar » est la meilleure par rapport aux autres. Rajaei et al. en 2010 ont développé ANN, combinaison analyse de wavelets et ANN (WANN), la régression multilinéaire (MLR) et les modèles SRC pour les suspensions quotidiennes de la charge de sédiments (S) dans la station de mesure de l'Iowa aux États-Unis. Ils ont constaté que le modèle WANN était plus précis dans la prévision et sa performance était meilleure que les modèles ANN, MLR et SRC. Wang et al. en 2011 ont utilisé une méthode de transformée en wavelets pour la génération synthétique du flux quotidien dans la rivière Jinsha en Chine. Ils ont conclu que cette méthode nouvellement développée est capable de générer des séquences de flux en fonction des distributions de probabilité et du type de structure de dépendance.

### 2.2. Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est une méthode à base séquentielle bien adaptée aux applications en temps réel. Il existe plusieurs variantes du filtre de Kalman, notamment le filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter, EKF; Kitanidis et Bras, 1980a; Georgakakos, 1986a), le filtre de Kalman d'ensemble (Ensemble Kalman Filter, EnKF; Evensen, 1994) et le filtre de Kalman sans parent (Unscented Kalman Filter, UKF; Julier et Uhlmann, 1997). La différence principale entre ces méthodes réside dans la façon de propager les états du modèle et les matrices de covariance. Le EKF linéarise le modèle et l'opérateur d'observations, parfois de façon irréaliste, ce qui peut entraîner des problèmes numériques (Miller et al., 1994). Étant donné que la modélisation hydrologique n'est pas linéaire, la méthode a perdu de sa popularité (Liu et al., 2012), mais son potentiel en hydrologie a tout de même été démontré dans plusieurs études (Kitanidis et Bras 1980b; Georgakakos, 1986b; Aubert et al., 2003; Sun et al., 2004). Le UKF, comme le EKF, linéarise un modèle non linéaire, mais à travers une régression linéaire entre une sélection de points, appelés points sigma, de la distribution des états au pas de temps précédent (Wan et van der Merwe, 2000). La moyenne et la variance de l'analyse sont obtenues à partir de ces points sigma qui sont propagés par le modèle non linéaire. Bien que la méthode soit moins sensible aux non-linéarités du modèle et que les hypothèses de la méthode soient relativement peu contraignantes, cette méthode demande un nombre d'évaluations du modèle supérieur au double nombre de variables d'état, ce qui peut être très contraignant pour les modèles hydrologiques comprenant un grand nombre de variables comme les modèles spatialisés.

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 (Boudevillain, 2003). 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.

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses études utilisant le filtre de Kalman dans la modélisation pluie-débit (Bálint, 2002) ont été présentées dans la littérature. Un grand nombre de ces études a utilisé des modèles très simples de prévision du débit, tel que les modèles à moyenne mobile auto-regressive (ARMA) et les modèles à réservoir linéaire. Peu d'études ont été réalisées sur le filtre de Kalman en combinaison avec des approches plus avancées de modèle conceptuel pluie-débit. Quelques exemples importants et représentatifs des filtres de Kalman en combinaison avec des modèles pluie-débit sont les contributions de Wood & Szöllösi-Nagy (1978) et Kitanidis & Bras (1980a,b).

Un filtre de 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. 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 (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 (1985) avec un filtre de Kalman standard pour simuler divers événements de crue. Georgakakos (1986a,b) 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 (1987) pour tester plusieurs variantes du filtre de Kalman non-linéaire. Georgakakos & Smith (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. Lee & Singh ont intégré un filtre de Kalman standard avec le modèle de la cascade de réservoirs linéaires de Nash (Lee & Singh, 1998) et un modèle à réservoir (Lee & Singh, 1999). Ils ont trouvé que la précision des deux modèles a augmenté, son incertitude ayant été réduite. Un filtre de Kalman standard a été intégré avec succès dans le modèle conceptuel pluie-débit IHACRES par Schreider et al. (2001). Quesney et al. (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 (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.

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 (2001) où un filtre de Kalman d'ensemble a été utilisé pour améliorer la performance de la partie hydraulique du modèle MIKE 11. Les tests qui ont été exécutés admettent l'existence d'erreurs dans la condition aux limites du débit du modèle MIKE 11 et proposent de les rectifier en utilisant le niveau d'eau et les mesures de débit. Les auteurs

concluent que la performance totale du filtre était très satisfaisante dans tous les tests réalisés. Un autre exemple tout récent est présenté par Moradkhani et al. (2005) qui utilisent une approche d'estimation paramètre-état basée sur le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) pour l'estimation séquentielle à la fois des paramètres et des variables d'états d'un modèle hydrologique conceptuel. Troch et al. (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.

# Chapitre 2 . 2

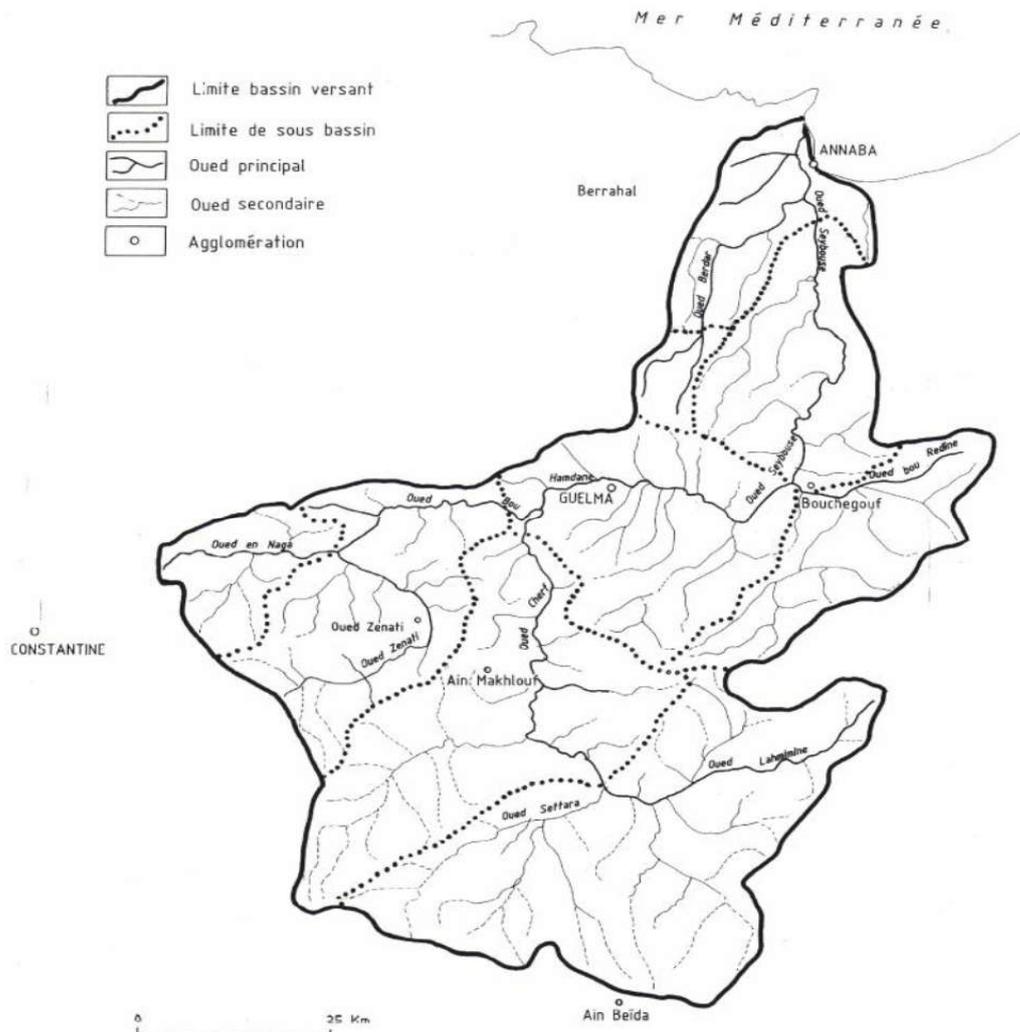
## Matériels et Méthodes

### 1. Matériels

#### 1.1. Description du sous bassin versant

Le sous bassin versant étudié est celui de BOUCHEGOUF, il appartient au bassin de la SEYBOUSE (moyenne Seybouse) au Nord-Est de l'Algérie dans les territoires de la wilaya de Guelma. Il est codé (1405) par l'ANRH. Il présente un climat méditerranéen avec un comportement saisonnier, où on observe une succession de saisons sèche et pluvieuse très contrastée à l'échelle annuelle, et des régimes d'écoulement très variables à l'échelle inter-annuelle.

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. 2-1).



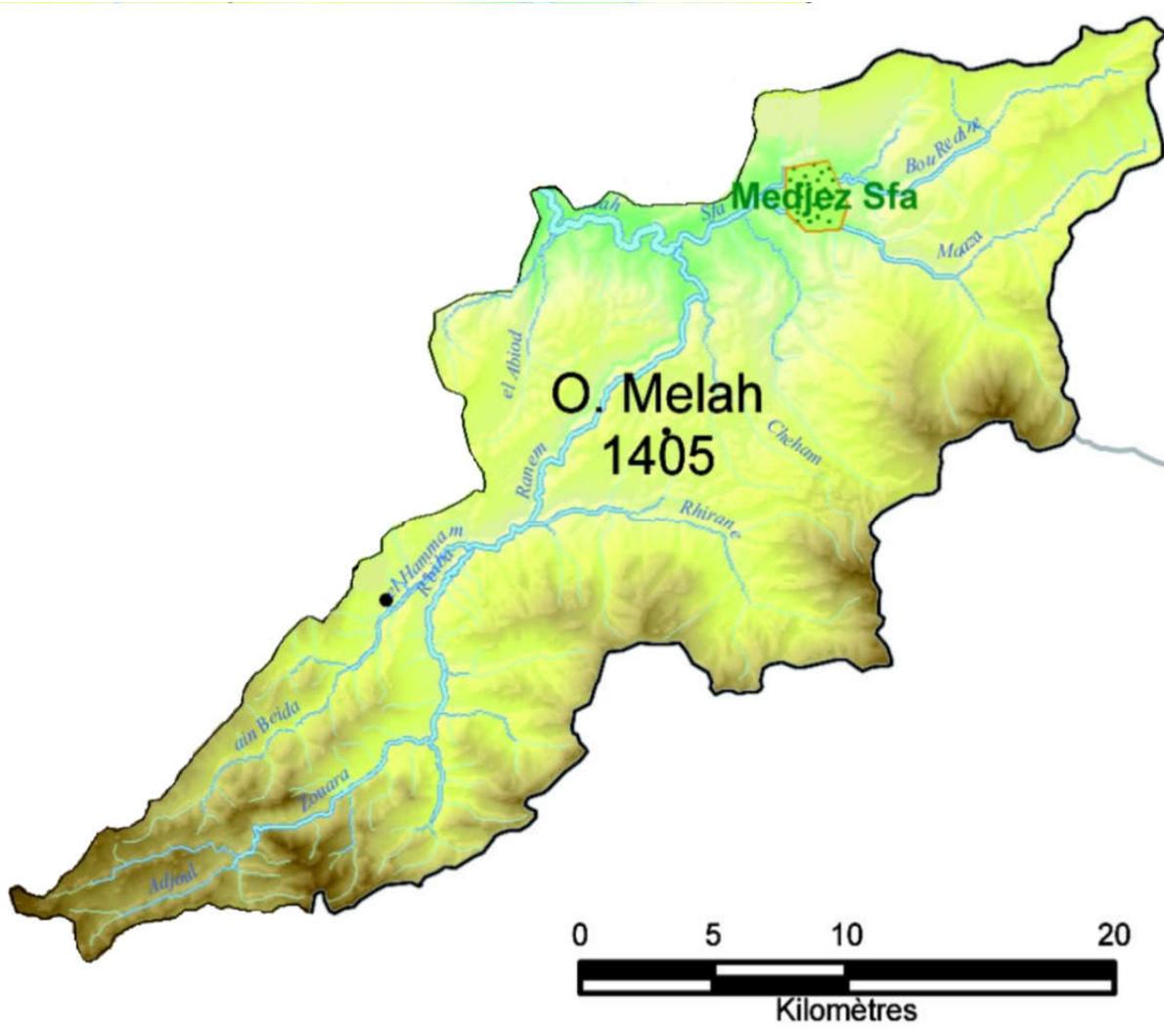
*Figure 2-1 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Seybouse (Louamri, 2012)*

## Chapitre 2. Matériels et Méthodes

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 du site « Global Weather Data for SWAT ». Ces données sont représentées par un pas de temps identique et concomitant (journalier dans notre cas).

Le sous bassin est décomposé en trois zones (Louamri,2013) indiqué dans la fig. 2-1 :

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



*Figure 2-2 : Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant de Bouchegouf (ABHCS-M, 2013)*

## Chapitre 2. Matériels et Méthodes

Les Caractéristiques morphométriques du sous bassin de Bouchegouf de nature surfacique (forme, ...) ou linéaire (réseau hydrographique) sont représentées dans le tableau ci-dessous :

*Tableau 2-1 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin versant de Bouchegouf d'après A.N.R.H et (Mebarki, 2005)*

Paramètres	Sous bassin de Bouchegouf
Superficie (km <sup>2</sup> )	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 <sup>2</sup> )	4

### 1.2. 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 sous 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.

#### 1.2.1. 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 sous 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 :

*Tableau 2-2 : Coordonnées géographiques de la station hydrométrique de Bouchegouf (Louamri, 2013)*

X	Y	Z
949.60	362.10	95

## Chapitre 2. Matériels et Méthodes

---

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.

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. Par contre, l'application d'un test qui détecte les valeurs singulières est obligatoire, par conséquent, nous avons utilisé le test de Grubbs et Beck, et ce dernier n'a détecté aucune valeur singulière.

### 1.2.2. Données pluviométriques

Le sous 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 une seule station pluviométrique codée (14 05 05) et contrôlée par l'ANRH à cause de la disponibilité des données, et aussi, car elle ne présente pas trop de lacunes pour toute la période étudiée. La période d'observations s'étend de Septembre 1985/Août 1995, et de Septembre 1996/Avril 2003.

Le sous 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 peut être supposée comme homogène.

Ces données présentées contiennent des lacunes dans certains cas, et puis nous avons opté pour la méthode de la moyenne journalière interannuelle pour les combler.

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

*Tableau 2-3 : Coordonnées géographiques de la station pluviométrique de Bouchegouf (mouchara, 2009)*

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

### 1.2.3. Données de l'évapotranspiration potentielle

l'évapotranspiration potentielle peut être estimée par plusieurs méthodes, 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.

## 2. Méthodes

### 2.1. 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.

Dans ce mémoire, le Tank Model utilisé est composé de quatre réservoirs en première partie, et de deux en deuxième partie, ils sont posés verticalement en série, comme le montre la fig. 2-2.

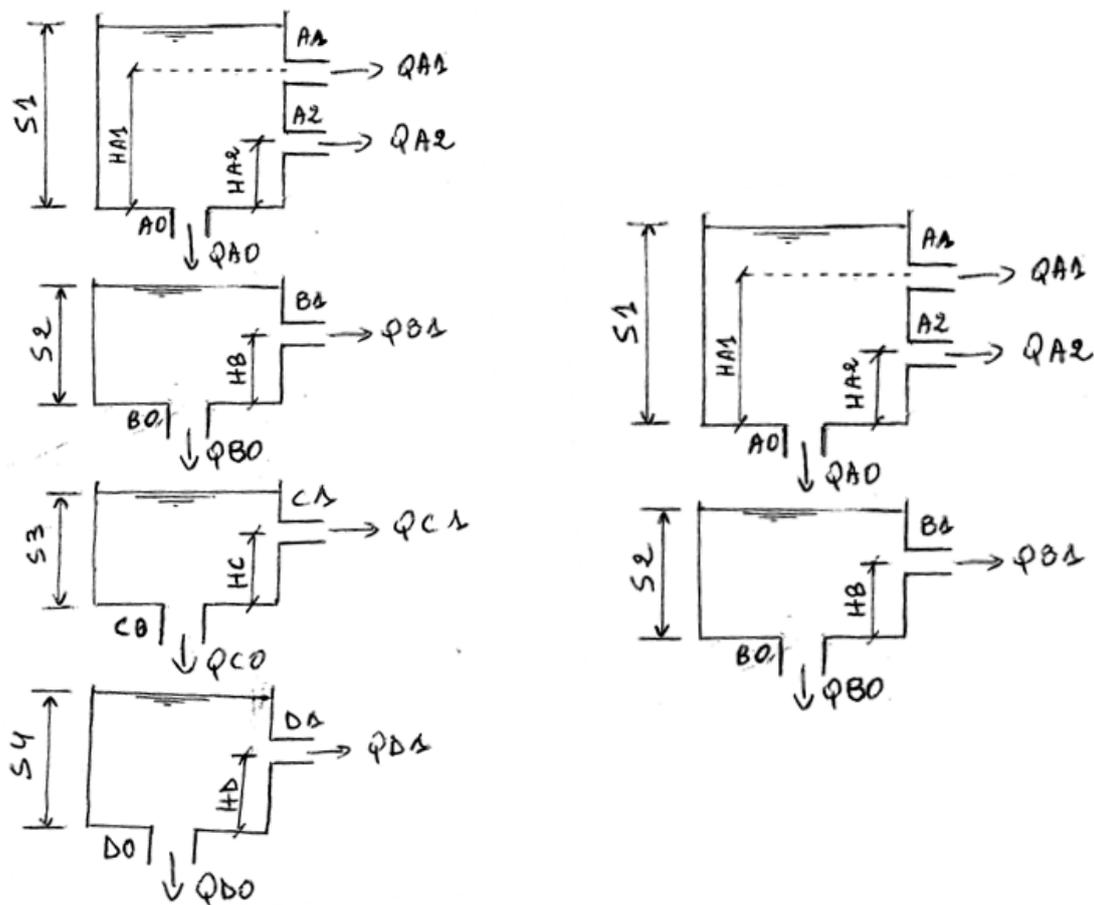


Figure 2-3 : Représentation du Tank Model avec quatre et deux réservoirs (Sugawara, 1979)

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

## Chapitre 2. Matériels et Méthodes

---

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. 2-2, 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 (Liu et al., 2010) :

$$\begin{aligned}
 S1(k) &= S1(k-1) + P(k) - E(k) - QA1(k-1) - QA2(k-1) - QA0(k-1) \\
 S2(k) &= S2(k-1) + QA0(k-1) - QB1(k-1) - QB0(k-1) \\
 S3(k) &= S3(k-1) + QB0(k-1) - QC1(k-1) - QC0(k-1) \\
 S4(k) &= S4(k-1) + QC0(k-1) - QD1(k-1) - QD0(k-1)
 \end{aligned}$$

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

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 (Liu et al., 2010) :

$$\begin{aligned}
 QA1 &= \begin{cases} A1 \cdot (S1 - HA1), & S1 > HA1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\
 QA2 &= \begin{cases} A2 \cdot (S1 - HA2), & S1 > HA2 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\
 QB1 &= \begin{cases} B1 \cdot (S2 - HB), & S2 > HB \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\
 QC1 &= \begin{cases} C1 \cdot (S3 - HC), & S3 > HC \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\
 QD1 &= \begin{cases} D1 \cdot (S4 - HD), & S4 > HD \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Le débit d'infiltration est calculé par les équations suivantes (Liu et al., 2010):

$$\begin{aligned}
 QA0 &= A0 \cdot S1 \\
 QB0 &= B0 \cdot S2 \\
 QC0 &= C0 \cdot S3 \\
 QD0 &= D0 \cdot S4
 \end{aligned}$$

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 :

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

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

Pour le modèle à deux réservoirs, les mêmes équations sont utilisées sauf que le stockage dépend de  $S1$  et  $S2$  et les débits de sortie sont  $QA1$ ,  $QA2$  et  $QB1$ , et les débits d'infiltration sont  $QA0$  et  $QB0$  seulement.

### 2.2. Filtre de Kalman

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

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.

#### 2.2.1. Modèle de Système

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

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

Avec  $X(k) \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur d'état au temps  $k$  ;  $\Phi(k|k-1)$  est la matrice de transition d'état au temps  $k-1$  à  $k$  de dimension  $(n \times n)$  ;  $X(k-1) \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur d'état au temps  $k-1$  ;  $\Gamma(k|k-1)$  est la matrice de transition de bruit de dimension  $(n \times n)$  par lequel le bruit précédent (erreur) transite vers le bruit actuel ;  $w(k-1) \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur de bruit blanc Gaussien de système au temps  $k-1$ .

#### 2.2.2. Modèle de Mesure

Le vecteur d'état  $X(k)$  du système est observé à travers un système de mesure qui contient en soi une erreur (bruit). Donc le vecteur de mesure  $Z(k)$  peut être décrit comme une combinaison linéaire d'un vecteur d'état  $X(k)$  et d'un vecteur d'erreur de mesure  $v(k)$  (Lee & Singh, 1999) :

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

Avec  $Z(k) \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur de mesure au temps  $k$  ;  $H(k)$  est la matrice de transition de mesure au temps  $k$  de dimension  $(1 \times n)$  ;  $v(k) \in \mathfrak{R}^n$  est le 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 (Liu et al., 2010) :

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

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

### 2.2.3. Procédure du filtre de Kalman Standard

Le fonctionnement du filtre de Kalman peut se diviser en deux étapes : **prédiction** et **mise à jour**.

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 :

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

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

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

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 :

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

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

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

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

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

Avec  $I$  est la 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.

### 2.3. Couplage du Tank Model au Filtre de Kalman

Cette section décrit comment le Tank Model est couplé au filtre de Kalman. Deux approches sont décrites : la première approche est la mise à jour des paramètres (déjà utilisé et expliqué dans le mémoire de PFE), et la deuxième est la mise à jour des débits.

Dans la première approche, 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.

Dans la deuxième approche, les paramètres du Tank Model sont fixés. Et pour chaque pas de temps, le filtre de Kalman met à jour seulement les débits de sortie du modèle, et ensuite, le stockage de chaque réservoir est recalculé et le processus est répété pour le prochain pas de temps.

#### 2.3.1. Approche 1 : Mise à jour des paramètres

##### 2.3.1.1. Modèle de Système

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

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

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

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

##### 2.3.1.2. 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 :

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

Où la matrice de transition de mesure (observation)  $H(k)$  :  $(1 \times 14)$  est définie par :

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

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

Ces hauteurs sont définies par :

$$\begin{aligned} h_1 &= S1 - HA1, & h_2 &= S1 - HA2, & h_3 &= S2 - HB, \\ h_4 &= S3 - HC, & h_5 &= S4 - HD \end{aligned}$$

### 2.3.2. Approche 2 : Mise à jour des débits

Dans cette nouvelle approche, on va utiliser deux types de simulation : avec quatre réservoirs et avec deux réservoirs.

#### 2.3.2.1. Quatre réservoirs

##### 2.3.2.1.1. Modèle de Système

Le vecteur d'état du modèle de système est composé par les débits latéraux et d'infiltration du Tank Model. Le vecteur d'état  $X(k)$  :  $(9 \times 1)$  s'écrit comme suit :

$$X(k) = [QA1, QA2, QB1, QC1, QD1, QA0, QB0, QC0, QD0]^T$$

La matrice de transition d'état  $\Phi(k)$  :  $(9 \times 9)$ , et la matrice de transition de bruit de système  $\Gamma(k|k-1)$  :  $(9 \times 9)$  sont supposées comme matrices identités  $I$ , ensuite le modèle du système s'écrit par :

$$X(k) = X(k-1) + w(k)$$

##### 2.3.2.1.2. 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 suit :

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

Où la matrice de transition de mesure (observation)  $H(k)$  :  $(1 \times 9)$  est définie par :

$$H(k) = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0]$$

#### 2.3.2.2. Deux réservoirs

##### 2.3.2.2.1. Modèle de Système

Le vecteur d'état  $X(k)$  :  $(5 \times 1)$  est comme suit :

$$X(k) = [QA1, QA2, QB1, QA0, QB0]^T$$

La matrice de transition d'état  $\Phi(k)$  :  $(5 \times 5)$ , et la matrice de transition de bruit de système  $\Gamma(k|k-1)$  :  $(5 \times 5)$  sont supposées comme matrices identités  $I$ , ensuite le modèle du système s'écrit par :

$$X(k) = X(k-1) + w(k)$$

### 2.3.2.2.2. Modèle de Mesure

Le modèle de mesure peut être écrit comme suit :

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

Où la matrice de transition de mesure (observation)  $H(k)$  :  $(1 \times 5)$  est définie par :

$$H(k) = [1, 1, 1, 0, 0]$$

### 2.3.2.3. Procédure

Pour la simulation à quatre réservoirs, 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 détermine l'estimation d'état  $X(k|k)$  et la covariance du bruit de système  $P(k|k)$ .

Après la mise à jour du système, le stockage de chaque réservoir  $S1(k)$ ,  $S2(k)$ ,  $S3(k)$  et  $S4(k)$  est réestimé en utilisant les équations inverses du débit, ensuite, les stockages  $S1(k+1)$ ,  $S2(k+1)$ ,  $S3(k+1)$  et  $S4(k+1)$  sont calculés par les équations du stockage. Enfin, les débits latéraux et d'infiltration mis à jour, qui sont considérés comme la véritable étape d'estimation de l'état du modèle mis à jour sont atteints en utilisant les équations du débit citées précédemment.

Une fois tous les paramètres sont mis à jour, on continue le processus pour le prochain pas de temps.

Pour la simulation à deux réservoirs, la procédure est la même, sauf qu'on utilise les stockages  $S1$  et  $S2$ , et les débits latéraux et d'infiltration de deux premiers réservoirs seulement.

# **Chapitre 3 . Résultats Et Discussion**

### 1. Introduction

Dans ce chapitre, on va appliquer la méthodologie présentée dans le chapitre précédent, à savoir le couplage du Tank Model au filtre de Kalman en utilisant deux approches différentes, en outre, on va tester la deuxième approche avec deux réservoirs seulement pour voir la réaction du modèle pour le climat de la région étudiée. Deux comparaisons seront donc présentées, la première entre les deux approches, et la deuxième entre quatre et deux réservoirs.

Les résultats analytiques vont être accompagnés par des représentations graphiques permettant une comparaison directe des hydrogrammes simulés et observés, et mettant en exergue les performances des modèles confirmant ainsi l'information que les critères analytiques offrent.

Le but de la comparaison de la performance entre les deux approches est de savoir laquelle est la meilleure entre eux, autrement dit, est de connaître laquelle des deux donne un bon filtrage pour les données bruitées, ainsi, l'application de deux réservoirs a pour but de savoir comment réagi le modèle avec le minimum des paramètres dans cette région.

Cette application de couplage du Tank Model au filtre de Kalman en utilisant la deuxième approche « mise à jour des débits » aura lieu la première fois en Algérie, par contre, l'utilisation de deux réservoirs seulement avec cette approche n'a jamais été utilisée par les hydrologues.

### 2. Application de la deuxième approche sur quatre réservoirs

La période d'étude est divisée en deux sous échantillons, la période de calage s'étend de Septembre 1985/Août 1995, et pour la validation de Septembre 1996/Avril 2003. La technique utilisée pour caler ce modèle est celle du Trial & Error .

- **Initialisation**

Le tableau ci-dessous présente les valeurs initiales optimales des paramètres du Tank Model en utilisant la méthode du Trial & Error :

**Tableau 3-1 : Valeurs initiales des paramètres du Tank Model à quatre réservoirs**

Réservoirs	Débits de ruissellement		Débits d'infiltration		Coefficients des débits de ruissellement		Coefficients des débits d'infiltration		Hauteurs des ouvertures (mm)	
	QA1	0	QA0	0.1	A1	0.02	A0	0.1	HA1	4
Premier réservoir	QA2	0							A2	0.025
	QB1	0	QB0	0.1	B1	0.025	B0	0.1	HB	4
Deuxième réservoir	QC1	0.1	QC0	0.1	C1	0.01	C0	0.1	HC	4
Troisième réservoir	QD1	0.1	QD0	0.1	D1	0.01	D0	0.1	HD	4
Quatrième réservoir										

En appliquant la méthode du Trial & Error aux données sur le sous bassin versant de Bouchegouf, on obtient :

La covariance de bruit de mesure  $R(k) = 0.0001$ ,

La covariance de bruit du processus  $M(k)$  est une matrice de  $10^{-4}$  sur la diagonale et 0 dans le reste.

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

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

La diagonale de la matrice de covariance est :

$$P(k-1|k-1) = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5 \ \sigma_6 \ \sigma_7 \ \sigma_8 \ \sigma_9]$$

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

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

### • Résultats

Les résultats de la modélisation Pluie-débit du couplage Tank Model au filtre de Kalman en utilisant la deuxième approche avec quatre réservoirs au bassin versant de Bouchegouf sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 3-2 : Résultats de calage et validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre réservoirs**

Critères	Nash	R <sup>2</sup>	PBIAS	RSR
Calibration	0.947	0.948	7.048	0.228
Validation	0.971	0.972	12.722	0.170

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

**Tableau 3-3 : Taux de performance de calage et validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre réservoirs**

Critères	Nash	R <sup>2</sup>	PBIAS	RSR
Calibration	Très bon	Très bon	Bon	Bon
Validation	Très bon	Très bon	Bon	Bon

D'après les résultats obtenus dans ces tableaux, nous constatons que les valeurs des critères de Nash et le  $R^2$  dépassent les 97% en phase validation.

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

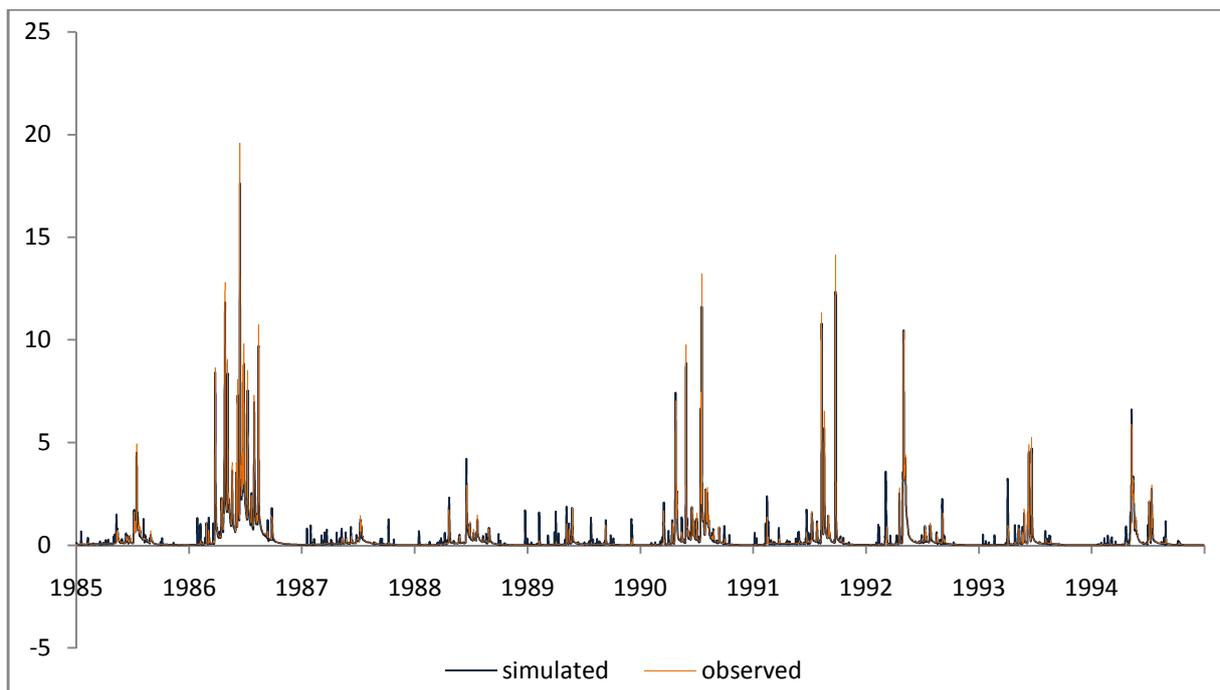
Ainsi, les critères d'évaluation ont bien réagi à ce couplage. En effet, le Nash est très bon pour les deux périodes, ce qui se traduit par une reproduction quasi parfaite des débits observés (fig. 3-1 et 3-2) surtout aux forts écarts (période de crue).

Le PBIAS indique que la tendance de la prédiction suit la tendance des observations d'une façon plus ou moins bonne dans la calibration (7%) et la validation (12%) avec une sous-estimation du biais puisque les valeurs du PBIAS sont positives.

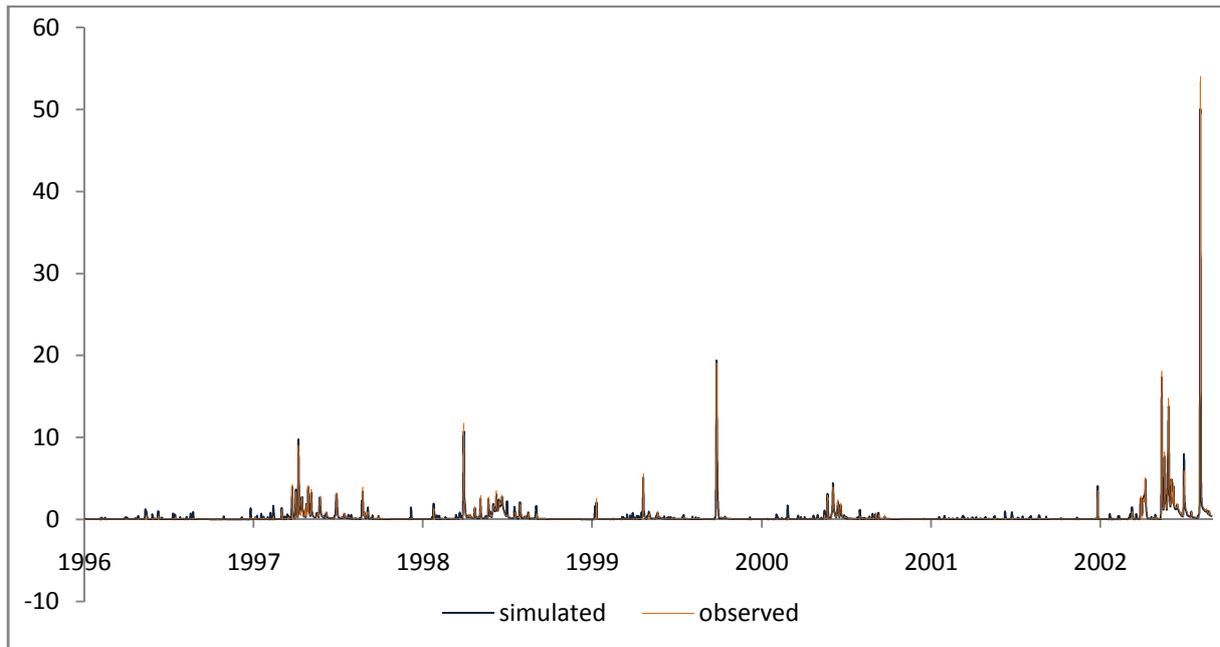
L'indice d'erreur RSR a donné de bons résultats pour les deux phases, cela indique que les erreurs du modèle ne sont toutefois pas aussi importantes.

Le coefficient de détermination  $R^2$  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 3-1 : Simulation des débits en phase de calibration par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs*

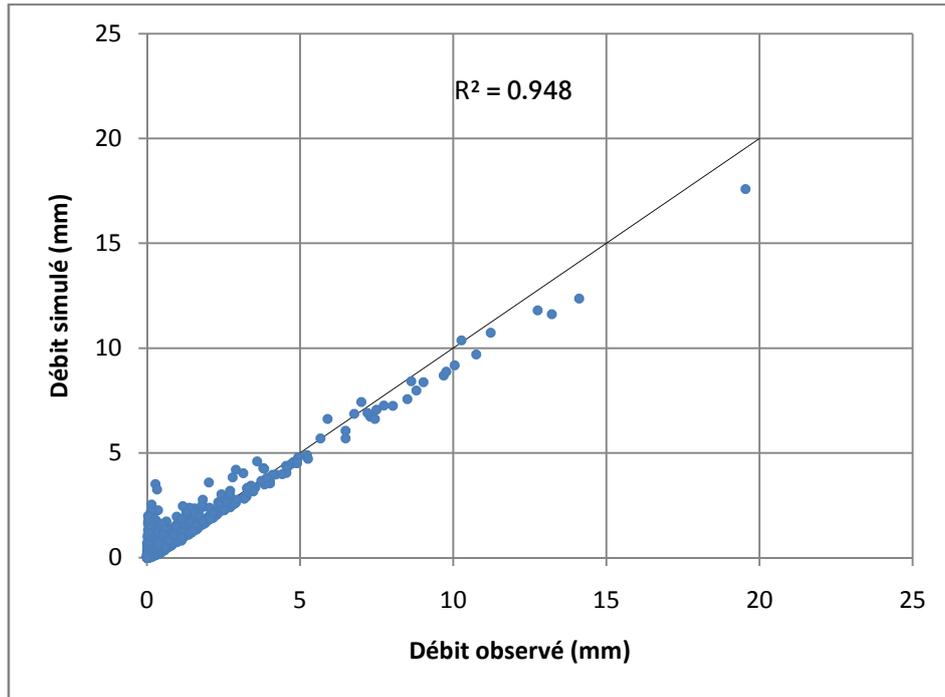


**Figure 3-2 : Simulation des débits en phase de validation par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs**

D'après ces figures, on remarque déjà que les débits simulés ont bien suivi les valeurs observés, ce que confirment les résultats analytique présentés dans le tableau 3-2, ainsi, pour la calibration, on remarque que dans quelque cas le filtre de Kalman simule plusieurs valeurs différentes de celles observées et ceci est dû au bruit de l'observation, par exemple, entre l'année 1987 et 1988 et entre 1989 et 1990, le filtre a simulé des valeurs variables, alors que les valeurs indiquées comme observées sont presque nulles, or, en revenant aux archives, on voit bien qu'il y avait de la pluie durant cette période, et par conséquent le filtre a bien simulé les valeurs réelles et corrigé l'erreur, ainsi cette approche montre qu'elle s'appuie beaucoup plus sur la valeur calculée, c'est-à-dire la valeur d'entrée (Stockage), cela donne plus d'avantage à cette approche. Il en de même pour la partie validation, ou le filtre continue de corriger les écarts entre valeurs simulées et observées.

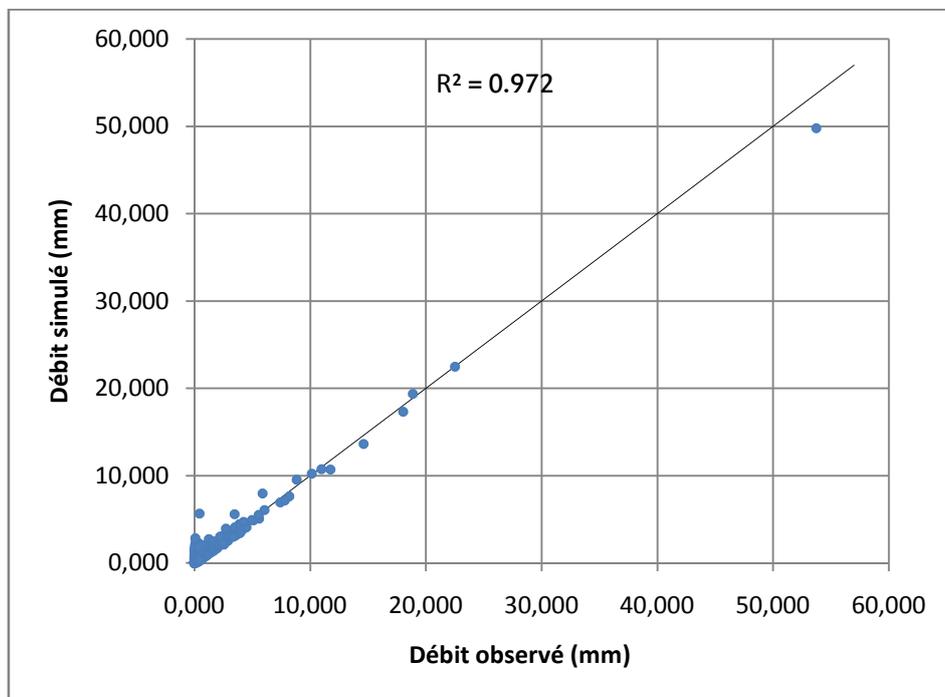
- **Représentation Débits observés- simulés**

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. 3-3 et 3-4).



**Figure 3-3 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase calibration par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs**

Dans la calibration, on remarque que la majorité des débits sont entre 0 et 10 mm avec quelques pics, ainsi, la deuxième approche simule bien les débits de crue, et ceci est représenté par un coefficient de détermination de  $R^2 = 0.95$ , mais il n'arrive pas à simuler parfaitement les débits d'étéage.



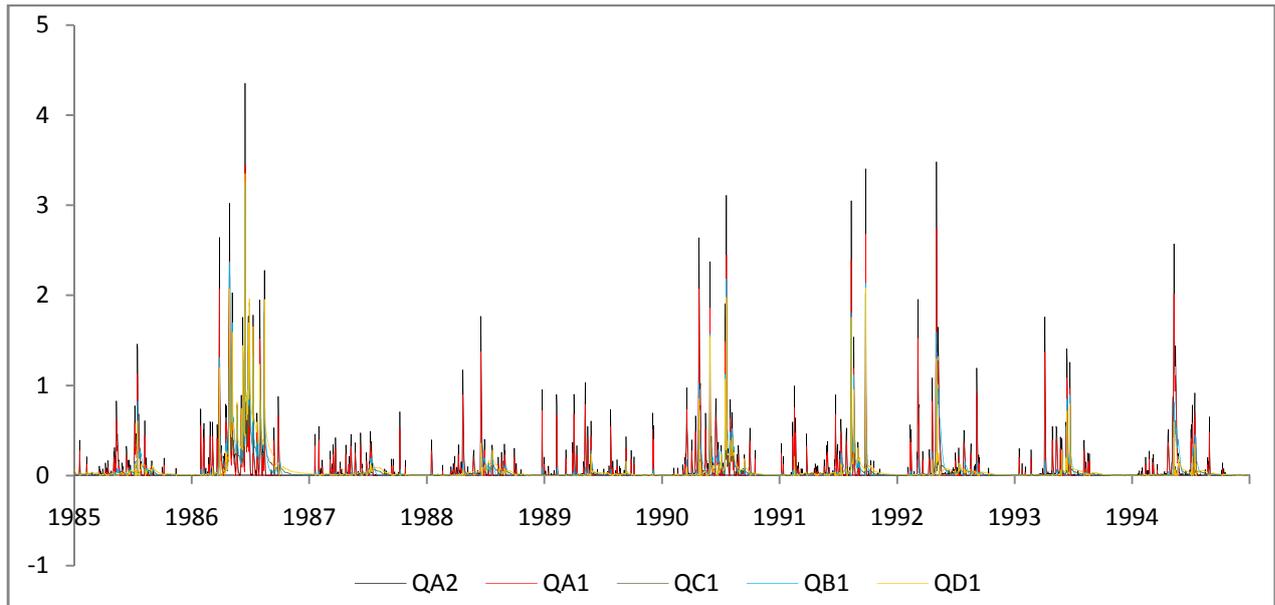
**Figure 3-4 : Débit simulé en fonction du débit observé en phase validation par la deuxième approche du couplage avec quatre réservoirs**

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

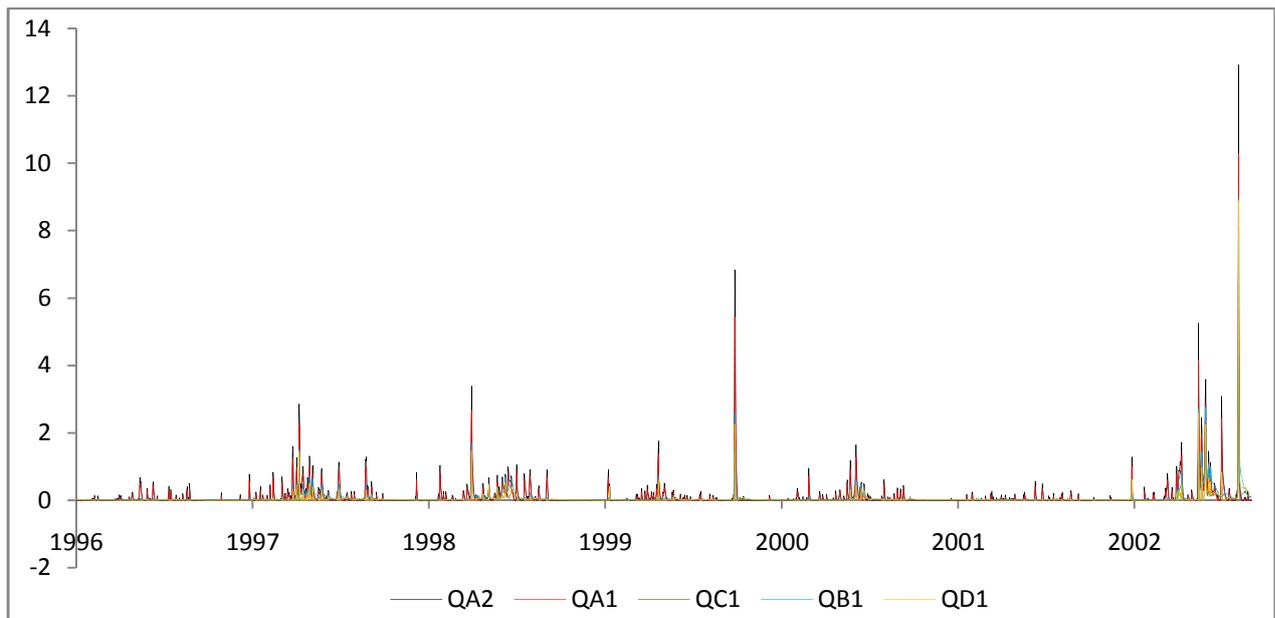
- **Les éléments du vecteur d'état**

Intéressons nous dans cette partie aux éléments du vecteur d'état de cette approche qui sont : les débits de ruissellement et les débits d'infiltration,

- **Débit de ruissellement**



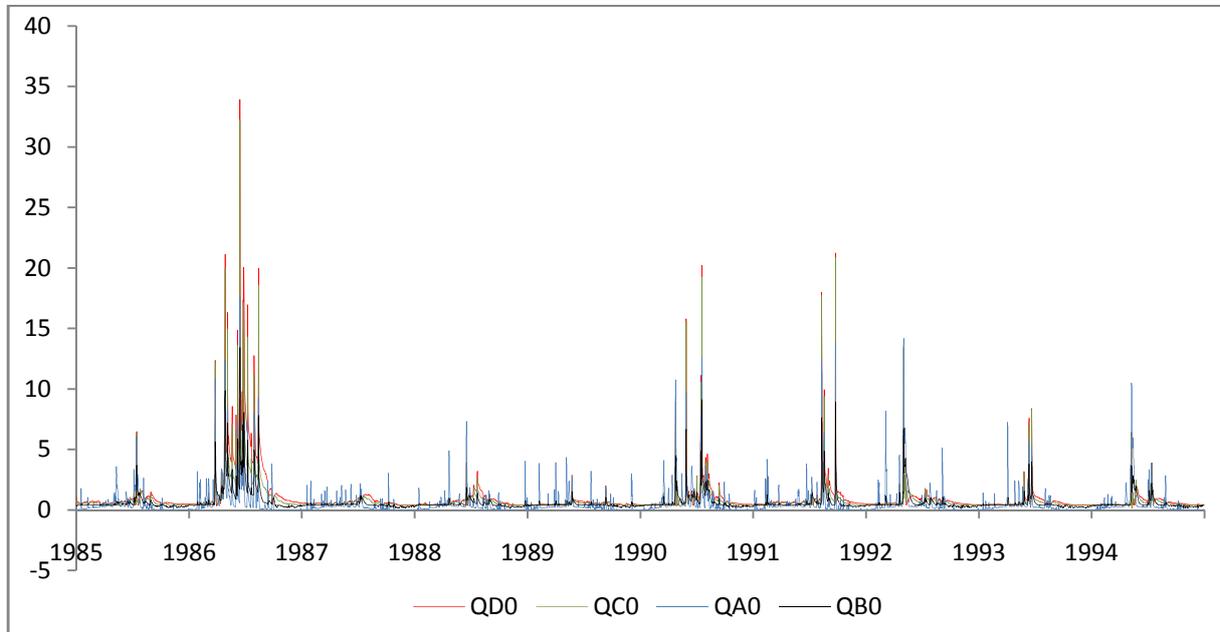
**Figure 3-5 : Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de calibration**



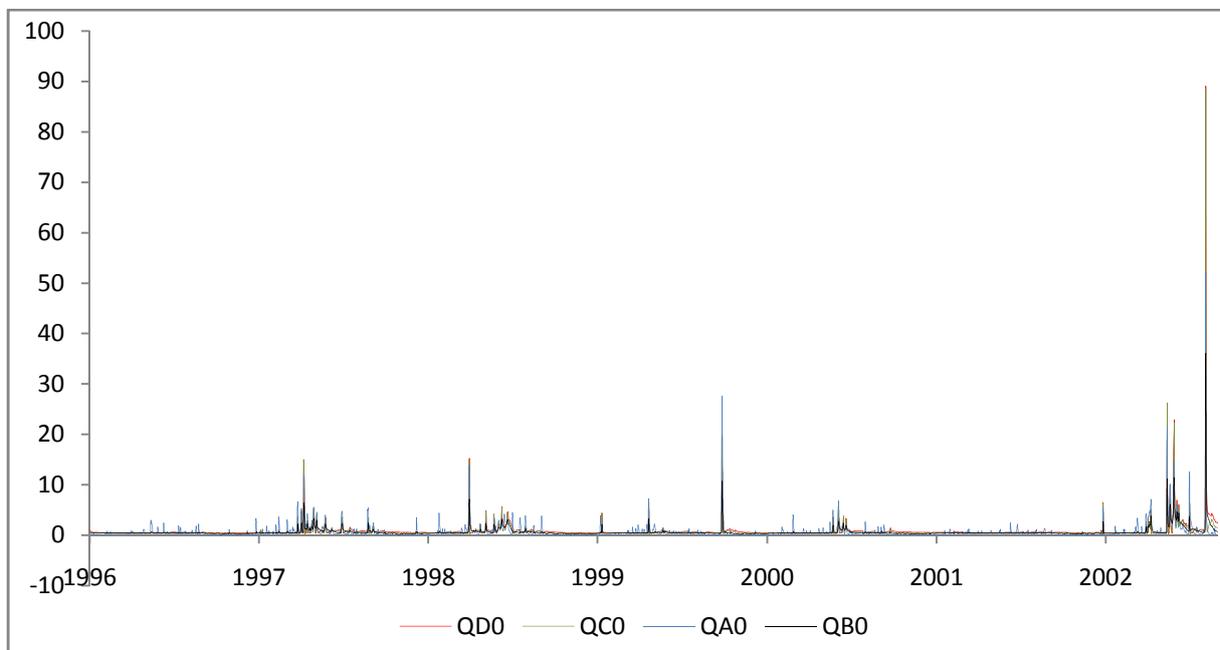
**Figure 3-6 : Evolution des débits de ruissellement dans le temps en période de validation**

D'après ces figures, on voit que tous les débits varient en fonction du temps que ce soit en phase de calage ou validation, ce qui montre que la approche à quatre réservoirs fonctionne bien.

### ➤ Débit d'infiltration



*Figure 3-7 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de calibration*



*Figure 3-8 : Evolution des débits d'infiltration dans le temps en période de validation*

D'après ces figures, on voit que tous les débits varient en fonction du temps que ce soit en phase de calibration ou validation, et on remarque que les débits d'infiltration sont intéressants dans cette région.

### 3. Comparaison entre les deux approches pour quatre réservoirs

La comparaison entre la première approche « mise à jour des paramètres » déjà utilisée en mémoire de PFE et la deuxième approche « mise à jour des débits » présentées ci-dessus n'est pas pour savoir laquelle est la meilleure, mais de connaître laquelle filtre mieux les débits en se basant sur les données du stockage (pluie et ETP). En effet, de bons résultats analytiques d'une approche par rapport à l'autre ne permettent pas à eux seuls de juger laquelle des deux approches est la meilleure, par contre, le bon résultat est de bien filtrer les données.

- **Résultats Analytiques**

Les résultats de la modélisation Pluie-débit du couplage Tank Model au filtre de Kalman en utilisant les deux approches avec quatre réservoirs au données du sous bassin versant de Bouchegouf sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 3-4 : Résultats de calibration du couplage Tank Model au filtre de Kalman par les deux approches avec quatre réservoirs**

Critères	Nash	R <sup>2</sup>	PBIAS (%)	RSR
Approche 1	0.970	0.972	8.22	0.171
Approche 2	0.947	0.948	7.05	0.228

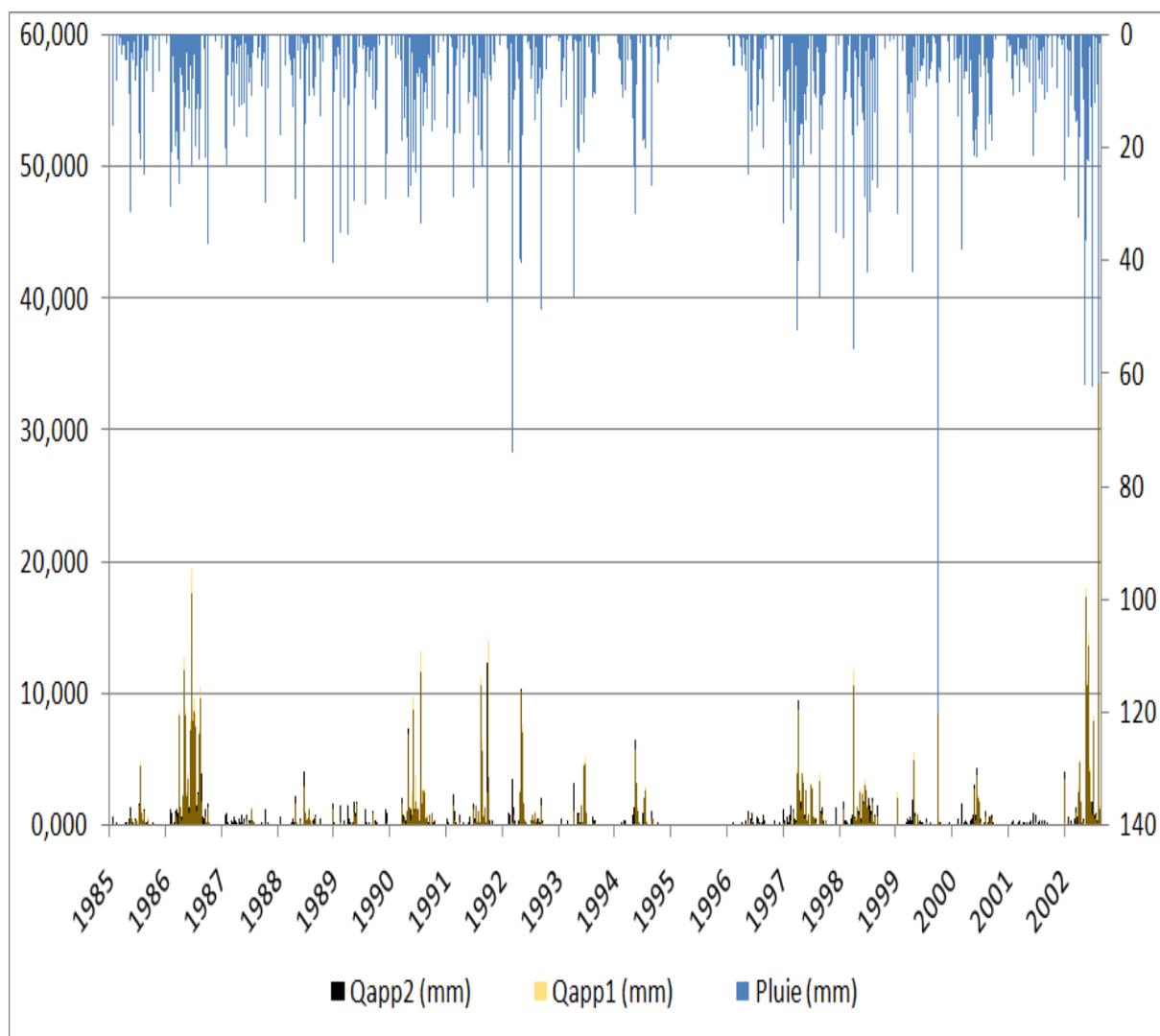
**Tableau 3-5 : Résultats de validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par les deux approches avec quatre réservoirs**

Critères	Nash	R <sup>2</sup>	PBIAS (%)	RSR
Approche 1	0.992	0.993	1.14	0.087
Approche 2	0.971	0.972	12.72	0.170

D'après ces résultats, nous constatons que les valeurs des critères de la première approche sont nettement meilleurs que ceux de la deuxième approche pour les deux périodes de calage et validation, ceci se traduit par un filtrage plus profond de la part de la deuxième approche.

### • *Résultats Graphiques*

Le but de cette représentation est de comparer entre les débits des deux approches, et de voir l'évolution de ces derniers par rapport à l'évolution de la pluie en fonction du temps pour toute la période d'étude :

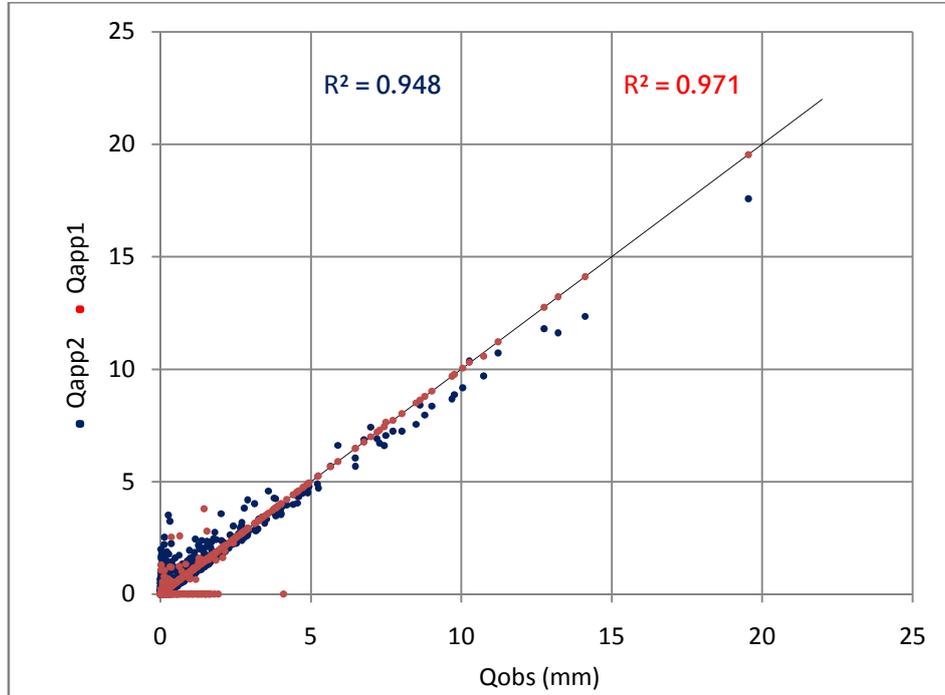


**Figure 3-9 : Représentation des débits des deux approches par rapport à la pluie**

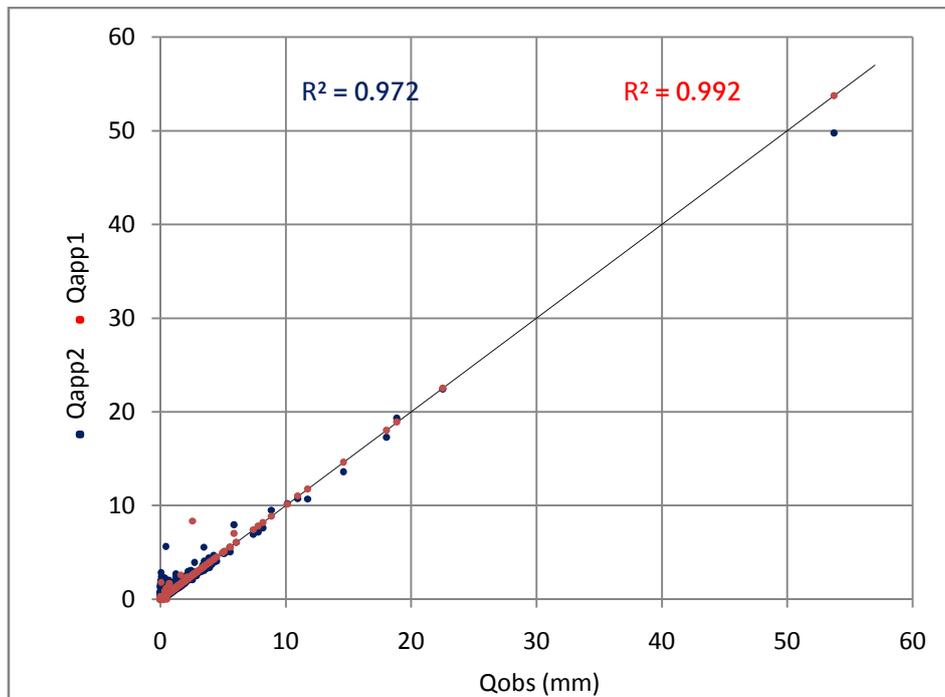
D'après la figure ci-dessus, on remarque que les débits des deux approches varient dans le même sens malgré quelques différences, ainsi, on voit que la deuxième approche a filtré les données d'une façon plus profonde, ceci se traduit par des débits d'étiage plus grands que ceux simulés par la première approche et débits de crue plus ou moins petits par rapport à cette dernière. En comparant ces résultats avec l'évolution de la pluie, on constate que la deuxième approche s'appuie beaucoup plus sur les valeurs d'entrée (stockage), par contre, la première approche s'appuie beaucoup plus sur les valeurs observées. Cette comparaison graphique donne un peu l'avantage à la deuxième approche, car en tenant compte des valeurs d'entrée, la simulation devient plus réelle.

### • Représentation Débits observés- simulés

Pour conforter les résultats obtenus précédemment et apprécier d'avantage l'écart entre les valeurs simulées et observées, on a comparé les débits simulés des deux approches à ceux observés graphiquement pour les deux périodes calage et validation (fig. 3-10 et 3-11).



*Figure 3-10 : Comparaison entre les débits des deux approches en fonction des débits observés en phase calibration avec quatre réservoirs*



*Figure 3-11 : Comparaison entre les débits des deux approches en fonction des débits observés en phase validation avec quatre réservoirs*

D'après ces figures, on remarque que la majorité des débits sont entre 0 et 10 mm avec quelques pics que ce soit pour la période de calibration ou de validation. Ainsi, ces résultats ont montré que la première approche simule un peu mieux les débits par rapport à la deuxième, et surtout les pics (débits de crue).

### 4. Comparaison entre l'application de quatre et deux réservoirs par la deuxième approche

Dans cette partie, on va essayer de comparer entre l'utilisation de quatre et deux réservoirs seulement en suivant la deuxième approche « mise à jour des débits ». Le but est de savoir est-ce qu'on peut trouver des résultats plus ou moins identiques à ceux de quatre réservoirs en minimisant le nombre des réservoirs à deux seulement.

La période d'étude est la même que dans la partie précédente.

- *Initialisation*

Le tableau ci-dessous représente les valeurs initiales optimales des paramètres du Tank Model en utilisant la méthode du Trial & Error :

**Tableau 3-6 : Valeurs initiales des paramètres du Tank Model à deux réservoirs**

Réservoirs	Débits de ruissellement		Débits d'infiltration		Coefficients des débits de ruissellement		Coefficients des débits d'infiltration		Hauteurs des ouvertures (mm)	
	QA1	0	QA0	0.1	A1	0.02	A0	0.1	HA1	4
Premier réservoir	QA2	0	QA0	0.1	A2	0.025	A0	0.1	HA2	2
	QB1	0.1			QB0	0.1			B1	0.025

Par la méthode du Trial & Error, les valeurs de la covariance de bruit de mesure  $R(k)$  et la covariance de bruit du processus  $M(k)$  sont les mêmes que celles trouvées dans la partie précédente.

La diagonale de la matrice de covariance est :

$$P(k-1|k-1) = [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5]$$

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

$$P(k-1|k-1) = [0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25]$$

• *Résultats Analytiques*

Les résultats de la modélisation Pluie-débit du couplage Tank Model au filtre de Kalman en utilisant la deuxième approche pour quatre et deux réservoirs au bassin versant de Bouchegouf sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 3-7 : Résultats de calibration du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre et deux réservoirs**

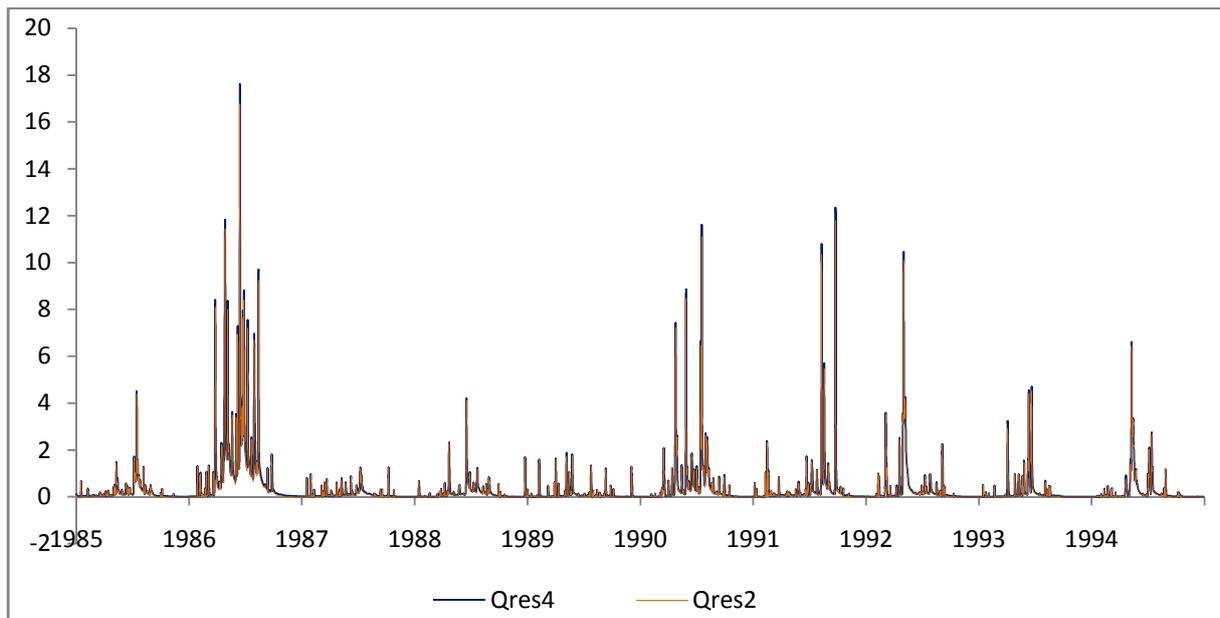
Critères	Nash	R <sup>2</sup>	PBIAS (%)	RSR
4 réservoirs	0.947	0.948	7.05	0.228
2 réservoirs	0.947	0.949	2.27	0.230

**Tableau 3-8 : Résultats de validation du couplage Tank Model au filtre de Kalman par la deuxième approche avec quatre et deux réservoirs**

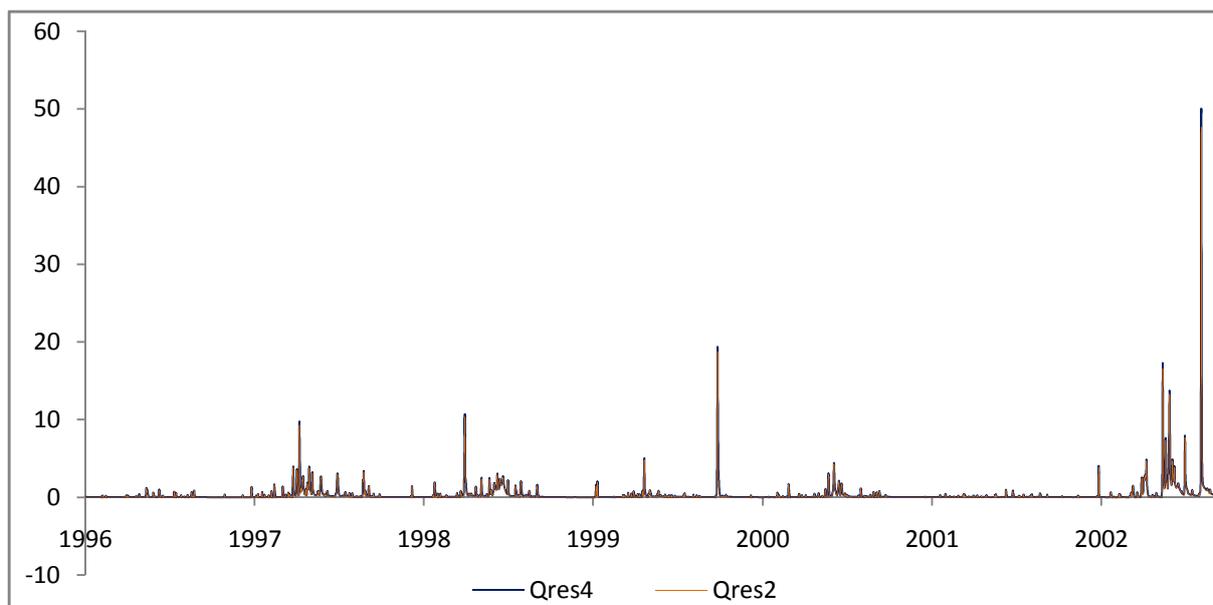
Critères	Nash	R <sup>2</sup>	PBIAS (%)	RSR
4 réservoirs	0.971	0.972	12.72	0.170
2 réservoirs	0.967	0.970	3.47	0.180

D'après ces résultats, on voit que les valeurs numériques pour quatre réservoirs sont semblables à ceux pour deux réservoirs pour les deux périodes de calage et validation, avec une amélioration évidente du PBIAS, ceci explique le comportement similaire du Tank Model avec quatre et deux réservoirs pour la région de Bouchegouf.

• *Résultats Graphiques*



**Figure 3-12 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs en phase calibration**

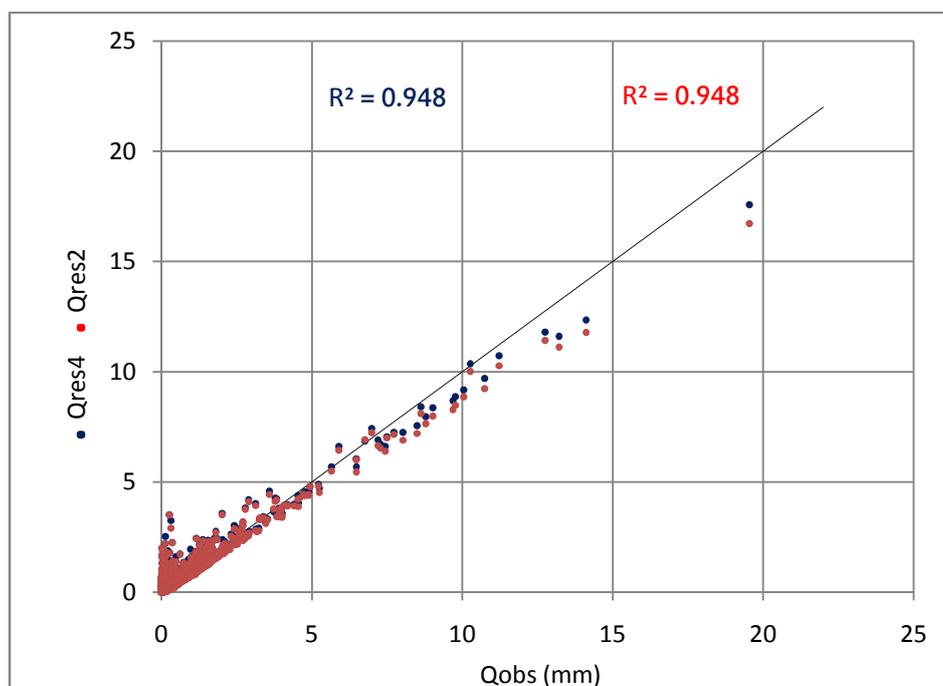


**Figure 3-13 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs en phase validation**

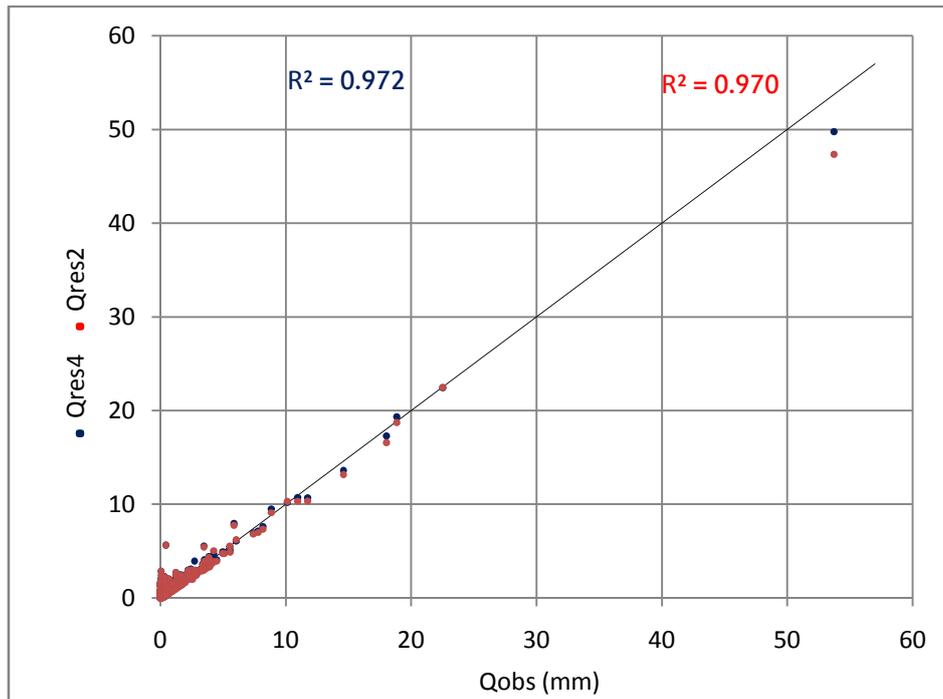
D'après ces figures, on remarque que l'évolution des débits confirme les résultats analytiques trouvés pour une ressemblance des quatre et deux réservoirs.

- **Représentation Débits observés- simulés**

Pour conforter les résultats obtenus précédemment et apprécier d'avantage l'écart entre les valeurs simulées et observées, on a comparé les débits simulés de la deuxième approche de quatre et deux réservoirs à ceux observés graphiquement pour les deux périodes calage et validation .



**Figure 3-14 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs de la deuxième approche en fonction des débits observés en phase calibration**



**Figure 3-15 : Comparaison entre les débits de quatre et deux réservoirs de la deuxième approche en fonction des débits observés en phase validation**

D’après ces figures, on remarque que la simulation par deux ou quatre réservoirs donne presque le même résultat, ainsi, en minimisant le nombre des réservoirs, le nombre des paramètres diminuent, ce qui implique une simulation plus rapide et surtout une calibration plus facile. Pour cela, l’utilisation de deux réservoirs seulement est conseillée dans la région de Bouchegouf, et peut être même dans le Nord d’Algérie. .

## 5. Conclusion

Dans ce travail, le Tank Model couplé au filtre de Kalman a été testé en utilisant deux approches : « mise à jour des paramètres, et des débits », celles-ci ont donné de très bons résultats avec quatre réservoirs. Une comparaison entre les deux approches a été effectuée, pour juger laquelle des deux, est la meilleure. Les résultats obtenus ont montré que, analytiquement, la première approche simule mieux, alors que graphiquement, la deuxième approche filtre les données d’une façon plus réelle, car elle s’appuie beaucoup plus sur les valeurs d’entrée, ce qui donne l’avantage à cette approche. Pour en conclure cette première partie, qu’il est difficile de juger entre les deux approches tant les résultats sont proches pour les données du bassin versant étudié, on suggère alors de tester cette comparaison sur différents bassins versants algériens pour connaître laquelle des deux est la meilleure, mais ce qui est sûr, c’est que les deux donnent de très bons résultats.

Enfin, la deuxième comparaison nous a permis de réduire le nombre de réservoirs à deux seulement en gardant la même performance des critères d’évaluation, et en minimisant le nombre des paramètres à cinq pour une calibration plus facile.

# CONCLUSION GENERALE

L'objectif essentiel de ce mémoire est d'évaluer les qualités des modèles développés, de les tester au climat 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 du couplage de Tank Model au filtre de Kalman ont été exploitées dans ce mémoire : la première approche est « mise à jour des paramètres », la deuxième est « mise à jour débits ». Ce couplage a été appliqué au sous bassin versant de Bouchegouf au Nord-Est de l'Algérie, au pas de temps journalier caractérisé par la complexité de ce processus.

Dans ce mémoire, nous avons comparé en premier lieu entre les deux approches par une calibration manuelle, celles-ci ont donné de très bons résultats avec quatre réservoirs, et ont montré aussi qu'analytiquement, la première approche simule mieux, par contre, graphiquement, la deuxième approche filtre les données d'une façon plus réelle, car elle s'appuie beaucoup plus sur les valeurs d'entrée, et ce qui donne d'avantage à cette approche. Enfin, on ne peut pas dire que cette approche soit la meilleure, il faut donc pour la valider, la tester et la comparer sur plusieurs bassins Algériens pour connaître la meilleure entre eux.

En deuxième lieu, nous avons comparé entre quatre et deux réservoirs en utilisant la deuxième approche, cette dernière nous a permis de réduire le nombre des réservoirs à deux seulement en gardant la même performance des critères d'évaluation, et en minimisant aussi le nombre de paramètres à cinq pour une calibration plus facile.

Ce travail est réalisé pour la première fois en Algérie a donné de très bons résultats, et nous encourage à donner plus d'importance à ce type de modélisation et les exploiter dans les années à venir.

# Bibliographie

Amireche, M., et al., Comparative assessment between GR model and tank model for rainfall-runoff analysis using Kalman filter - application to Algerian basins: Proceedings of the international conference on advances in sustainable Construction, Materials & Civil engineering systems (ASCMCES-17), Sharjah, UAE, 2017

Amisigo, B. A. & van de Giesen, N. C. (2005) Using a spatio-temporal dynamic state-space model with the EM algorithm to patch gaps in daily riverflow series, with examples from the Volta Basin, West Africa. *Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss.* 2, 449–481.

Aubert, D., Loumagne, C. et Oudin, L. (2003). Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 280, 145-161.

Bàlint, G. (2002) State-of-the-art for flood forecasting modelling. In: *HarmoniQuA—State-of the-art Report on QA Guidelines* 7, 1–11. Flood Forecasting Modelling Water Resour. Res. Centre, VITUKI, Hungary.

Benkaci, A, T., Modélisation Pluie-Débit Mensuelle ET Journalière Par Les Modèles Conceptuels Et Les Systèmes Neuro-Flous (Application Aux Bassins Algériens) : Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. - Alger : Institut National Agronomique, 2006.

Beven, K. et Freer, J. (2001). A dynamic TOPMODEL. *Hydrological Processes*, 15(10), 1993–2011.

Beven, K. J. et Binley, A. M. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279–298.

Blöschl, G. (2006), Hydrologic synthesis: Across processes, places, and scales, *Water Resour. Res.*, 42, W03S02.

Blöschl, G.: Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments, *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley & Sons, in press, 2005.

Boudevillain, B. (2003) Contribution à la définition des caractéristiques d'un radar hydrologique urbain. Préviation de la pluie à très courte échéance. Thèse Doctorat, Blaise Pascal (UFR de Recherche Scientifique et Technique), Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales, Paris, France.

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. et Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis : forecasting and control*. John Wiley & Sons, Inc. (5e édition), Hoboken, New Jersey, 712 p.

Brun E., David, P., Sudul, M. et Brunot, G. (1992). A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 38(128), 13-22.

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) : Mémoire du diplôme de magister : Université Badji Mokhtar-Annaba, 2007.

Charbonneau, R., Fortin, J.-P. et Morin, G. (1977). The Cequeau Model: description and examples of its use in problems related to water resource management / le modèle Cequeau: description et exemples d'utilisation dans le cadre de problèmes reliés à l'aménagement. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(1), 193–202.

Duan, Q., Sorooshian, S. et Gupta, V.K. (1992) Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 24, 1015-1031.

Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, 99(C5), 10143.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. et Villeneuve, J.-P. (2001). Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. I: Description of Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), 91–99.

Georgakakos, K. P. & Smith, G. F. (1990) On improved operational hydrologic forecasting, Results from a WMO realtime forecasting experiment. *J. Hydrol.* 114, 17–45.

Georgakakos, K. P. (1986a) A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: Part 1, Formulation. *Water Resour. Res.* 22(13), 2083–2095.

Georgakakos, K. P. (1986b) A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: Part 2, Case studies. *Water Resour. Res.* 22(13), 2096–2106.

Gupta, H., Sorooshian, S., et Yapo, P. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4( 2), 135–143.

Hartnack, J. & Madsen, H. (2001) Data assimilation in river flow modelling. In: *Proc. Fourth DHI Software Conf.*, (6–8 June 2001, Scanticon Conf. Centre, Helsingør, Denmark).

Hingray, B., Picouet, C. et Musy, A. (2009a). Processus et modélisation hydrologique en milieu alpin. In *Hydrologie : Tome 2, Une science pour l'ingénieur*, page 70. PPUR presses polytechniques.

Husain, T. (1985) Kalman filter estimation model in flood forecasting. *Adv. Water Resour.* 7(2), 15–21.

Izerroukyene, A. Modélisation De La Relation Pluie-Débit par le Tank Model, couplé au filtre de Kalman. Application au bassin versant de Bouchegouf (Wilaya de Guelma) : Projet de fin d'études pour l'ingénieur en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2017.

Julier, S. J. et Uhlmann, J. K. (1997) New extension of the Kalman filter to nonlinear systems. Dans *SPIE proceedings*, 3068, 182–193.

Kalman, R., New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems - Transactions of the ASME : Journal of Basic Engineering Vol. 82, 1960. - pp. 35-45.

Kitanidis, P. K. & Bras, R. L. (1980a) Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model; 1. Analysis of uncertainty. *Water Resour. Res.* 16(6), 1025–1033.

Kitanidis, P. K. & Bras, R. L. (1980b) Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model; 2. Applications and results. *Water Resour. Res.* 16(6), 1034–1044.

Lee, Y. H. & Singh, V. P. (1998) Application of Kalman filter to Nash model. *Hydrol. Processes* 12(5), 755–768.

Liu, J., Doan, C. D., et Liang, S., Conceptual Rainfall-Runoff Model With Kalman Filter For Parameter And Outflow Updating - World Scientific Publishing Company. - Singapore : Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore, 2010.

Liu, Y., Weerts, A. H., Clark, M., Hendricks Franssen, H.-J., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D.-J., Schwanenberg, D., Smith, P., van Dijk, A. I. J. M., van Velzen, N., He, M., Lee, H., Noh, S. J., Rakovec, O. et Restrepo, P. (2012). Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3863–3887.

Louamri, A., Le bassin versant de la Seybouse (Algérie orientale): Hydrologie et Aménagement des eaux : Thèse de Doctorat : UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1, 2013.

Miller, R. N., Ghil, M. et Gauthiez, F. (1994). Advanced data assimilation in strongly nonlinear dynamical systems. *Journal of the atmospheric sciences*, 51(8), 1037-1056.

Moradkhani, H. et Sorooshian, S. (2008). General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. Dans Sorooshian, S., Hsu, K.-L., Coppola, E., Tomasetti, B., Verdecchia, M. et Visconti, G., *Hydrological Modelling and the Water Cycle – Coupling the Atmospheric and Hydrological Models*, Springer, Berlin, Allemagne, 1-24.

- Moradkhani, H., Sorooshian, S., Gupta, H. V. & Houser, P. R. (2005) Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. *Adv. Water Resour.* 28, 135–147
- Moriasi, D. N., et al., model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. - usa : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. - 0001–2351.
- 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 Algérie) : Mémoire de Magister : Université Badji Mokhtar-Annaba, 2009.
- Moulahoum, A. W., Etude de Performance de deux Algorithmes d'Optimisation Globale : Le Shuffled Complex Evolution (SCE) et l'Algorithme Génétique fGAI : Master en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- Nash, J. E. et Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Nelder, J.A. et Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4), 308-313.
- Ouachani, R., Bargaoui, Z., et Ouarda, T. Intégration d'un filtre de Kalman dans le modèle hydrologique HBV pour la prévision des débits - *Hydrological Sciences Journal*. - 2007. - 318-337.
- Parajka, J., Merz, R., and Blöschl, G.: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 157-171, 2005.
- Peel M. et al (2000). Late payment and credit management in the small firm sector: some empirical evidence. *International Small Business Journal*, 18, 2.
- Post, D. A. & Jakeman, A. J. (1996) Relationships between physical attributes and hydrologic response characteristics in small Australian mountain ash catchments. *Hydrol. Processes* 10, 877-892.
- Puente, C. E. & Bras, R. L. (1987) Application of nonlinear filtering in the real time forecasting of river flows. *Water Resour. Res.* 23(4), 675–682.
- Quesney, A., François, C. H., Otle, C., Le Hegarat, S., Loumagne, C. & Normand, M. (2000) Sequential assimilation, of SAR/ERS data in a lumped rainfall–runoff model with an extended Kalman filter., 495–496. IAHS Publ. 267. IAHS Press, Wallingford, UK.

- Rango, A. et Martinec, J. (1995). Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. *Journal of the American Water Resources Association*, 31, 657-669.
- Rasmussen, J., A. M. Pejtersen, and L. P. Goodstein (1994). *Cognitive Systems Engineering*. New York: Wiley.
- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., Seo, D.-J. et Participants du DMIP (2004). Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, 298(1), 27–60.
- Rojas-Serna, C., 2005. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), ENGREF (Paris), France, 319 pp.
- Schreider, S. Y., Young, P. C. & Jakeman, A. J. (2001) An application of the Kalman filtering technique for streamflow forecasting in the upper Murray Basin. *Math. Comput. Modell.* 33, 733–743.
- Singh, V. P., et Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270–292.
- Singh, V. P., et Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270–292.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karam-biri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J. J., Mendiola, E. M., O'Connell, P. E., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., and Zehe, E.: IAHS decade on prediction in ungauged basins (PUB), 2003–2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences, *J. Hydrolog. Sci.*, 48(6), 857–880, 2003.
- Smith, M. B., Koren, V., Zhang, Z., Zhang, Y., Reed, S. M., Cui, Z., Moreda, F., Cosgrove, B. A., Mizukami, N. et Anderson, E. A. (2012). Results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. *Journal of Hydrology*, 418–419, 17–48.
- Stedinger, J.R. and Cohn, T., 1986. The value of historical and paleoflood information in flood frequency analysis. *Water Resour. Res.*, 22(5): 785–793.
- Sun, C., Walker, J. P., et Houser, P. R. (2004). A methodology for snow data assimilation in a land surface model. *Journal of geophysical research*, 109(D8).
- Sugawara, M. Automatic calibration of the tank model. - Tokyo 157, Japan : Hydrological Sciences Bulletin, 2009. - 0303-6936.
- Sugawara, M. Tank Model - Tokyo : Hydrological Sciences Bulletin, 1979.

- Tarboton, D. G. et Luce, C. H. (1996). Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB), Computer model technical description and users guide. Utah Water Research Laboratory and USDA Forest Service Intermountain Research Station, 64 p.
- Tolson, B. A. et Shoemaker, C. a. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43, 1–16.
- Troch, A., Paniconi C. & McLaughlin D. B. (2003) Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. *Adv. Water Resour.* 26, 131–135.
- USACE (1965). Snow hydrology; summary report of the snow investigations. Portland, Or. : North Pacific Division, Corps of Engineers, U.S. Army. Portland, Or., États-Unis, 437 p.
- Vrugt, J. A., ter Braak, C. J. F., Diks, C. G. H., Robinson, B. A. et Hyman, J. M. (2009). Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 10, 273-290.
- Wan, E. A. et van der Merwe, R. (2000). The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. Dans *IEEE Proceedings of Symposium on Adaptive Systems for Signal Processing, Communication and Control*, 153-158. Lake Louise, Alberta, Canada.
- Wood, E. & O'Connell, P. E. (1985) Real-time forecasting. In: *Hydrological Forecasting* (ed. by M. G. Anderson & T. P. Burt), 505–558. Wiley & Sons, Inc., New York, USA
- Wood, E. F. & Szollosi-Nagy, A. (1978) An adaptive algorithm for analyzing short-term structural and parameter changes in hydrologic prediction models. *Water Resour. Res.* 14(4), 577–581.
- Yang, Z.-L. (2008) Description of recent snow models. Dans Armstrong, R.L. et Brun, E., *Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, p. 129-136.
- 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) : Projet de fin d'études pour l'ingénieur en Hydraulique. - Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2012.
- Zhang, Y. and Chiew, F.H.S. (2009). Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments - *Water Resources Research* 45.