

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

Prévision des inondations sur les bassins versants Algériens. Application sur le bassin versant d'Oued Ressoul

Mohamed Tahar FORTAS

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

Codirigé par **Dr. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu le 06/10/2020

Composition du Jury :

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

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique

Prévision des inondations sur les bassins versants Algériens. Application sur le bassin versant d'Oued Ressoul

Mohamed Tahar FORTAS

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

Codirigé par **Dr. Mohamed AMIRECHE**

Présenté et soutenu le 06/10/2020

Composition du Jury :

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

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Aux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie : mon père et ma mère pour leur Patience, Leurs encouragements et leur soutien inconditionnel, A ma grande mère, décédée il y a peu et qui serait contente d'apprendre que son fils a enfin terminé le travail qu'il avait commencé.

A mes très chères frères et sœurs.

A tous amis proches et mes amis de l'Ecole Préparatoire en Sciences Et Techniques d'Annaba, et de l'Ecole Nationale Polytechnique Alger.

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

الملخص

تهدف هذه المذكرة إلى إجراء دراسة مقارنة بين نموذجين مفاهيمي للتنبؤ بالفيضانات ، نموذج GR3H و Tank Model ، من أجل تحديد أي منهما قادر على شرح سلوك مستجمعات المياه بشكل صحيح. ثم قمنا بربط مرشح كالمان القياسي ، لتحديث معالم نموذج الخزان. يستخدم هذا المرشح المشهور في العديد من المجالات ، وبشكل أكثر تحديدًا في الهيدرولوجيا ، نظرًا لأنه من السهل جدًا تكيفه مع النماذج المفاهيمية الخطية. لقد اخترنا كمنطقة دراسة ، مستجمع مياه وادي الرسول ، وهو جزء من حوض سيبوس ، لدينا لهذا الحوض ثلاثة أحداث فيضان ، لاختبار استجابته للنماذج المختلفة التي تم تطويرها ، ويمكننا ذلك تقديم تقرير مقارنة واضح للغاية. أخيرًا ، سوف ندرس تأثير الخطوة الزمنية للدراسة على جودة نموذج التنبؤ.

الكلمات المفتاحية : نموذجين مفاهيميين, التنبؤ, مرشح كالمان, التكيف, التحديث.

Abstract

The present work aims to conduct a comparative study between two conceptual flood forecasting models, the GR3H model and the reservoir model, in order to determine which of them is able to correctly explain the behavior of watersheds. Next, we attached a standard Kalman filter, to update the parameters of the tank model. This filter is used in many fields, and more particularly in hydrology, because it is very easy to adapt to linear conceptual models. We have chosen as study area, the Apostle Valley watershed, which is part of the Seybouse basin, for this basin we have three floods, to test its response to the different models that have been developed, and we can provide a report of very clear comparison. Finally, we will examine the effect of the time step of the study on the quality of the prediction model.

Key words: Conceptual models, forecasting, Kalman filter, adaptation, update.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif une étude comparative entre deux modèles conceptuels pour la prévision des crues, le modèle GR3H et le Tank Model, afin de déterminer lequel des deux, est capable de bien expliquer le comportement du bassin versant. Nous avons ensuite couplé le Filtre de Kalman standard, pour la mise à jour des paramètres du Tank Model. Ce filtre très connu, est utilisé dans plusieurs domaines, et plus particulièrement en hydrologie, vu que son adaptation est très facile pour les modèles conceptuels linéaires. Nous avons choisi comme zone d'étude, le bassin versant d'Oued Ressoul, qui fait partie du bassin du Seybouse, on dispose pour ce bassin de trois évènements de crues, pour tester sa réponse aux différents modèles développés, et qu'on puisse faire un bilan de comparaison très clair. Enfin, nous allons étudier l'influence du pas de temps d'étude sur la qualité de la prévision du modèle.

Mots clés : Modèles conceptuels, prévision, Filtre de Kalman, adaptation, mise à jour.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DE NOTATION

INTRODUCTION GENERALE14

Chapitre I État de l'art

I-1 Les inondations.....	18
I-1-1 Introduction.....	18
I-1-2 Catastrophes naturelles : 'les inondations sont la plus grande menace'.....	18
I-1-3 Les inondations en Algérie.....	20
I-2 La modélisation en hydrologie.....	23
I-2-1 Objet de l'hydrologie.....	23
I-2-2 Qu'est-ce que la modélisation hydrologique.....	24
I-2-3 Outils de la modélisation : Modèles hydrologiques.....	24
I-2-4 Principe de la construction d'un modèle.....	25
I-2-5 Paramétrisation des modèles.....	25
I-2-6 Classification des modèles.....	32
I-2-7 Etat de l'art des modèles Pluie-Débit.....	34
I-2-8 Applications des modèles hydrologiques.....	36
I-2-9 Applications des modèles hydrologiques au pas de temps horaire.....	37
I-2-10 La prévision des crues.....	37
I-3 Conclusion.....	40

Chapitre II Les Modèles conceptuels et le filtre de Kalman

II-1 Introduction.....	42
II-2 Généralités sur les modèles GR.....	42
II-2-1 Les différents pas de temps.....	43
II-2-2 Architecture des modèles GR4J et GR3H.....	45
II-3 Tank Model.....	52
II-3-1 Introduction.....	52
II-3-2 Tank Model simple.....	52
II-4 Filtre de Kalman.....	58
II-4-1 Introduction.....	58
II-4-2 Algorithme du filtre de Kalman.....	58
II-4-3 Couplage du Tank Model au filtre de Kalman.....	60
II-5 Conclusion.....	62

chapitre III présentation de la zone d'étude

III-1 Introduction	64
III-2 Données du site	66
III-2-1 Topographie et relief.....	66
III-2-2 Retenues collinaires	67
III-2-3 Géologie du site	67
III-2-4 Couvert végétal.....	68
III-3 Facteurs hydroclimatologiques	68
III-4 Caractéristique du relief du bassin versant	69
III-5 Données utilisées	70
III-5-1 Données hydrométriques	70
III-5-2 Données pluviométriques	71
III-6 Conclusion	73

chapitre IV résultats et discussions

IV-1 Introduction	75
IV-2 Application du modèle GR3H pour les évènements 1 et 2	75
• Evaluation statistique	76
• Evaluation des paramètres des crues	76
• Evaluation graphique.....	77
• Q-Q Plot :	78
IV-3 Application du Tank Model simple pour les évènements 1 et 2	79
• Evaluation statistique	80
• Evaluation des paramètres des crues	80
• Evaluation graphique.....	81
• Q-Q Plot :	82
IV-4 Application du Tank Model couplé au Filtre de Kalman pour les évènements 1 et 2 ..	84
• Evaluation statistique	84
• Evaluation des paramètres de crues.....	85
• Evaluation graphique.....	85
• Evènement 1	85
• Q-Q Plot :	86
• Evènement 2.....	88
• Q-Q Plot :	89
IV-5 Application du modèle GR3H pour l'évènement 3	90
• Evaluation statistique	90
• Evaluation des paramètres de crues.....	91
• Evaluation graphique.....	91

IV-6 Application du Tank Model simple pour l'évènement 3	94
• Evaluation statistique	94
• Evaluation des paramètres de crues.....	94
• Evaluation graphique.....	95
IV-7 Application du Tank Model simple couplé au Filtre de Kalman pour l'évènement 3	97
• Evaluation statistique	98
• Evaluation des paramètres de crues.....	98
• Evaluation graphique.....	99
IV-8 Comparaison entre différents horizons de prévision avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman pour l'évènement 3	101
• Evaluation statistique :	101
• Evaluation des paramètres des crues	102
• Evaluation graphique.....	103
IV-9 Conclusion	108
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	110
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Principales Inondations dans le monde

Tableau I-2 : les inondations en Algérie classifiées selon le lieu, la date et les dégâts

Tableau I-3 : Intervalles d'appréciation des critères d'évaluation

Tableau I-4 : Critères de classification des modèles hydrologiques globaux

Tableau II-1 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Tableau III-1 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du B.V.

Tableau III-2 : caractéristique de la station Ain Berda

Tableau III-3: Les caractéristiques des événements retenus pour l'étude

Tableau IV-1 : Taux de remplissages pour chaque phase

Tableau IV-2 : Résultats des critères du calage (1) et validation (2) avec le modèle GR3H

Tableau IV-3 : Résultats des paramètres de crue du calage (1) et validation (2) avec le modèle GR3H

Tableau IV-4 : Résultats des critères pour événements 1 et 2 avec le Tank simple

Tableau IV-5 : Paramètres du modèle issus du calage du Tank simple

Tableau IV-6 : Résultats des paramètres de crue du calage (1) et validation (2) avec le Tank Model simple

Tableau IV-7 : Résultats des critères pour l'événement 1 et 2 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Tableau IV-8 : Résultats des paramètres des crues des événements 1 et 2 en simulation et prévision avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Tableau IV-9: Taux de remplissages pour chaque phase

Tableau IV-10 : Résultats des critères du calage (3-a) et validation (3-b) avec le modèle GR3H

Tableau IV-11 : Résultats des paramètres des crues du calage (3-a) et validation (3-b) avec le modèle GR3H

Tableau IV-12 : Résultats de l'événement trois avec le Tank simple

Tableau IV-13 : Paramètres du modèle issus du calage du Tank simple

Tableau IV-14 : Paramètres de crue du calage du Tank simple

Tableau IV-15 : Résultats des critères pour l'événement 3 avec le tank simple couplé au Filtre de Kalman

Tableau IV-16 : Résultats des critères pour l'événement 3 avec le tank simple couplé au Filtre de Kalman

Tableau IV-17 : Comparaison entre différents pas de simulation

Tableau IV-18 : Comparaison entre différents pas de prévision

Tableau IV-19 : Paramètres de crue en simulation et Comparaison entre différents pas de simulation

Tableau IV-20 : Paramètres de crue en simulation et Comparaison entre différents pas de prévision

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Fréquence par type de catastrophe

Figure II-1 : Schéma de la structure de la nouvelle version du modèle GR4J

Figure II-2 : Schéma de la structure du modèle GR3H.

Figure II-3 : Le Tank model simple

Figure II-4 : Schéma représentant les types d'écoulement dans le modèle à réservoirs

Figure II-5 : Différents cas du Tank Model

Figure II-6 : Le Tank Model pour l'étude des crues

Figure III-1 : la situation de la zone d'étude

Figure III-2 : Carte de réseau hydrographique

Figure III-3 : Profil en long de l'oued Ressoul et de ses affluents

Figure III-4 : Les différents bassins des retenues collinaires du bassin d'Oued Ressoul

Figure III-5 : la précipitation pour l'évènement 1

Figure III-6 : la précipitation pour l'évènement 2

Figure III-7 : la précipitation pour l'évènement 3

Figure IV-1 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 1 (calage) avec le modèle GR3H

Figure IV-2 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 2 (validation) avec le modèle GR3H

Figure IV-3 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 1 (calage) avec le modèle GR3H

Figure IV-4 : Débit simulé en fonction du débit mesuré pour l'évènement 2 (*validation*) avec le modèle GR3H

Figure IV-5 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 1 (calage) avec Tank Model simple

Figure IV-6 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 2 (validation) avec Tank Model simple

Figure IV-7 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 1 (calage) avec Tank Model simple

Figure IV-8 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 2 (validation) avec Tank Model simple

Figure IV-9 : Evolution des débits simulé, observé et prévu de l'évènement 1 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-10 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 1 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-11 : Débit prévu en fonction du débit observé pour l'évènement 1 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-12: Evolution des débits simulé, prévu et mesuré de l'évènement 2 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-13 : Débit simulé fonction du débit observé pour l'évènement 2 avec Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-14 : Débit prévu fonction du débit observé pour l'évènement 2 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-15 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 (calage) avec le modèle GR3H

Figure IV-16 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 (validation) avec le modèle GR3H

Figure IV-17 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 3 (calage) avec le modèle GR3H

Figure IV-18 : Débit simulé en fonction du débit mesuré pour l'évènement 2 (validation) avec le modèle GR3H

Figure IV-19 : Evolution des débits simulé et observé de l'évènement 3 (calage) avec Tank Model simple

Figure IV-20 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 3 (calage) avec Tank Model simple

Figure IV-21` : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 (validation) avec Tank Model simple

Figure IV-22 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 3 (validation) avec Tank model simple

Figure IV-23 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-24 : Débit simulé fonction du débit observé pour l'évènement 3 avec Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-25 : Débit prévu fonction du débit observé pour l'évènement 3 avec Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-26 : Evolution des débits simulé et observé de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps de (2h)

Figure IV-27 : Débit simulé en fonction du débit mesuré au pas de temps de (2h) de l'évènement 3 avec le Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-28 : Débit prévu en fonction du débit mesuré au pas de temps de (2h) de l'évènement 3 avec le Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-29 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps de (3h)

Figure IV-30 : Débit simulé en fonction du débit mesuré au pas de temps de (3h) de l'évènement 3 avec le Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-31 : Débit prévu en fonction du débit mesuré au pas de temps de (3h) de l'évènement 3 avec le Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-32 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps de (4h)

Figure IV-33 : Débit simulé en fonction du débit mesuré au pas de temps de (4h) de l'évènement 3 avec le Tank model couplé au Filtre de Kalman

Figure IV-34 : Débit prévu en fonction du débit mesuré au pas de temps de (4h) de l'évènement 3 avec le Tank model couplé au Filtre de Kalman

Liste de Notation

WMO: World Meteorological Organization

FAO: Food and Agriculture Organization

NSE: Nash Sutcliff Error

MAE: Mean Absolute Error

MSE: Mean Absolute Error

RMSE: Root Mean Square Error

RSR: RMSE-observations standard deviation ratio

PBIAS: Percent Bias

SIG : System International Géographique

CRED: Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Catastrophes

GR : Génie Rural

ETP : Evapotranspiration potentiel

INTRODUCTION GENERALE

Les crues constituent un risque naturel chronique aux conséquences potentiellement dévastatrices. Les événements météorologiques extrêmes ont renforcé l'impression selon laquelle les inondations deviennent plus extrêmes, plus étendues et plus fréquentes. Tandis que les risques et les coûts de ces catastrophes naturelles sont susceptibles de s'accroître en raison des bouleversements sociaux et environnementaux à l'échelle planétaire, un grand débat s'est instauré entre les différents types d'acteurs «sur les questions de responsabilité et d'obligation, ainsi que sur les mesures appropriées à prendre pour atténuer les pertes et porter secours aux victimes». De telles perspectives ont permis de mettre davantage l'accent sur la nécessité d'améliorer le fonctionnement de la prévision des crues et d'optimiser les systèmes de gestion des risques liés aux inondations.

L'augmentation exponentielle de l'impact des inondations a procuré une meilleure visibilité aux mécanismes de prévision et d'annonce des crues. Les mesures structurelles majeures pour la gestion des crues ont laissé la place à une approche plus intégrée, dont la prévision et l'annonce des crues font partie intégrante. (WMO 1974)

La prévision des crues consiste à estimer en temps réel le niveau d'eau, le débit, le temps d'apparition et la durée d'une crue, en particulier la valeur de la pointe de crue pour un site spécifique, qui résulte des pluies et/ou des chutes de neige.

Le développement récent des techniques des télécommunications, des ordinateurs et de la modélisation hydrologique a bien enrichi la prévision hydrologique. De ce point de vue, la prévision de crue d'aujourd'hui est non seulement une technique particulière en hydrologie, mais aussi une activité profitant des derniers développements technologiques. La modélisation hydrologique et la mise au point des méthodes de prévision composent le noyau de n'importe quel système de prévision hydrologique. (Yang 1993)

Les modèles hydrologiques de prévision des crues peuvent être divisés en deux catégories, à savoir les modèles d'écoulement en rivière (modèles hydrauliques débit-débit, que nous ne

traiterons pas ici) et les modèles pluie-débit qui ont montré une grande applicabilité à la prévision des crues.

Le modèle pluie-débit nous semble être l'outil incontournable pour anticiper les conséquences hydrologiques des pluies que l'on observe. Toutefois, un tel modèle ne permet pas de résoudre complètement le problème: les modèles existants sont encore trop imprécis lorsqu'ils n'utilisent que des données de pluie : en contexte opérationnel, il est indispensable de disposer en temps réel d'informations limnimétriques en plus des informations pluviométriques, afin de « recalibrer » mathématiquement le modèle sur ces observations à l'instant de la prévision pour améliorer les prévisions. Cette façon raisonnée d'exploiter un modèle pluie-débit se traduit le plus souvent par ce qu'on appelle une méthode de mise à jour du modèle.

Bien que l'idée de la prévision adaptative ne soit pas nouvelle, l'utilisation de procédures (algorithmes) numériques pour élaborer des prévisions est un développement relativement récent. (Tangara 2005)

Nous nous intéressons ici à un outil permettant la prévision des crues en temps réel. Le filtrage de Kalman fait l'objet de la présente étude comme un outil très efficace pour anticiper les débits des crues. Notre étude sera restreinte à une évaluation rétrospective, sur des données historiques de pas de temps court (heure), de l'efficacité de modèles de prévision, réalisée à l'aide d'un modèle conceptuel global pluie-débit (Tank Model Simple qui sera par la suite couplé au Filtre de Kalman) au niveau du sous bassin versant d'Oued Ressoul situé à Annaba qui représente un petit affluent de rive gauche d'Oued Seybouse (Algérie orientale), en le comparant à un autre modèle conceptuel global (GR3H).

Après une **introduction générale**, consacrée à la thématique étudiée à savoir la modélisation Pluie-Débit et à la problématique traitée, ce mémoire de fin d'études a été scindé en quatre chapitres :

Un **premier chapitre** introductif, sur l'état de l'art des catastrophes inondations dans le monde et plus particulièrement en Algérie, sur la modélisation Pluie-Débit, avec ses différentes étapes pour construire un modèle, et enfin sur les prévisions des crues avec pas de temps courts.

Au **second chapitre**, nous avons présentés et détaillés, en premier, les structures des modèles qui seront utilisés dans cette étude, afin de simuler et de prévoir les débits de crues, et enfin le filtre de Kalman qui sera couplé au Tank Model, pour mettre à jour les paramètres de ce dernier.

La présentation du bassin versant étudié, ses caractéristiques et ses différents facteurs hydro climatologiques, ainsi que les données nécessaires pour effectuer une modélisation Pluie-Débit (simulation et prévision) au pas de temps courts, ont fait l'objet du **troisième chapitre**.

Dans **le dernier chapitre**, nous avons présenté les différents résultats obtenus et comparé les deux modèles développés, en mode simulation, et en mode de prévision afin de déterminer lequel des deux est plus susceptible d'exprimer le bon fonctionnement du bassin versant étudié.

Enfin, une **conclusion générale** résume, tout le travail réalisé lors de ce mémoire, et plus particulièrement, les résultats obtenus à partir des deux modèles élaborés avec une comparaison et des perspectives pour la suite à donner à ce mémoire de fin d'études.

CHAPITRE I ÉTAT DE L'ART

I-1 Les inondations

I-1-1 Introduction

Les inondations constituent un risque majeur sur le territoire national, mais également dans le monde entier. Au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde, elles font environ 20 000 victimes par an. Certaines résultent de phénomènes qui se renouvellent chaque année comme la mousson, d'autres sont le fait de circonstances particulières (cyclones, typhons, orages violents). (Memento du maire 2015)

Les inondations sont une cause importante des dommages causés aux personnes et aux biens. Actuellement, une forte demande sociale existe pour prévenir et prévoir ces catastrophes naturelles qui posent de graves problèmes humains et économiques.

Depuis près d'un demi-siècle, d'importantes ressources humaines et matérielles ont été consacrées à la recherche sur la protection contre le phénomène de crues. De nombreuses solutions de prévention sont mises en œuvre pour lutter contre les crues génératrices d'inondations : on cherche soit à empêcher les débordements localement au moyen de levées de terre ou digues, soit à stocker l'eau en amont des zones à protéger dans les lacs artificiels que constituent les barrages-réservoirs, soit enfin à favoriser le plus possible l'infiltration des eaux sur les versants en conservant ceux-ci sous un couvert de prairies ou de forêts. Cependant, pour les crues exceptionnelles ou quand les autres mesures se sont révélées impuissantes, il est important d'apprendre à anticiper les crues au moyen de systèmes de prévision.

Malgré tous les efforts d'aménagement, il apparaît bien aujourd'hui que pour les crues de grande période de retour, les inondations demeureront une fatalité. La seule chose à faire reste d'alerter avec le plus d'anticipation possible la population, afin de réduire les dégâts que causeront ces grandes inondations. (Tangara 2005)

Pour remédier à cette situation, l'amélioration de la prévision et de la prévention des inondations reste l'outil essentiel de l'État. Une meilleure information des populations exposées et la diminution de la vulnérabilité des biens situés dans les zones inondables sont à privilégier. Cependant, si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, chaque citoyen doit aussi contribuer à se protéger efficacement et diminuer sa propre vulnérabilité.

I-1-2 Catastrophes naturelles : 'les inondations sont la plus grande menace'

Le nombre des inondations augmente partout et entraînent beaucoup de pertes. C'est de loin la plus grande menace pour le monde, y compris l'Europe", explique Debarati Guha-Sapir,

CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART

directrice du Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes (CRED) et enseignante à l'Université de Louvain, à Bruxelles.

Elle dresse ce constat au regard des données recueillies depuis des décennies par le CRED. Dans les années 1990, 87 inondations avaient lieu en moyenne chaque année. Depuis les années 2000, le chiffre a presque doublé : 165 inondations sont comptabilisées en moyenne dans le monde tous les ans.

Par inondation, le CRED entend, comme pour les autres catastrophes naturelles, tout événement qui a soit causé plus de 10 morts, soit affecté plus de 100 personnes, soit qui a fait l'objet d'une déclaration d'état d'urgence ou de catastrophe naturelle, ou enfin pour lequel les autorités ont dû lancer un appel à l'aide internationale.

Parmi les catastrophes naturelles d'origine météorologique, hydrologique et climatologique, les inondations sont celles qui ont le plus augmenté, derrière les températures extrêmes qui présentent une hausse de 140%. (Euronews. 2018)

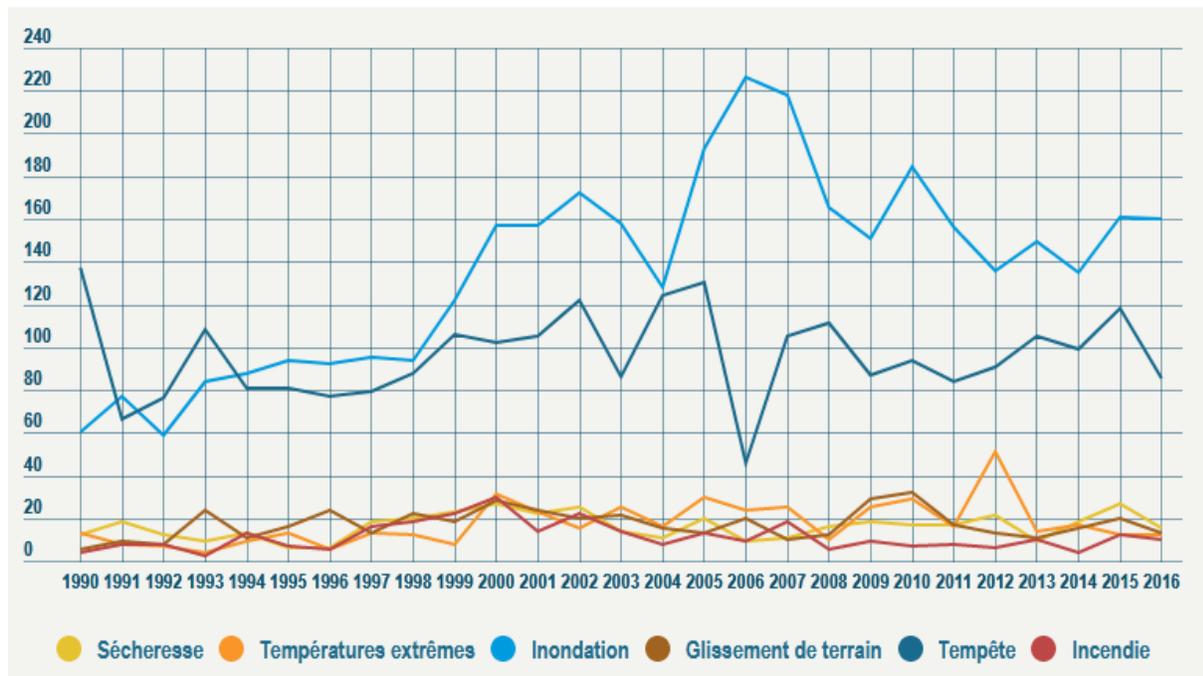


Figure I-1 : Fréquence par type de catastrophe (Euronews. 2018)

Tableau I-1: Principales Inondations dans le monde (Agriculture.)

<i>Principales inondations</i>		
Date	Lieu	Nombre approx. de décès
1421	Pays-Bas	100 000
1530	Pays-Bas	400 000
1642	Chine	300 000
1887	fleuve Jaune, Chine	900 000
1900	Texas, Etats-Unis	5 000
1911	Yang-Tsé Kiang, Chine	100 000
1931	Yang-Tsé Kiang, Chine	145 000
1935	Yang-Tsé Kiang, Chine	142 000
1938	fleuve Jaune, Chine	870 000
1949	Yang-Tsé Kiang, Chine	5700
1953	Pays-Bas	2 000
1954	Yang-Tsé Kiang, Chine	30 000
1960	Bangladesh	10 000
1963	Vajont, Italie	1800
1979	Morvi, Inde	15 000
1991	Bangladesh	139 000
1991	Philippines	6 000
1991	Huai, Chine	2900

Source: World Commission on Water for the 21st Century, Vision mondiale de l'eau, Making Water Everybody's Business, rapport provisoire de la Commission, version du 14 novembre 1999

I-1-3 Les inondations en Algérie

L'Algérie est confrontée aux phénomènes des crues et des inondations qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social, ces inondations sont les catastrophes naturelles les plus destructives et même les plus fréquentes; seuls les séismes atteignent des bilans de dégâts humains et matériels aussi lourds. (DJEBALI 2015)

CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART

Plusieurs régions, de part leur topographie sont menacées par ces catastrophes hydrologiques aussi bien au Nord qu'au Sud (Touaibia 2015). Les inondations attribuables aux crues d'Oueds et aux tempêtes de pluies se produisent dans toutes les régions du pays.

Tableau I-2 : Inondations en Algérie classées selon le lieu, la date et les dégâts (DJEBALI 2015)

Lieu	Date	Bilan des dégâts
Mostaganem	Novembre 1927	3000 morts, échelle de gravité : 5
Chlef	06/10/1966	63 Décès
Ouled Sidi Ali (Mascara)	01/01/1969	10 décès
Biskra	01/09/1969	28 décès
Batna	09/10/1969	28 décès
Azazga (Tizi Ouzou)	12/10/1971	40 décès, des centaines d'habitations détruites
Tizi Ouzou	28-31/03/1974	52 décès dans la wilaya, 18000 sinistrés, dégâts estimés à 27 millions de DA
Alger	01/01/1980	11 Décès
El-Eulma (Sétif)	01/09/1980	44 décès.
Sougueur (Tiaret)	24/09/1980	15 décès.
Annaba (centre-ville)	11/11/1982	26 décès, 9500 sinistrés, dégâts matériels importants
Birine (Djelfa)	22/08/1983	10 décès.
Ain Témouchent	01/01/1984	33 décès.
Skikda	30/01-4/02/1984	174 maisons démolies, 500 familles sinistrées, terrains agricoles fortement endommagés,

CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART

Lieu	Date	Bilan des dégâts
Jijel	29/12/1984	29 décès, 11000 sinistrés
Skikda	28-30/12/1984	11 décès, immersion de 400 hectares, dégâts évalués alors à 50 millions DA
Bordj El Amir Khaled (Ain Defla)	01/01/1986	13 Décès.
Sidi Bel Abbes	04/10/1986	1 décès, 200 familles sans abris
Ain Azel (Sétif)	06/02/1990	19 décès.
Oued Rhiou	20/10/1993	22 décès, 14 blessés
Bordj Bou Arreridj	23/09/1994	16 décès, dégâts (10 millions DA)
Laghouat	28/10/1995	40 décès
Annaba	23-30/04/1996	5 décès.
Adrar	14/01/1999	12 décès.
Tedjna (Chlef)	11/10/2001	15 décès.
Alger (Babel Oued)	09-11/11/2001	Plus de 800 décès, 115 disparus, des milliers de blessés, dégâts (30 milliards de DA)
Reggane (Tamanrasset)	09/08/2003	13 décès.
Skikda	17-11-2004	plus de 100 familles sans abris, 219 familles sinistrées, établissements scolaires fermés (3 lycées, 6 collèges d'enseignement moyen et 4 écoles fondamentales)
Sud (régions d'Illizi, Adrar et Tamanrasset)	06-09/03/2005	3 décès, 09 disparus et 70 évacués par hélicoptère, routes, agriculture et infrastructures endommagées, plusieurs villages inondés.

Lieu	Date	Bilan des dégâts
Tindouf	09-11/02/2006	50 à 60% d'infrastructures détruites aux camps des réfugiés sahraouis (12200 familles sans abris)
M'sila région	19/04/2007	13 décès.
Béchar	18 /10/ 2007	2 morts emportés par les eaux,
Ghardaïa	01 /10/ 2008	Plus de 50 décès et 50 blessés, maisons effondrées sur leurs habitants, des dizaines de véhicules emportés par les eaux, arbres arrachés, poteaux électriques ensevelis, dégâts aux surfaces agricoles et au cheptel ovin, plus de 1000 maisons inondées dont 600 endommagées.
Béchar	10 /10/ 2008	8 morts, dégâts matériels importants, la plus grande inondation depuis 1959.
El Bayadh	01/10/2011	11 décès.

I-2 La modélisation en hydrologie

I-2-1 Objet de l'hydrologie

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

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

(Tangara 2005)

I-2-2 Qu'est-ce que la modélisation hydrologique

La modélisation dans le domaine de la recherche, consiste en la construction du modèle et la définition des règles théoriques le régissant.

Elle représente la traduction de l'information climatique en informations sur les écoulements de surface pour des fins diverses: prévisions des crues et des étiages, protection contre les inondations, stock possible, outil d'aide à la décision pour la gestion de la ressource, extrapolation des séries de données (comblement de lacune, extension des séries, estimation des paramètres hydrologiques), dimensionnement des ouvrages hydrauliques. (Ytoui 2012)

I-2-3 Outils de la modélisation : Modèles hydrologiques

Parce qu'une très grande complexité caractérise les processus impliqués dans le cycle de l'eau, les hydrologues conviennent aujourd'hui de leurs connaissances partielles. En effet, la représentation de tout ou partie de ce cycle (démarche de modélisation), à des fins variées, se heurte à la difficulté d'appréhension, de description ou de compréhension des phénomènes et des systèmes étudiés. Par conséquent, les représentations de ces systèmes, c'est-à-dire, les modèles, sont nécessairement simplificatrices, réductrices de la complexité naturelle, et donc grossièrement inexactes. Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la moins inexacte possible. (Perrin 2000)

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments:

- ✓ L'objectif pour lequel le modèle a été développé,
- ✓ Le système observé, sa discrétisation spatiale et temporelle,
- ✓ Le choix d'une formulation de la réalité.

I-2-4 Principe de la construction d'un modèle

La construction du modèle consiste à effectuer la schématisation de l'hydrosystème et à formuler le problème mathématique et numérique lié à sa discrétisation spatiale et aux concepts retenus pour la représentation du milieu et des processus pris en compte. Cette construction s'accompagne nécessairement du développement d'un programme informatique, permettant de résoudre les problèmes mathématiques et numériques associés. La construction du modèle et le développement du code correspondant se basent souvent sur un système de modélisation existant. Dans ce cas les concepts de la modélisation de même que les outils numériques nécessaires à la résolution du problème mathématique sont réutilisés. (BOUDAUD and GHEBRIOUA 2017)

I-2-5 Paramétrisation des modèles

I-2-5-1 Calage des modèles

Le calage consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle Pluie-Débit de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible. Ce jeu de paramètres doit être adéquat offrant la meilleure reconstitution des sorties en particulier les débits. Pour cela, on procède à une confrontation des débits simulés et observés par calage manuel, qui consiste à modifier les paramètres jusqu'à obtenir la meilleure adéquation entre les valeurs simulées et observées sur la période d'étude (période d'apprentissage). On utilise deux méthodes de calage pour obtenir le meilleur jeu de paramètres qui permet d'ajuster au mieux le modèle aux valeurs observées : le calage manuel et le calage automatique. (Amireche 2018)

I-2-5-1-1 Calage manuel

C'est l'utilisateur du modèle qui cherche par tâtonnement la valeur optimale des paramètres qu'il va utiliser pour faire tourner le modèle, qui est atteinte lorsque l'erreur est minimisée entre les données simulées et observées. Cette pratique nous permet de comprendre le fonctionnement du modèle et l'effet de chaque paramètre sur le comportement du modèle. Or cette opération longue et fastidieuse, est fondée sur l'expertise de l'opérateur, et basée généralement sur le diagnostic visuel des hydrogrammes des débits observés et calculés ainsi que sur l'appréciation de certains indices de performance du modèle. (Amireche 2018)

I-2-5-1-2 Calage automatique

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

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

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

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

Ces inconvénients, nécessitent que la calibration automatique soit toujours accompagnée par une appréciation manuelle de l'opérateur du modèle. (Amireche 2018)

I-2-5-2 Validation des modèles

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

changements à analyser afin de s'assurer que les écarts entre résultats obtenus et observés sont raisonnables. (Amireche 2018)

I-2-5-3 Evaluation des Modèles

Afin de juger de la pertinence des modèles, plusieurs critères ont été développés afin de comparer entre la chronique réelle des débits et celle simulée par le modèle, mais le choix du meilleur critère à utiliser suivant le cas d'étude reste toujours un choix très critique. Une étude critique des critères d'évaluation des modèles a été menée dans le but de, déterminer les techniques d'évaluation des modèles, évaluer les erreurs des modèles, et établir une démarche d'évaluation des modèles. (MOULAHOU M 2016)

I-2-5-3-1 Evaluation Graphique

L'évaluation graphique donne un premier aperçu sur la tendance de la variable simulée par rapport à celle observée (jugement visuel). Elle permet de détecter certaines anomalies mal décelées par les critères numériques classiques, et indique si l'évolution de la variable simulée suit l'évolution de la variable observée. Autrement dit, elle montre si le modèle reproduit bien les événements et d'apprécier ses qualités. (MOULAHOU M 2016)

I-2-5-3-2 Evaluer la précision des points particuliers de la prévision

Notons qu'avec les critères précédents on ne peut juger de la méthode de prévision que d'une façon globale. Certaines valeurs particulières de la prévision sont extrêmement importantes pour le jugement de la qualité des méthodes de prévision, par exemple, l'erreur sur la pointe de crue, l'erreur sur le temps d'apparition de la pointe de crue et le volume de crue. On les a considérés dans ce travail de vérification avec les critères suivants :

$$PE = \frac{QX_p}{QX_m} - 1$$

$$VE = \frac{V_p}{V_m} - 1$$

Où : PE représente l'erreur sur la pointe de crue prévue QX_p relativement à la pointe de crue mesurée QX_m . VE est l'erreur du volume prévu V_p relativement au volume mesuré V_m . Pour le temps d'apparition de la pointe de crue, on a envisagé simplement la

différence, TE, entre le temps d'apparition prévu pour la pointe de crue, TX_p, et celui mesuré, TX_m. (Yang 1993)

$$TE = TX_p - TX_m$$

I-2-5-3-3 Evaluation statistique

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

Les critères globaux d'appréciation des performances des modèles de simulation des débits diffèrent sur trois points essentiels: la forme analytique de l'erreur (quadratique, absolue, cumulée...), la forme de la variable cible (transformée ou non) et le choix d'un modèle de référence (pour avoir une mesure relative). (Amireche 2018)

❖ Les régressions standards

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

• Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination R² est défini comme étant le carré du coefficient de corrélation, d'après Bravais-Pearson :

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

Le R² estime la dispersion (distribution) entre les valeurs simulées et observées, en déterminant la proportion avec laquelle la dispersion estimée explique la dispersion observée. Il varie de 0 (pas de corrélation) à 1 (la distribution de la prédiction est égale à celle de l'observation). L'inconvénient majeur du R² est qu'il ne quantifie que la dispersion des variables, et de là, si le modèle sous-estime ou surestime la prédiction, on aura toujours un R² proche de 1 même si les valeurs simulées sont fausses. Pour faire face à cet inconvénient lors de la validation, on introduit la pente (b) et la composante (a) de l'intersection de la droite de régression avec l'axe des y (y=b.x+a).

Pour une bonne simulation, (a) devrait être proche de « 0 », ce qui veut dire qu'un Q_{obs} de «0» donnera un Q_{sim} très proche de « 0 », et (b) devrait être proche de « 1 ». Si b < 1, le modèle sous-estime la prédiction, et la surestime dans le cas contraire. La combinaison du r² et de b, nous donne le « r² pondéré », qui prend en compte la sous/surestimation de la prédiction :

$$\omega r^2 = \begin{cases} |b|r^2 & \text{pour } b \leq 1 \\ |b|^{-1} & \text{pour } b > 1 \end{cases}$$

Le coefficient de détermination pondéré accorde ainsi plus de poids aux forts débits. (Ytoui 2012)

❖ Les critères adimensionnels

Fournissent un modèle d'évaluation où les indices d'erreur quantifient l'écart dans les unités de données traitées.

• Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE

Proposé par Nash et Sutcliffe en 1970, ce critère évalue le pouvoir prédictif des modèles hydrologiques. Il est défini comme étant « un » moins la somme des carrés des erreurs normalisées par la variance des valeurs observées durant la période d'étude :

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

Le NSE varie entre "-∞" et "1". Un NSE de "1", indique une correspondance parfaite entre les valeurs observées et prédites. Les valeurs comprises entre 0,0 et 1,0 sont généralement considérées comme des niveaux de performance acceptables, tandis que des valeurs inférieures à 0,0 indiquent que la valeur moyenne observée est meilleure que la valeur simulée, soit une performance inacceptable.

L'inconvénient du coefficient « NSE » est qu'il introduit le carré des erreurs. Par conséquent, les grandes erreurs dans la série temporelle influencent fortement la variation de ce critère, tandis que les faibles erreurs sont négligées.

Ceci conduit à la surestimation de la performance du modèle lors des pics et sa sous-estimation lors des étiages. Le NSE accorde plus de poids aux débits moyens.

Et tout comme le R², le NSE ne peut pas être utilisé, si le modèle sous-estime ou surestime les données observées. C'est la raison pour laquelle, le critère PBIAS, une mesure de la sous-estimation ou de la surestimation, est utilisé conjointement avec le NSE. (Amireche 2018)

- **Index of agreement (Indice de Concordance)**

Développé par Willmot (1981), en tant que mesure normalisée du degré d'erreur de prédiction du modèle et varie entre 0 et 1. Une valeur calculée de 1 indique un accord parfait entre valeurs mesurées et prédites, et 0 n'indique aucun accord. Cet indice représente le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et l'erreur potentielle. L'auteur a défini l'erreur potentielle comme étant la somme des valeurs absolues au carré des distances des valeurs prédites à la valeur moyenne observée et des distances des valeurs observées à la valeur moyenne observée :

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_s - Q_{o.moy}| + |Q_o - Q_{o.moy}|)^2}$$

L'inconvénient de ce critère est qu'il est trop sensible aux valeurs extrêmes en raison des différences au carré de l'erreur quadratique (Legates et McCabe, 1999). Des valeurs élevées de D ont été signalées même pour des ajustements de modèle médiocres. (Amireche 2018)

- ❖ **Critère du bilan**

Il correspond au rapport des volumes annuels simulés et observés. Une formulation variant sur le même intervalle que le critère de Nash $(]-\infty; 1[)$ a été utilisée:

$$B = 1 - \left| \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_s}{\sum_{i=1}^n Q_o}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_o}{\sum_{i=1}^n Q_s}} \right|$$

Ce critère a été développé lors d'une étude comparative des modèles journaliers. (Amireche 2018)

- ❖ **Les indices d'erreurs**

- **MAE, MSE, RMSE**

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

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

Une version standardisée du RMSE (RSR) est recommandée et est présentée par la suite. (Ytoui 2012)

- **Percent Bias (PBIAS)**

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

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

Ce critère est recommandé pour sa capacité d'indiquer la performance du modèle. La variation du PBIAS est plus importante durant les périodes sèches que durant les périodes humides. (Gupta et al. 1999)

- **RMSE-observations standard déviation ratio (RSR)**

Moriasi et al. (2007) ont également recommandé l'utilisation du rapport de l'erreur quadratique moyenne à l'écart type des données observées (RSR), calculé comme suit:

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

Le RSR incorpore les avantages d'un indice d'erreur statistique et d'un facteur de normalisation pour qu'il soit applicable aux différentes variables, en accordant le même poids à tous les débits. Il varie de la valeur optimale « 0 » qui indique une variation résiduelle nulle et donc un modèle de simulation parfait, à des valeurs positives très grandes.

Le RSR et le NSE sont liés et donnent en pratique des classements de performances similaires. (Amireche 2018)

I-2-5-3-4 Intervalles d'efficacité des modèles

En se basant sur les recommandations des études passées, la combinaison de l'évaluation graphique avec l'évaluation statistique, les indices d'erreurs et les critères adimensionnels plus précisément, devrait être utilisée pour l'évaluation des modèles hydrologiques. (Moriasi et al. 2015)

Les critères jugés les plus performants sont : le NSE, PBIAS, et RSR. Moriasi et al. (2007) ont fourni des cotes de performance pour ces critères dans le contexte de la modélisation du ruissellement de surface. En général, un modèle de simulation des débits liquides est jugé « satisfaisant » si :

$$NSE \geq 50$$

$$RSR \leq 0.7$$

$$|PBIAS| < 15 \%$$

Tableau I-3 : Intervalles d'appréciation des critères d'évaluation (Moriasi, Gitau, Pai and Daggupati 2015)

Taux de performance	R ² (%)	RSR	NSE (%)	PBIAS (%)
Très bon	R ² > 85	0.0 ≤ RSR ≤ 0.5	75 < NSE ≤ 100	PBIAS ≤ 5
Bon	75 < R ² ≤ 85	0.5 << RSR ≤ 0.6	65 < NSE ≤ 75	5 ≤ PBIAS < 10
Satisfaisant	60 < R ² ≤ 75	0.6 << RSR ≤ 0.7	50 < NSE ≤ 65	10 ≤ PBIAS < 15
Insatisfaisant	R ² ≤ 60	RSR > 0.7	NSE ≤ 50	PBIAS ≥ 15

I-2-6 Classification des modèles

Beaucoup de classifications des modèles ont été proposées. La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles.

Clarke (1973) et Ambroise (1998) ont proposé quelques clés de différenciation des modèles :

- ✓ déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables, des paramètres et/ou des relations entre eux,

- ✓ globaux, semi-distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles,
- ✓ cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause,
- ✓ empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé. (Perrin 2000)

Un exemple de classification c'est celle de l'approche mathématique, ils peuvent être déterministes ou stochastiques.

Les modèles déterministes

Ils s'appuient sur la description du bassin versant et prennent en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol,...). Les modèles déterministes ont pour application la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages hydrauliques ou pour la prévision des crues, la délimitation des zones inondables, la gestion du territoire, la quantification des impacts potentiels des changements climatiques. (Fouchier 2010)

Les modèles stochastiques

Un modèle est dit stochastique si certaines des grandeurs impliquées (c'est-à-dire variables d'entrées, paramètres et erreurs) sont des variables aléatoires éventuellement auto-corrélées. La formulation d'un modèle stochastique se fait généralement sous la forme état-espace, c'est-à-dire avec une équation d'évolution du système et une équation de mesure, toutes les deux comprenant un terme d'erreur connu en distribution. (Makhlouf 1994)

MATHEVET (2005) a mentionné deux autres classifications importantes ; le mode de fonctionnement et le pas de temps de simulation.

Tableau I-4 Critères de classification des modèles hydrologiques globaux (Mathevet 2005)

Critère de classification	Type de modèle
Fenêtre temporelle de simulation	Evènementiel Continu
Pas de temps	Horaire, Journalier, Mensuel, Annuel, pluriannuel

Un modèle événementiel a pour objet la simulation d'un événement borné dans le temps. On modélise par exemple de manière événementielle une crue sur la durée de l'événement pluvieux l'ayant générée, augmentée du temps de concentration. Une telle modélisation requiert la détermination des conditions initiales (débit de base au début de la simulation, humidité du sol) et néglige certains processus hydrologiques considérés comme mineurs par rapport au processus principal étudié. Dans le cas d'une modélisation événementielle de crues au pas de temps horaire, l'évaporation et l'évapotranspiration sont par exemple négligées et les écoulements de sub-surface ne sont pas modélisés. Une modélisation événementielle présente donc l'avantage théorique de prendre en compte un nombre réduit de variables d'entrée, avantage contrebalancé par le besoin d'une initialisation qui fait souvent l'objet d'un calage alors qu'elle est le résultat de processus continus.

Une modélisation en continu s'intéresse à la simulation d'un phénomène sur une durée à priori illimitée dans laquelle la détermination des conditions initiales n'a pas d'incidence, une fois passée une phase d'apprentissage du modèle. Les processus à considérer sont plus nombreux que dans une modélisation événementielle puisque l'évolution dans le temps des stocks d'eau sur le bassin doit être expliquée. Les phénomènes d'évaporation doivent par exemple être pris en compte pour pouvoir modéliser correctement les écoulements entre les épisodes de crue.

Le caractère événementiel ou continu de la modélisation se superpose à son caractère déterministe ou probabiliste. Ainsi le générateur stochastique de pluie horaire SHYPRE (acronyme de Simulation d'HYdrogramme pour la PREdétermination des crues) fonctionne en mode événementiel. (Fouchier 2010)

I-2-7 Etat de l'art des modèles Pluie-Débit

Dans la littérature il y a beaucoup de modèles, parmi ces modèles sont ceux cités par Perrin (2000).

On va citer dans cette mémoire les modèles les plus utilisés, et ceux qu'on va les entamer dans notre étude, et plus précisément pour le pas de temps horaire.

Les modèles GR

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le

lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. (Perrin et al. 2007 résumé). Ce sont des modèles conceptuels globaux, continue/événementiel avec des paramètres calibrés. (MOULAHOUIM 2016)

Le Tank model

Le Tank model est un modèle conceptuel développé par Sugawara au Japon en 1969, ce modèle est populaire au Japon, en Corée et dans d'autres pays d'Asie pour la prévision des inondations. Sugawara a développé deux types ; un pour des régions humides ; et un pour des régions arides et semi-arides. (BOUDAOUIM and GHEBRIOUA 2017)

Le TOPMODEL

TOPMODEL ou (TOPography-based hydrological MODEL) est un modèle que l'on peut qualifier de conceptuel. Développé à l'Université de Lancaster au Royaume-Uni, ce modèle a été construit sur le concept d'aires contributives variables à l'écoulement. Prenant explicitement en compte la topographie du bassin étudié, il utilise le fait que les sols des zones de plus faible pente (fond de vallée) ont une plus grande propension à atteindre un état de saturation que les zones de forte pente, et donc à générer des écoulements rapides lors d'événements pluvieux. (Perrin 2000)

Le modèle SWAT

Le Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a été développé par Jeff Arnold pour l'USDA Agriculture research service en 1993 pour répondre à cette demande. C'est un modèle conceptuel physique semi-empirique distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques.

Le couplage avec le SIG permet de gérer des données de type raster, vecteur et Alphanumériques. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. (RADJAH 2017)

Le modèle HBV

Le modèle hydrologique universel HBV (Lindström, 1997) est un modèle conceptuel global à l'échelle du bassin versant qui est capable de calculer le débit pour divers forçages et mécanismes. Ce modèle est connu pour sa robustesse, malgré sa simplicité relative. Pour simplifier d'avantage le modèle, certaines composantes peuvent être rendues inactives.

Ce modèle simule le débit horaire en utilisant comme entrées la température et la précipitation horaires, ainsi que les estimations mensuelles de l'évapotranspiration potentielle. Il prend en compte les caractéristiques topographiques comme la superficie et l'altitude pour la discrétisation spatiale du domaine d'étude en zones homogènes. (Ouachani et al. 2007)

I-2-8 Applications des modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont un des outils dont disposent les hydrologues pour essayer de comprendre, de simuler et de prévoir le fonctionnement d'un bassin versant. En fonction du pas de temps choisi, les modèles globaux permettent de répondre à différentes questions s'intéressant à la gestion des risques hydrologiques et des ressources en eau.

En se limitant aux applications quantitatives des modèles hydrologiques, leurs domaines d'applications sont vastes et concernent aussi bien la recherche que l'ingénierie. Ils sont notamment utilisés pour :

- ✓ **La reconstitution ou la simulation** : le but du modèle est le comblement des lacunes contenues dans une série chronologique de débit ou l'extension de séries de débit ;
- ✓ **La prévision** : le but du modèle est essentiellement l'anticipation des évolutions futures du débit d'une rivière, ce qui permet dans un contexte opérationnel, une meilleure gestion des ressources en eau en période d'étiage et l'anticipation des risques d'inondations en période de crue ;
- ✓ **Prédétermination des débits de crue ou d'étiage**: on désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée. On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau; (Mathevet 2005)
- ✓ **Influence d'aménagements sur l'hydrologie**: on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux. (Perrin 2000)

Dans un contexte opérationnel, les modèles hydrologiques sont utilisés pour répondre à deux problématiques principales : l'évaluation des risques hydrologiques et la gestion de la ressource en eau. La pertinence des réponses apportées par ces modèles à l'une des deux problématiques est

intimement liée à la structure du modèle et à la philosophie de développement qui a conduit à sa structure. Ainsi, lors de l'utilisation d'un modèle hydrologique dans un cas concret, il est impératif de connaître le domaine d'application et les hypothèses conditionnant l'utilisation d'un modèle en particulier. (Mathevet 2005)

I-2-9 Applications des modèles hydrologiques au pas de temps horaire

Dans le contexte actuel d'augmentation de la disponibilité des données à pas de temps fin et de l'augmentation du besoin de prévisions hydrologiques, le passage au pas de temps horaire devient un atout considérable. En effet, pour un bon nombre de bassins versants aux temps de réaction rapides, l'utilisation du pas de temps horaire est indispensable pour réaliser des prévisions des crues ou des études de prédétermination, pertinentes par rapport à la réactivité des bassins versants. Pour ces bassins versants aux superficies inférieures à quelques centaines de km², le pas de temps horaire s'impose.

En modélisation hydrologique, la littérature est prolixe au pas de temps journalier. Néanmoins, on trouve de plus en plus d'applications au pas de temps horaire. Notamment, une grande partie des applications de TOPMODEL a été faite à pas de temps fin et/ou sur des événements de crue (entre autres, Franchini et Pacciani [1991], Franchini et al. [1996], Saulnier [1996], Datin [1998], Zin [2002]). L'étude de Franchini et Pacciani [1991] est la seule comparaison de différentes structures de modèles Pluie-Débit conceptuels, testés au pas de temps horaire. Ces auteurs ont testés sept modèles, malheureusement sur un seul bassin versant pour lesquels ils disposaient d'une chronique horaire de quelques mois. Néanmoins, ces auteurs ne se sont pas posé la question de la particularité du pas de temps, par rapport à la modélisation Pluie-Débit. Schreider et Jakeman [2001] présentent l'application du modèle IHACRES au pas de temps de 4 heures, sur une dizaine de bassins versants Australiens. Quelques applications du modèle HBV ont également été faites à ce pas de temps [Kobold et Brilly, 2004]. (Mathevet 2005)

I-2-10 La prévision des crues

I-2-10-1 Simulation ou prévision

Simulation et prévision sont deux types de la modélisation. La simulation est une représentation du fonctionnement d'un système, utilisant des données d'entrée jusqu'à l'instant de simulation pour estimer la sortie du système au même instant. La prévision est différente car elle utilise les données d'entrées jusqu'à l'instant de prévision pour estimer la sortie à l'horizon de prévision, un

ou plusieurs pas de temps plus tard. La simulation reproduit le phénomène physique étudié tandis que la prévision propose en plus une anticipation. (Darras 2016)

La prévision des crues consiste à estimer en temps réel le niveau futur du débit, le temps d'apparition et la durée d'une crue, en particulier la valeur de la pointe de crue pour un site spécifique, qui résulte des pluies et/ou des fontes de neige. Elle comporte trois aspects : les valeurs prévues, les objectifs de la prévision et les délais de prévision

Elle est très orientée aujourd'hui vers la prévention des crues catastrophiques et consiste à estimer a priori les valeurs futures des débits en temps réel. Elle constitue un moyen direct pour réduire les dommages humains et matériels causés par les inondations. L'alerte devant une crue imminente permet d'évacuer la population, le cheptel et l'équipement en minimisant les pertes. Selon leur délai, les prévisions sont classées en prévision à court terme (moins de 48 heures), prévision à moyen terme (entre 2 et 10 jours) et prévision à long terme (plus de 10 jours). En outre, il existe aussi une prévision saisonnière. (Yang 1993)

En ce qui concerne la prévision des crues à court terme, les conditions nécessaires minimales qu'un modèle de prévision des crues doit satisfaire sont indiquées par O'Connell (1980) :

- le modèle doit être adaptatif dans le sens que le modèle doit pouvoir être ajusté lorsque des données nouvelles deviennent disponibles ;
- des mesures de la précision des prévisions doivent être fournies ;
- les modèles doivent être efficaces en temps de calcul (économique pour la recherche).

Un système de prévision des crues repose sur deux éléments principaux.

- Les moyens nécessaires pour collecter des mesures concernant l'évolution du milieu naturel. C'est en général un réseau de télémesure d'indicateurs tels que les hauteurs de précipitations et les niveaux d'eau en rivière.
- Les moyens nécessaires pour exploiter ces informations et fournir, au fur et à mesure du déroulement de la crue, des estimations de l'évolution à venir des niveaux et des débits.

Les prévisionnistes chargés de cette tâche recourent généralement à ces modèles hydrologiques particuliers, appelés modèles de prévision en temps réel. Actuellement, la méthode de prévision des crues n'existe donc pas toute seule et elle constitue une partie importante d'un système de prévision des crues. (Yang 1993)

En général, les modèles hydrologiques, utilisés pour la prévision des crues, sont conçus comme des modèles de simulation auxquels sont appliqués des prévisions de pluie. Leur fonctionnement nécessite donc des données d'entrées prévues. Sur les bassins méditerranéens, les prévisions de pluie sont nécessaires à des échelles de temps et d'espace très faibles (i.e. quelques heures et

quelques dizaines de km²). Ces prévisions de pluie n'étant pas, à ce jour, disponibles, différentes hypothèses sur la pluie à venir sont utilisées : (Darras 2016)

- **La pluie future nulle** : ce scénario donne le débit minimal futur du bassin,
- **La pluie future constante** : égale à la valeur actuelle ; si la prévision est faite pour la valeur de pluie maximale, ce scénario donne le débit maximum,
- **La pluie future dite parfaite** : correspondant à la pluie mesurée lors d'un évènement passé qui est rejoué. D'une part, notons que ce scénario de pluie n'est pas parfait puisqu'il s'agit d'une pluie mesurée (i.e. avec toutes les limites soulignées précédemment), d'autre part, ce scénario est intéressant car il permet, si les "pluies parfaites" sont de bonne qualité, de faire la part de l'erreur due à l'imprécision sur les pluies et celle due au modèle hydrologique.

I-2-10-2 Comment réaliser des prévisions avec des modèles Pluie-Débit?

Dès lors que l'on souhaite utiliser un modèle Pluie-Débit en mode prévision, se pose la question de la mise à jour de ses paramètres et/ou de ses états internes. L'objet de la mise à jour est de réduire au maximum les erreurs de simulation dans le ou les derniers pas de temps, en effectuant une véritable assimilation des débits observés au cours du ou des derniers pas de temps. (Tangara 2005)

Deux approches sont possibles pour la mise à jour:

- la première (la plus classique) consiste à partir d'un modèle dont les paramètres ont été optimisés en mode simulation, et à effectuer la mise à jour indépendamment de la calibration du modèle. Nous appellerons cette approche **mise à jour séquentielle** ;
- la seconde, fait de la procédure de mise à jour, une partie intégrante du modèle hydrologique, ce qui fait que lors de la phase d'optimisation, l'erreur du modèle (que l'on cherchera à minimiser) sera une erreur de prévision et non pas de simulation. Nous appellerons cette approche **mise à jour directe** ;

La différence entre les deux approches peut paraître subtile, mais elle est très importante : par exemple, avec la première approche, les paramètres optimisés du modèle seront les mêmes quel que soit l'horizon de prévision (1, 2, 3, ..., 7 jours), alors qu'avec la deuxième approche, le jeu de paramètres dépendra de l'horizon de prévision retenu. (Tangara 2005)

I-3 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté l'état de l'art des catastrophes inondations dans le monde entier et plus précisément le cas de notre pays l'Algérie.

Nous avons ensuite mis l'accent sur le contexte général pour faire une modélisation Pluie-Débit, en respectant les différentes étapes pour construire un modèle, et les buts principaux de la modélisation hydrologique avec des spécifications des notions et des besoins qu'on a trouvé importantes pour la démarche de notre étude.

Sachant que celle-ci est basée sur les prévisions des crues avec pas de temps courts (horaire), nous allons essayer de trouver les meilleurs modèles pour la région étudiée.

Dans le chapitre suivant, les modèles qui vont être utilisés dans ce projet seront présentés en détail.

CHAPITRE II LES MODELES CONCEPTUELS ET LE FILTRE DE KALMAN

II-1 Introduction

Dans le premier chapitre, on a parlé brièvement des modèles GR et Tank Model, dans ce chapitre nous allons retracer leurs développements.

Le modèle GR dans toutes les versions, est un modèle qui permet de simuler les débits à l'exutoire du bassin versant à partir des données pluies et d'évapotranspiration moyenne. Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel, journalier et aussi horaire.

Le Tank Model proposé pour la première fois par Sugawara (1979) comme un modèle conceptuel pour la simulation des débits à partir des pluies.

Le Filtre de Kalman est un algorithme récursif et de traitement de données optimal. Il permet de mettre à jour l'état du système avec la disponibilité des données observées. Dans ce travail on va coupler le Tank Model avec ce filtre.

II-2 Généralités sur les modèles GR

Les modèles GR (Génie Rural) ont été développés au Cemagref à partir de 1983 par Claude MICHEL. Ils font partie de la grande famille des modèles conceptuels globaux à réservoirs. Dérivés notamment du modèle CREC, leur conception se veut plus simple. Les différents modèles GR développés au Cemagref couvrent les pas de temps suivants: le pas de temps annuel (GR1A), le pas de temps mensuel (GR2M), le pas de temps journalier (GR3J ou GR4J, GR5J et GR6J) et le pas de temps horaire (GR3H, GR4H et GR5H). (Arnaud 1997)

La spécificité du pas de temps, bien que souvent négligée, est importante, une même structure de modèle n'étant pas également performante à tous les pas de temps. Globalement, les structures sont d'autant plus simples que le pas de temps est long.

Au cours de leur développement, les modèles GR ont tous été testés sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, particulièrement en France mais également aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil, au Mexique, en Algérie ou en Côte d'Ivoire. D'autres équipes de recherche, des bureaux d'études et des services opérationnels ont par la suite utilisé les modèles dans des conditions variées. (Perrin et al. 2007)

Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle, cette dernière pouvant être une courbe moyenne interannuelle (Oudin, 2004; Oudin et al., 2004; Oudin et al., 2005a; Oudin et al., 2005b) et des débits. Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de

surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse (Perrin et al., 2001). Les paramètres doivent être déterminés par calage, en minimisant l'erreur du modèle sur une série de débits observés. Lorsque des données de débit ne sont pas disponibles pour le calage, l'estimation des paramètres peut se faire par des formules régionales liant les valeurs des paramètres à des descripteurs physiques du bassin, par l'utilisation de modèles calés sur des bassins voisins, ou mieux encore par l'exploitation de quelques mesures ponctuelles en périodes de hautes eaux. Cependant, leur utilisation conduit souvent à des erreurs beaucoup plus fortes que lorsque l'on peut réaliser un véritable calage du modèle. (Perrin, Michel and Andréassian 2007)

II-2-1 Les différents pas de temps

II-2-1-1 Pas de temps annuel

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle Pluie-Débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation Pluie-Débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. (Perrin, Michel and Andréassian 2007)

Le modèle GR1A paraît bien plus simple que les modèles mensuel et journalier. La capacité maximale du réservoir « sol », A, est l'unique paramètre à caler. La fonction de production est semblable à celle du modèle mensuel. Quant à la fonction de transfert, l'hydrogramme unitaire disparaît et on assiste seulement à un écoulement pseudo-direct. Cependant, le modèle garde quand même une architecture classique par rapport au pas de temps journalier et mensuel : deux fonctions « mémoire », une au niveau de la production se traduisant par un réservoir sol et une autre au routage qui se traduit par un réservoir linéaire à paramètre fixe. (Mouelhi 2003)

II-2-1-2 Pas de temps mensuel

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle Pluie-Débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages. (Perrin, Michel and Andréassian 2007)

On peut trouver une présentation récente du modèle GR au pas de temps mensuel (GR2M) dans MAKHLOUF et MICHEL [1994]. Comme l'indique son nom. Ce modèle ne dépend que de deux paramètres (GR2M) à ajuster sur les données d'un bassin versant. La structure du modèle est basée sur deux réservoirs : un réservoir de production (dont la capacité est fixée) et un réservoir de transfert. Le réservoir de production permet de déterminer la partie de la pluie participant à l'écoulement. Ce réservoir est vidangé par l'intermédiaire de la prise en compte de l'ETP. La

partie de la pluie contribuant à l'écoulement est séparée en deux fractions. Une faible fraction (20%) est dirigée directement pour le calcul du débit à l'exutoire. et l'autre fraction (80%) transite vers le réservoir de transfert. (Arnaud 1997)

II-2-1-3 Pas de temps journalier

Initialement élaboré au pas de temps journalier et décrit par un seul paramètre (MICHEL [1983]), le modèle GR journalier a évolué progressivement pour arriver à un modèle à 4 paramètres (MAKHLOUF [1994], DE OLIVEIRA NASCIMENTO [1995]). En effet, après avoir testé un modèle à un réservoir et un paramètre, puis à deux réservoirs paramétrés avec le même paramètre, MICHEL a conclu qu'il était inévitable de prendre deux paramètres différents pour caler les deux réservoirs. Le modèle GR2J fut alors mis au point. Un réservoir gère la fonction de production et un autre la fonction de transfert, chaque réservoir étant caractérisé par un paramètre.

Trop simple pour être appliqué à une large gamme de superficies de bassins, un troisième paramètre fait son apparition dans le modèle GR3J (EDIJATNO et MICHEL [1989]). Ce paramètre permet d'intégrer des décalages entre les pluies nettes et leur contribution au débit à l'exutoire. Il caractérise deux hydrogrammes unitaires associés au transfert. On arrive ainsi à couvrir une gamme de bassins versants allant de quelques kilomètres carrés à quelques milliers de kilomètres carrés. L'application de ce modèle est cependant limitée aux bassins à écoulement pérenne, le modèle ayant des difficultés à modéliser les bassins intermittents.

Un quatrième paramètre est alors introduit (MAKHLOUF [1994], DE OLIVEIRA NASCIMENTO [1995]), pour tenir compte des échanges souterrains. Le modèle alors appelé GR4J, reprend les équations de GR3J avec l'introduction du quatrième paramètre, concernant des échanges avec l'environnement extérieur du bassin (perte ou gain) et s'appliquant au niveau de la fonction de transfert. (Arnaud 1997)

II-2-1-4 Pas de temps horaire

Le modèle GR3H est basé sur la même architecture que le modèle GR3J. Il peut fonctionner en continu (YANG, 1993) ou en événementiel, on s'intéresse au fonctionnement par événement du modèle GR3H, les données n'étant d'ailleurs pas suffisantes pour caler le modèle en continu. Dans ce cas, on ne tient pas compte du facteur ETP. En effet, au pas de temps horaire, on s'intéresse exclusivement à la période de crue durant laquelle on néglige l'effet de l'évapotranspiration face au volume précipité. Lorsque le modèle fonctionne en événementiel, chaque réservoir doit être initialisé au début des crues. (Arnaud 1997)

II-2-2 Architecture des modèles GR4J et GR3H

II-2-2-1 Modèle GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle Pluie-Débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation Pluie-Débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs...). (Perrin, Michel and Andréassian 2007)

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur de pluie et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP). P est une estimation de la pluie de bassin et E peut-être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle. (Perrin 2002)

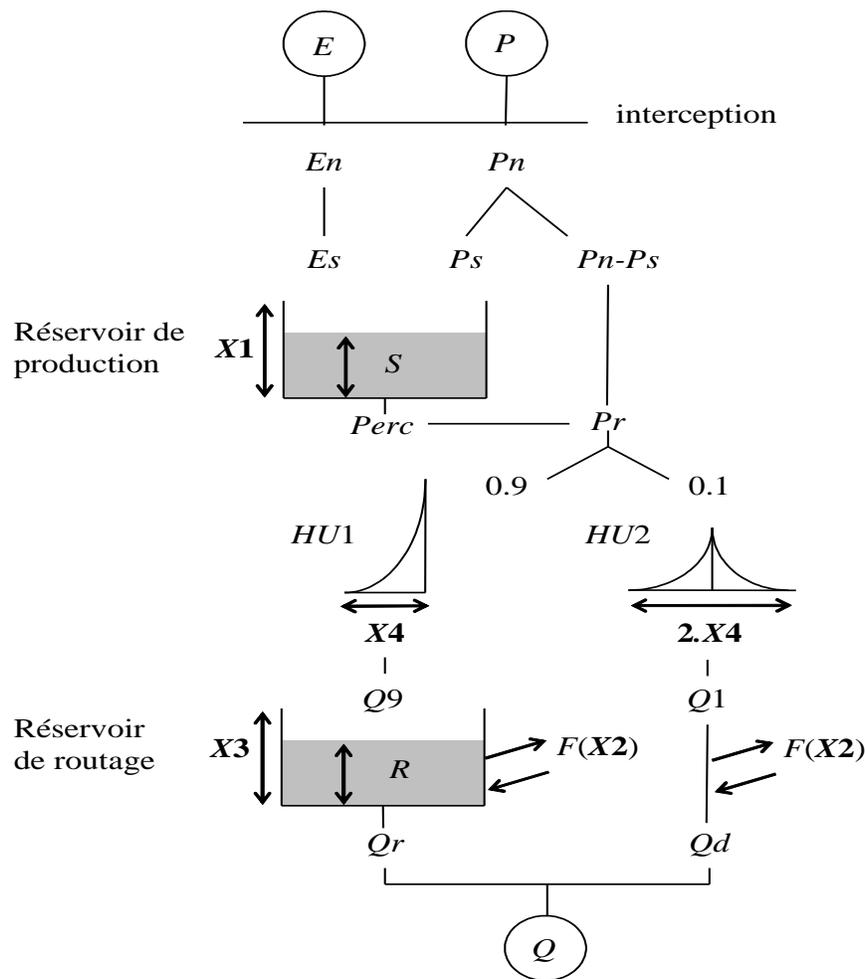


Figure II-1 : Schéma de la structure de la nouvelle version du modèle GR4J (Perrin 2002)

Le modèle GR4J a quatre paramètres optimisables:

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm)

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HUI (j)

II-2-2-2 Description mathématique du modèle

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

- **Neutralisation**

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

Si $P_k \geq E$, alors $P_n = P_k - E$ et $E_n = 0$ dans le cas horaire $E = 0$

Si $P_k < E$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_k$ cette condition est seulement pour le journalier

Dans le cas où P_n est différente de zéro, une partie P_s de P_n alimente le réservoir de production et est calculée par (Perrin, Michel and Andréassian 2007):

$$P_s = \frac{X1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X1} \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X1} \right)} \quad (II - 1)$$

Où $X1$ (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S_k le contenu du réservoir de production au début du jour k .

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

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E_n}{X1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E_n}{X1} \right)} \quad (II - 2)$$

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

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad (II - 3)$$

- **Percolation**

Une percolation Perc issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante (Perrin et al., 2007) :

$$Perc = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S'}{9 X1} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\} \quad (II - 4)$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad (II - 5)$$

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

$$Pr = Perc + (Pn - Ps) \quad (II - 6)$$

- **Hydrogrammes unitaires**

Pr est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X4, temps de base de HU1 exprimé en jours. Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement SH1 et SH2, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. SH1 est définie en fonction du temps par (Perrin, Michel and Andréassian 2007):

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \quad (II - 7)$$

$$\text{Pour } 0 < t < X4 \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (II - 8)$$

$$\text{Pour } t \geq X4, \quad SH1(t) = 1 \quad (II - 9)$$

SH2 est définie de façon similaire par:

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \quad (II - 10)$$

$$\text{Pour } 0 < t < X4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (II - 11)$$

$$\text{Pour } X4 \leq t \leq 2.X4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (II - 12)$$

$$\text{Pour } t \geq 2.X4, \quad SH2(t) = 1 \quad (II - 13)$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (II - 14)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad (II - 15)$$

Où j est un entier.

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

$$Q9(k) = 0.9 \sum_{j=1}^l UH1(j) \cdot Pr(k - j + 1) \quad (II - 16)$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^l UH2(j) \cdot Pr(k - j + 1) \quad (II - 17)$$

où $l = \text{int}(X4) + 1$ et $m = \text{int}(2.X4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X2 \cdot \left(\frac{R_k}{X3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (II - 18)$$

où R_k est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps, $X3$ la capacité à un jour du réservoir et $X2$ le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe. (Perrin, Michel and Andréassian 2007)

- **Réservoir de routage**

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

$$R' = \max(0 ; Rk + Q9(k) + F) \quad (II - 19)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par

$$Qr = R' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (II - 20)$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad (II - 21)$$

- **Ecoulement total**

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

$$Qd = \max(0 ; Q1(k) + F) \quad (II - 22)$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Qk = Qr + Qd \quad (II - 23)$$

- **Les paramètres :**

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

Tableau II-1 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants. (Perrin, Michel and Andréassian 2007)

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance de 80 %
X1 (mm)	350	100 à 1200
X2 (mm)	0	-5 à 3
X3 (mm)	90	20 à 300
X4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

II-2-2-3 Adaptation du modèle GR4J au modèle GR3H :

Le modèle Pluie-Débit GR3H (GR pour Génie Rural, 3 pour son nombre de paramètres, H pour Horaire) développé au Cemagref est de type conceptuel (Arnaud 1997). Dans ce projet de fin d'études, on va se baser sur la version adaptée du modèle GR4J.

Le modèle GR3H est utilisé lors des événements pluvieux et ignore l'ETP parce qu'il est simulé en mode événementiel, donc l'effet de l'ETP est négligeable.

Sa structure est adaptée de celle du GR4J, et considère que $X2 = 0$, et donc absence totale d'échange avec le milieu souterrain.

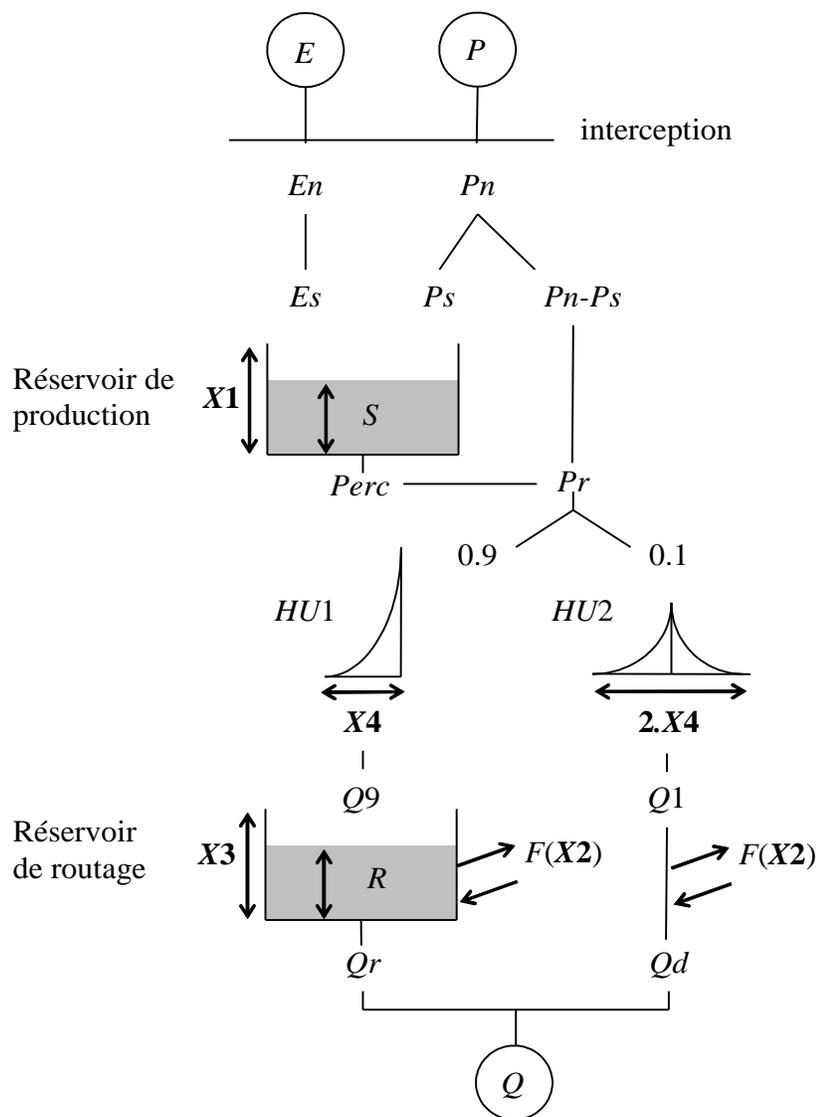


Figure II-2 : Schéma de la structure du modèle GR3H. (Perrin 2002)

CHAPITRE II LES MODELES CONCEPTUELS ET LE FILTRE DE KALMAN

La formulation de base pour le modèle GR3H est également la même que celle de GR4J sauf sur les points suivants (Perrin 2002) :

GR4J ajoute deux expressions d'échange :

- ✓ L'une dite percolation (PERC) du réservoir de production vers la pluie nette
- ✓ L'autre dite fonction d'échange souterraine (F) entre le réservoir de routage et la nappe profonde ("+"=apports, "-"=perte)

GR4J a des hydrogrammes unitaires différents de GR3H.

Les paramètres sont les mêmes avec $X_2 = 0$,

$A = X_1$: la capacité du réservoir de production,

$B = X_3$: la capacité du réservoir de routage,

$C = X_4$: le temps de base des hydrogrammes unitaires.

Le fonctionnement du bassin versant est le suivant (Fourmigué and Lavabre 2005):

- Une fonction de production à un paramètre A (niveau maximal du «réservoir-sol»). Cette fonction assure la transformation de la pluie brute P en pluie nette Pr. La différence Ps est stockée définitivement dans le réservoir A et ne participe pas à l'écoulement (en mode continu, un terme d'évapotranspiration permet sa vidange). Le niveau du réservoir est noté S ;
- Une fonction de transfert définie par deux paramètres: B (capacité maximale d'un réservoir de routage, dont le niveau est noté R) et C (temps de montée des hydrogrammes unitaires HU1 et HU2). Cette fonction de transfert assure la transformation de la pluie nette Pr en débit Q à l'exutoire, avec un retard (apporté par C) et un étalement dans le temps (assuré par le réservoir B, dont le rôle de stockage permet d'assurer la décrue).

Le fonctionnement du modèle GR3H en mode événementiel (i.e. discontinu dans le temps) nécessite l'initialisation, en début de crue, des niveaux des réservoirs A et B (Fourmigué and Lavabre 2005):

- pour B: le niveau RO est directement déduit de la valeur du débit initial QO;
- pour A: le niveau SO est un paramètre supplémentaire propre à chaque événement, théoriquement fonction des antécédents pluviométriques. On l'utilisera par la suite sous la forme d'un taux de remplissage noté SO/A G [0;1]. Il représente l'état hydrique du bassin avant la crue. Enfin, l'évapotranspiration est négligée en mode événementiel.

II-2-2-4 Calage du modèle GR3H

Le calage des paramètres consiste alors à déterminer, pour chaque crue, le jeu de paramètres A, B, C et So/A optimum, donnant la meilleure valeur au critère d'optimisation. (Arnaud 1997)

On a vu dans le chapitre I, qu'il y avait deux types de calage, l'automatique et le manuel, dans cette partie d'étude on va utiliser le calage automatique pour faciliter les calculs.

Et pour la méthode d'optimisation, on a choisi d'utiliser le solveur Excel pour caler le modèle, en mentionnant que cet outil fonctionne avec des méthodes d'optimisations locales pour trouver le jeu des paramètres optimum (A, B et C), cette méthode est nommée le GRG non linéaire.

II-3 Tank Model

II-3-1 Introduction

Le Tank Model est un modèle Pluie-Débit développé pour la première fois par Sugawara 1967 au Japon, en gardant bien sur les conditions climatiques pour cette région, et si on veut l'exploiter pour d'autres régions dans le monde, les caractéristiques des réservoirs vont être changées. Il est utilisé pour faire des simulations des écoulements dans le bassin versant étudié, des prévisions des crues rapides, etc.

II-3-2 Tank Model simple

Le Tank Model est très simple, composé de quatre réservoirs posés verticalement en série, comme le montre la figure (II-3).

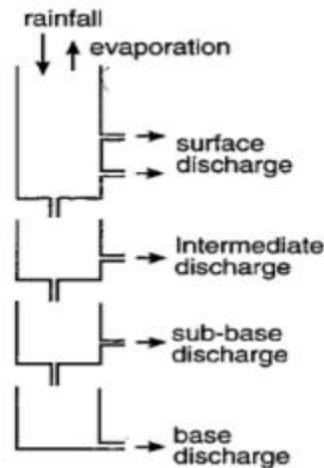


Figure II-3 : Le Tank Model simple (Sugawara 1979)

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

Les sorties latérales sont les débits calculés. La sortie du réservoir supérieur est considérée comme l'écoulement ou le débit de surface et sous surface (sub-surface), la sortie du deuxième réservoir en tant qu'écoulement intermédiaire, du troisième réservoir en tant que ruissellement sous basique (sub-base) et la sortie du quatrième réservoir en tant que écoulement de base (base flow), comme il est indiqué dans la Figure (II-4).

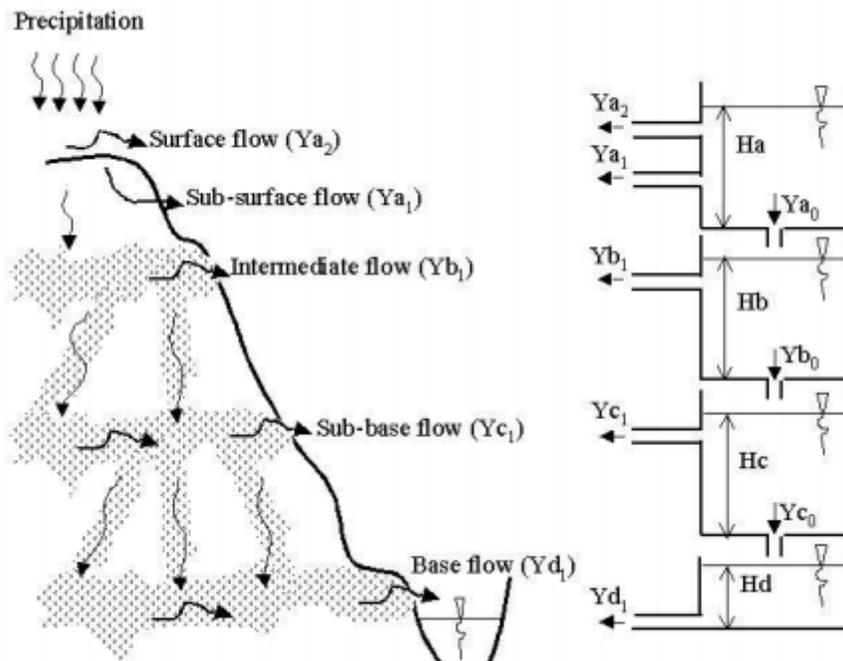


Figure II-4 : Schéma représentant les types d'écoulement dans le modèle à réservoirs (Setiawan et al. 2003)

Malgré ses simples perspectives, le comportement du Tank Model n'est pas tellement simple. S'il n'y a pas de précipitations pour une longue durée, le premier et le deuxième réservoir seront vides et le Tank Model ressemblera à la Figure (II-5a) ou (II-5b). En dessous de ces conditions, le débit est stable. Dans le cas de la Figure (II-5a) la décharge diminuera très lentement, et dans le cas de la Figure (II-5b) la décharge sera presque constante.

S'il y a une pluie relativement forte de courte durée sous ces conditions, le Tank Model prendra la forme de l'un des cas représentés sur les Figures (II-5c) et (II-5d). Dans ces cas, une décharge élevée de courte durée se produira avant que le modèle revienne à l'état stable comme précédemment. Dans ces cas, la plupart des décharges sont l'écoulement de surface du réservoir supérieur et il y a peu ou pas de ruissellement du deuxième réservoir.

Si les fortes précipitations se produisent sur une période plus longue, à ce moment-là, le Tank Model sera représenté par la Figure (II-5e). Lorsque la pluie s'arrête, l'eau du réservoir supérieur se déplace rapidement et le Tank Model prendra la forme de la Figure (II-5f). Ensuite, le débit de sortie du deuxième réservoir diminuera lentement, formant la typique pente descendante de l'hydrogramme suivant une grande décharge. (Sugawara 1979)

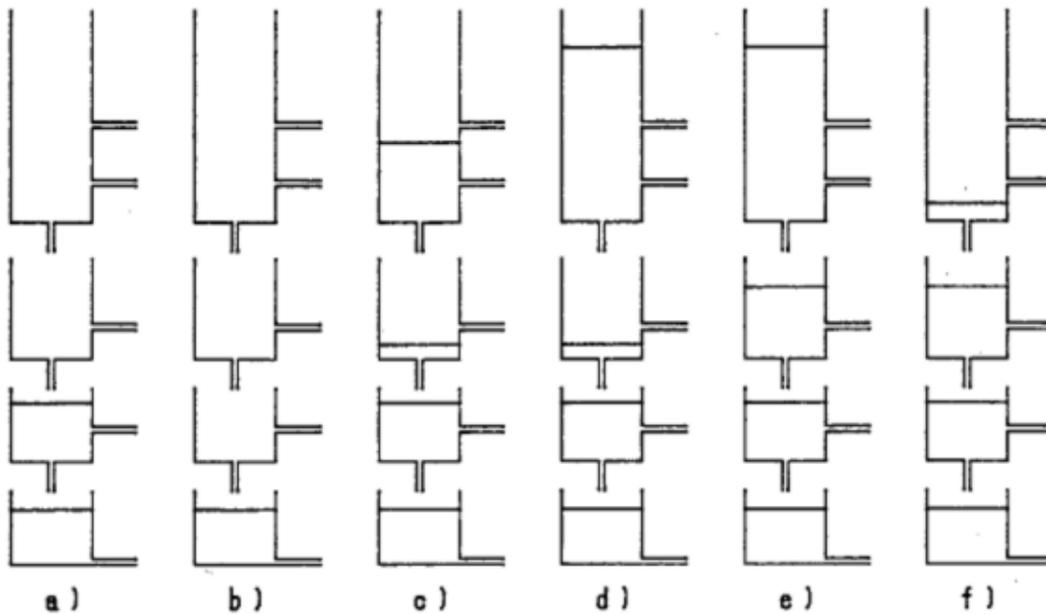


Figure II-5 : Différents cas du Tank Model (Sugawara 1979)

Pour l'analyse des crues, le Tank Model indiqué à la Figure (II-6) est appliqué, où les entrées sont habituellement des précipitations horaires et les sorties sont des décharges horaires.

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

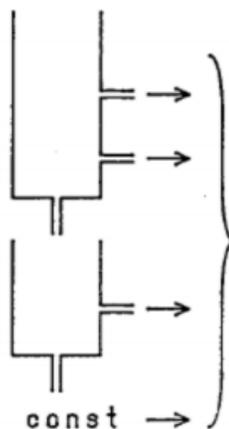


Figure II-6 : Le Tank Model pour l'étude des crues (Sugawara 1979)

II-3-2-1 Données nécessaires pour le calage

- Les données des précipitations horaires dans le bassin versant (mm/h).
- Les données des débits horaires en (mm/h).

Pour l'évapotranspiration on peut la négliger du fait que les évènements sont à courtes durées, donc le mode est événementiel n'est pas continu.

II-3-2-2 Formulation mathématique du Tank Model

Le Tank Model qu'on va appliquer dans cette étude contient deux réservoirs, c'est bien le schéma d'étude des crues proposé par Sugawara.

La relation entre les débits des sorties des réservoirs avec les hauteurs de ces derniers est linéaire.

Les stockages dans les deux réservoirs au temps (k-1) sont $S1(k-1)$ et $S2(k-1)$, ces hauteurs sont exprimés en (mm). Les débits des sorties des réservoirs sont $Q11(k-1)$, $Q12(k-1)$ et $Q21(k-1)$, et les débits d'infiltrations $I1(k-1)$ et $I2(k-1)$. Enfin, la pluie est $P(k)$ et l'évapotranspiration $E(k)$.

Le système des équations du modèle représente le changement du niveau d'eau dans chaque réservoir (Lee & Singh, 1998):

$$S1(k) = S1(k - 1) + P(k) - E(k) - Q11(k - 1) - Q12(k - 1) \quad (II - 24)$$

$$S2(k) = S2(k - 1) + I1(k - 1) - Q21(k - 1) - I2(k - 1) \quad (II - 25)$$

Avec, $\Delta k = 1$ (le pas de temps horaire, donc $\Delta k =$ une heure)

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 - C) comme suivant (Lee and Singh 1999):

$$Q11 = \left\{ \begin{array}{l} A11(S1 - C11) , \\ 0, \end{array} \quad \begin{array}{l} S1 > C11 \\ sinon \end{array} \right\} \quad (II - 26)$$

$$Q12 = \left\{ \begin{array}{l} A12(S1 - C12) , \\ 0, \end{array} \quad \begin{array}{l} S1 > C12 \\ sinon \end{array} \right\} \quad (II - 27)$$

$$Q21 = \left\{ \begin{array}{l} A21(S2 - C21) , \\ 0, \end{array} \quad \begin{array}{l} S2 > C21 \\ sinon \end{array} \right\} \quad (II - 28)$$

Le débit d'infiltration est calculé par les équations suivantes (Lee and Singh 1999)

$$I1 = B1.S1 \quad (II - 29)$$

$$I2 = B2.S2 \quad (II - 30)$$

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

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

$$Q(k) = Q_{11}(k) + Q_{12}(k) + Q_{21}(k) \quad (II - 31)$$

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

II-3-2-3 Paramètres du Tank Model

Pour notre cas d'étude et en tenant compte des crues rapides, le Tank Model est représenté seulement par deux réservoirs selon Sugawara (1979).

Dans ce cas-là on a 10 paramètres à caler :

- Les paramètres des débits (coefficient des débits) : A_{11} , A_{12} , A_{21}
- Les paramètres d'infiltration (coefficient d'infiltration) : B_1 , B_2
- Le stockage dans les réservoirs : H_1 , H_2
- Les hauteurs des sorties latérales : C_{11} , C_{12} et C_{21} qui représentent les hauteurs des orifices.

II-3-2-4 Calage des paramètres

Le Tank Model est non linéaire et les mathématiques sont presque inutiles pour ce genre de problème. Et pour cela la solution pour l'étalonnage et l'initialisation du Tank Model est d'utiliser la méthode essai et erreur (Trial and Error method).

Progressivement, la calibration du Tank Model est devenue plutôt simple. Habituellement le premier, le deuxième et même le troisième essai ne donneront pas de bons résultats et donc on peut apporter des modifications audacieuses et importantes aux paramètres du modèle. Après plusieurs essais, le résultat devrait devenir assez bon et l'ajustement fin des paramètres peut commencer. Après dix essais, le résultat devient généralement très bon. (Amireche 2018)

II-3-2-5 Avantages du Tank Model

- Il est simple et raisonnable physiquement,
- Il peut représenter le caractère non linéaire des écoulements de surface,
- Il peut représenter plusieurs composants de l'écoulement,

- Le modèle est adaptatif dans le sens de faire une mise à jour de ses paramètres.

II-4 Filtre de Kalman

II-4-1 Introduction

La théorie initiale du filtrage de Kalman a été introduite par Kalman (1960) et Kalman et Bucy (1961) dans le domaine du contrôle des processus. Depuis ce moment, elle a trouvé de larges applications dans des domaines technologiques très variés, particulièrement dans le génie aérospatial.

Les applications du filtrage de Kalman a fait l'objet d'un intérêt croissant dans l'étude des ressources en eau à cause de leurs avantages inhérents dont les plus significatifs sont indiqués par Bergman et Delleur (1985a)(Yang 1993):

1. possibilité d'une estimation optimale de prévision en temps réel;
2. évaluation de la précision de la prévision et de l'état du système;
3. séparation des bruits du système et des observations

Le filtrage de Kalman est effectivement une structure, et son utilisation doit être accompagnée d'une description mathématique du processus considéré (e.g un modèle hydrologique), même si cette description n'est pas parfaite. Il faut transformer le modèle du processus en une formulation mathématique particulière à laquelle le filtrage de Kalman peut être appliqué. Cette formulation est celle de la technique état-espace qui comporte, d'une part, une équation pour l'évolution du système consistant en une composante déterministe, et une composante stochastique prenant en compte les incertitudes du modèle, et d'autre part, une équation de mesure visant à prendre en compte les erreurs d'observation. De ce fait, le bruit du système et le bruit des mesures sont pris en compte explicitement, ce qui est différent de ce qui se passe avec les modèles traditionnels dans lesquels les bruits sont considérés globalement. La base de la formulation état-espace consiste à indiquer l'importance des effets aléatoires fonctionnant dans un système, et n'étant pas pris en compte dans un modèle déterministe.

II-4-2 Algorithme du filtre de Kalman

L'algorithme du Filtre de Kalman est constitué par trois composants : le modèle de système, le modèle de mesure, la procédure du Filtre de Kalman.

- **Modèle de système**

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

$$X(k) = \Phi(k|k-1).X(k-1) + \Gamma(k|k-1).w(k-1) \quad (II-32)$$

Avec :

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

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

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

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

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

➤ **Modèle de mesure**

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

$$Z(k) = H(k).X(k) + v(k) \quad (II-33)$$

Avec :

$Z(k)$: Vecteur de mesure au temps k ;

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

$v(k)$: Vecteur de bruit blanc Gaussien de mesure au temps k.

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

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

$M(k)$ et $R(k)$ sont la covariance de bruit de processus et la covariance de bruit de mesure, respectivement. (Lee and Singh 1999)

➤ **Procédure du filtre de Kalman Standard**

La procédure du filtre de Kalman consiste à faire la prédiction du vecteur d'état, ensuite un mis à jours de ce dernier.

- **Prédiction**

Supposant que l'estimation d'état $X(k-1|k-1)$ et la covariance $P(k-1|k-1)$ de l'estimation d'erreur d'état ont été données au temps k-1, et ensuite, la valeur de la prédiction d'état $\bar{X}(k|k-1)$ est donnée comme suit (Liu et al. 2011):

$$\bar{X}(k|k-1) = \Phi(k|k-1).X(k-1) \quad (II-34)$$

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

$$\bar{P}(k|k-1) = \Phi(k|k-1).P(k-1|k-1).\Phi(k|k-1)^T + M(k-1) \quad (II-35)$$

- **Mise à jour**

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

$$X(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + K(k).\bar{Y}(k) \quad (II-36)$$

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

$$\bar{Y}(k) = Z(k) - H(k).X(k|k-1) \quad (II-37)$$

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

$$K(k) = \bar{P}(k|k-1).H(k)^T.S(k)^{-1} \quad (II-38)$$

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

$$S(k) = H(k).\bar{P}(k|k-1).H(k)^T + R(k) \quad (II-39)$$

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

$$P(k|k) = (I - K(k).H(k)).\bar{P}(k|k-1) \quad (II-40)$$

Avec : I : matrice identité aux dimensions adéquates. La prochaine étape du temps k+1, l'estimation d'état $X(k|k)$ et la covariance du bruit de système $P(k|k)$ sont considérés comme des données d'entrée initiales et la procédure est répétée comme mentionné ci-dessus. (Liu, Doan and Liang 2011)

II-4-3 Couplage du Tank Model au filtre de Kalman

Le Filtre de Kalman consiste à estimer une information utile pour le système, pollué par un bruit, afin de l'utiliser pour faire une mise à jour continue pour ce système. Les applications du filtre sont nombreuses en ingénierie. Pour notre domaine d'hydrologie, le filtre va être couplé avec le Tank Model pour mettre à jour les paramètres du modèle.

Cette section décrit comment le Tank Model est couplé au Filtre de Kalman. Dans ce couplage, on utilise une approche de mise à jour des paramètres, où le vecteur d'état du Filtre de Kalman est défini comme le jeu de paramètres du Tank Model. Cette configuration permet au Filtre de Kalman de mettre à jour le jeu de paramètres du Tank Model pour chaque pas de temps, et donc, permet de modifier le comportement du modèle. (Liu, Doan and Liong 2011)

➤ **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 $X(k) : (8 \times 1)$ est donné comme suit (Lee and Singh 1999):

$$X(k) = [A11 \ A12 \ A21 \ B1 \ B2 \ C11 \ C12 \ C21]^T \quad (II - 41)$$

La matrice de transition d'état $\Phi(k|k-1) : (8 \times 8)$, et la matrice de transition de bruit de système : (8×8) sont supposées comme matrices d'identités I, ensuite le modèle du système s'écrit :

$$X(k) = X(k-1) + w(k) \quad (II - 42)$$

$$w(k) \sim N(0, M(k))$$

➤ **Modèle de mesure**

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

$$Q(k) = Z(k) = H(k).X(k) + v(k) \quad (II - 43)$$

$$v(k) \sim N(0, R(k))$$

Où $H(k) : (1 \times 8)$ est la matrice de transition de mesure (observation) définie par :

$$H(k) = [h1, h2, h3, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (II - 44)$$

Où $h1, h2, h3$ sont les hauteurs d'eau à la sortie de chaque réservoir, respectivement. Ces hauteurs sont définies par :

$$h1 = H1 - C11 \quad (II - 45)$$

$$h2 = H1 - C12 \quad (II - 46)$$

$$h3 = H2 - C21 \quad (II - 47)$$

➤ Algorithme récursif du couplage

Pour coupler le Tank Model au Filtre de Kalman, on doit utiliser les équations définies ci-dessus ; Tout d'abord, on calcule, en premier lieu, la prédiction d'état $\bar{X}(k|k-1)$ et la prédiction de la covariance $\bar{P}(k|k-1)$. On calcule, en second lieu, le gain de Kalman ; ensuite, on trouve l'estimation d'état $X(k|k)$, et la covariance du bruit de système $P(k|k)$. Finalement, comme tous les paramètres sont mis à jour, les débits latéraux de ruissellement, et les débits d'infiltration sont calculés. Après la mise à jour de tous ces paramètres, le processus continu pour le prochain pas de temps. (Amireche 2018)

II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, les structures des deux modèles qui seront utilisés dans cette étude, ont été détaillées, afin de simuler et de prévoir les débits de crues.

On a commencé tout d'abord, par montrer comment se fait l'adaptation du modèle GR4J au GR3H, en passant d'un pas de temps journalier au pas de temps horaire avec des modifications légers sur les paramètres du modèle, et en tenant compte de la complexité des équations de la modélisation avec ce type de modèles.

On a ensuite présenté, la structure du Tank Model simple avec deux réservoirs, proposée par Sugawara(1979), et qui sera utilisée pour notre cas d'étude, en mentionnant les équations permettant le calcul du débit dans ce modèle.

On a aussi présenté, le Filtre de Kalman, qui est un estimateur très puissant, utilisé dans plusieurs domaines, ainsi que son couplage au Tank Model, pour mettre à jour les paramètres du modèle.

**CHAPITRE III PRESENTATION DE LA ZONE
D'ETUDE**

III-1 Introduction

Le bassin-versant de la Seybouse (un des dix-sept bassins versants de l'Algérie), d'une superficie de 6745 km², présente, à l'instar des bassins à écoulement exoréique de l'Algérie orientale (Kébir-Rhumel, Soummam, etc...), une extension latitudinale importante. Les limites méridionales du bassin sont à 120 km à vol d'oiseau de la mer Méditerranée. (Louamri 2013)

Le bassin versant d'Oued Ressoul, est situé dans la partie Nord-Est de l'Algérie, et représente un petit affluent de rive gauche d'Oued Seybouse. La superficie totale du réseau de drainage d'Oued Ressoul est d'environ 103,96 km². L'altitude de la zone d'étude, varie de 55 et 925m, et se situe entre 7°27'40,81" à 7°36'56,24" E de Longitude, et 36°32'55,13" à 36°41'19,4" N Latitude Nord.

Le Bassin versant d'Oued RESSOUL de la ville d'AIN BERDA, est situé au Sud-Est de la Wilaya d'Annaba à une distance de 20 Km du chef-lieu de la wilaya. Il est constitué de trois communes (Ain Berda, Nechmaya et Selmoune Elhachemi), environ 1% de de sa surface est urbanisé sur la totalité de la surface du bassin versant. Il est limité par :

- **EST** : La commune de DHARAN (wilaya d'EL-TARF).
- **NORD** : La commune d'EL-HADJAR.
- **NORD-OUEST** : Lac de FETZARA.
- **OUEST** : Wilaya de SKIKDA.
- **SUD** : La commune de Gulaat Bousbaa (wilaya de GUELMA).

La figure (III-1) représente les limites géographiques de Bassin versant d'Ain Berda

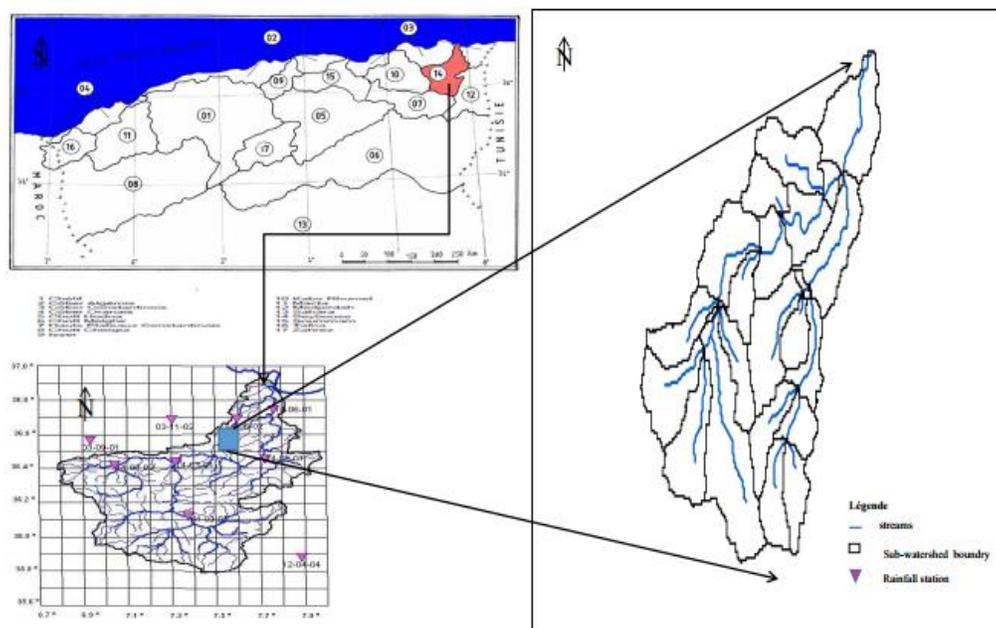


Figure III-1 : Situation de la zone d'étude (Skhakhfa 2017)

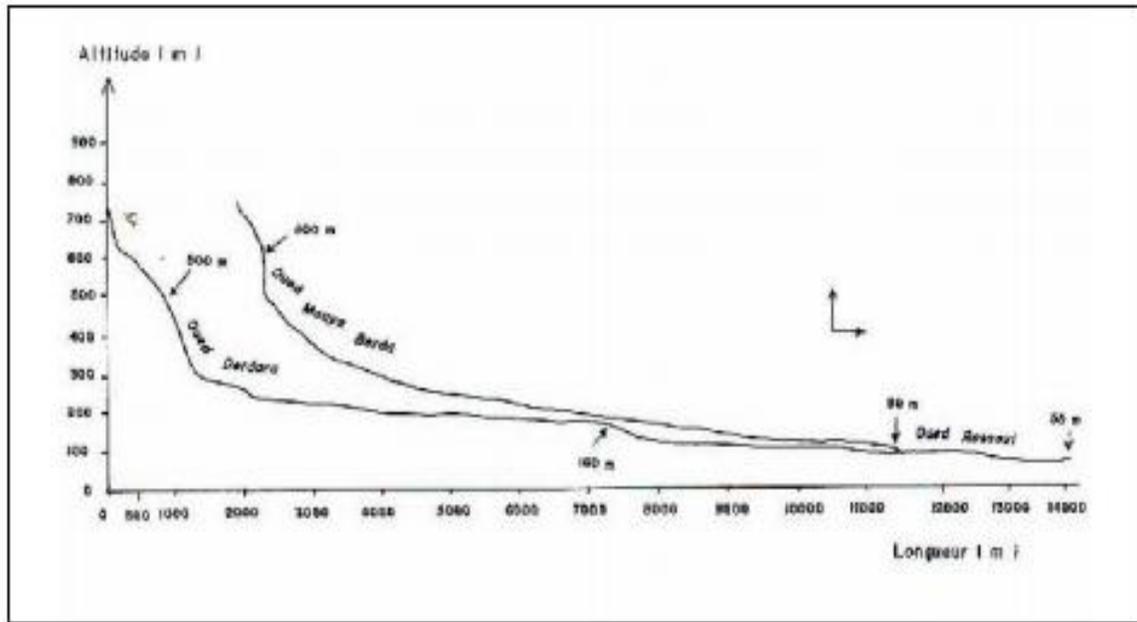


Figure III-3 : Profil en long d'oued Ressoul et de ses affluents (Louamri 2013)

III-2 Données du site

III-2-1 Topographie et relief

La topographie joue un rôle déterminant dans la conception des projets, vu que l'évacuation doit s'effectuer généralement par gravité, sauf dans le cas où le relief n'assure pas les pentes limites. Les plaines et collines occupent 18.08%, les montagnes 52.15%, les Collines et piémonts 25.82%.

Le bassin versant d'Oued Ressoul est défini topographiquement par la surface délimitée et par la ligne des partages des eaux qui passe par les lignes des crêtes et celles des plus grandes pentes. L'altitude maximale se trouve dans la zone montagneuse et s'élève à 927 m. Le bassin versant de la ville de Ain Berda est défini par les coordonnées suivantes :(Skhakhfa 2017)

- ✓ X = 938.20 m
- ✓ Y = 387.00 m
- ✓ Z = 55 m

III-2-2 Retenues collinaires

Le bassin d'Oued Ressoul compte sept retenues collinaires agricoles officielles (Figure III-2) d'une capacité globale qui dépasse 785 000 m³, mais vue d'en haut il existe beaucoup plus que ça.

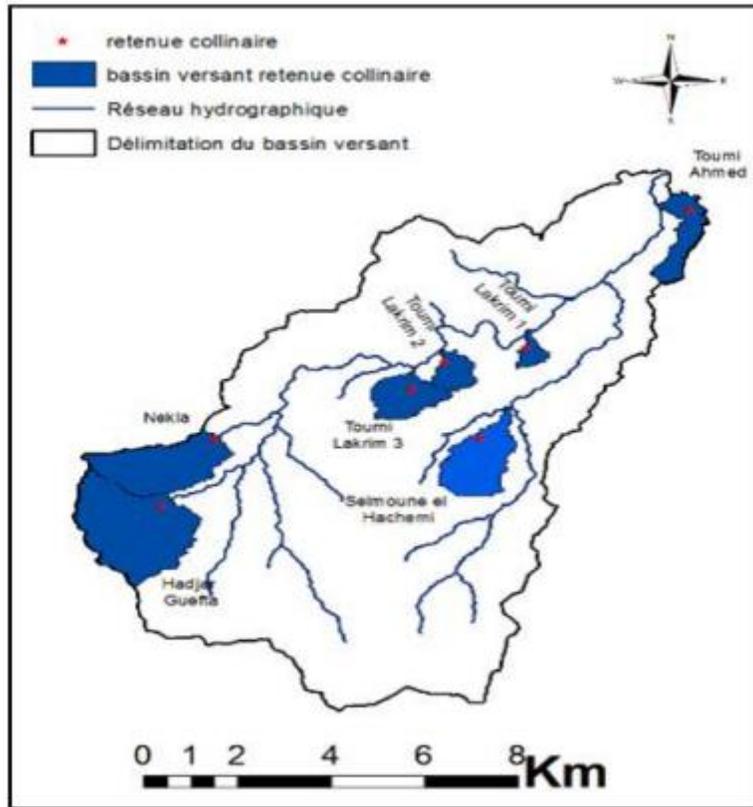


Figure III-4 : Les différents bassins des retenues collinaires du bassin d'Oued Ressoul (Skhakhfa 2017)

III-2-3 Géologie du site

Le cadre géologique d'un bassin versant conditionne les écoulements des eaux de surface et souterraines. La zone d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell d'Algérie. Cet ensemble s'étend de la région de Constantine à la frontière Algéro-Tunisienne. Sa structure est très complexe et essentiellement due à des mouvements Tertiaire, surtout Miocène.

La géologie de la région est caractérisée par des formations allant du Trias jusqu'au Quaternaire, présentant ainsi une lithologie très variée qui comprend essentiellement : les alluvions (sable, gravier, cailloutis,...), les grès, les marnes, les argiles, les flyschs et les calcaires. (Bechiri 2011)

III-2-4 Couvert végétal

La résistance de tout bassin versant à l'érosion est fonction de son couvert végétal, celui-ci joue un rôle vital de protecteur dans la mesure où il protège le sol du point de vue mécanique, contre l'écoulement en diminuant la force de cet écoulement, et favorisant l'infiltration des eaux, ainsi que le rôle que joue le feuillage qui diminue l'impact des précipitations sur le sol en diminuant leur énergie cinétique.

Dans leur ensemble, les versants montagneux existant dans le bassin sont dominés par une forêt de maquis, et de broussailles de type méditerranéen, qui s'étend sur une superficie, assez importante : 23.32 km² soit 22% du périmètre d'étude.

Les terres de plaine en dehors des tissus urbanisés représentent la quasi-totalité des terres agricoles du périmètre d'étude qui s'étendent sur une superficie de 44.19 km² soit 41,7%. (Skhakhfa 2017)

III-3 Facteurs hydroclimatologiques

D'une manière générale, la région de Ain Berda, vu sa situation géographique, bénéficie d'un climat méditerranéen. Elle est connue par ses longs Etés chauds et secs. Les hivers sont doux et humides, la neige est rare mais pas impossible. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes.

Il fait généralement chaud surtout de la mi-Juillet à la mi-Août, avec des températures pouvant atteindre 45 C°. Les températures les plus basses sont enregistrées en altitude durant l'hiver, avec 5 à 6 mois de gelée blanche par an. Les mois les plus froids sont Janvier et Février. L'humidité moyenne inter annuelle à Ain Berda est de 75.5%.

De même l'évaporation est l'un des facteurs constitutifs du climat. On constate que le pouvoir évaporant de l'atmosphère atteint des valeurs maximales surtout pendant la saison chaude qui s'étend de Mai à Octobre, ou elle atteint 70% de l'évaporation annuelle, et en interaction avec les autres facteurs météorologiques (évapotranspiration, insolation, fréquence du vent, etc....).

Les vents dominants sont de Nord-Ouest, avec une vitesse moyenne variant de 3.3 à 4.8 m/s. En Eté ils deviennent de secteur Est - Nord-Est. Parfois ils tournent au secteur Sud et deviennent un dangereux facteur déclenchant des incendies de forêts. Le maximum de force des vents est enregistré en hiver et au printemps. Les vents de sable sont rares.

CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Les précipitations liquides sont l'un des facteurs essentiels du climat et ça se manifeste par leur intervention dans :

- La détermination de l'abondance fluviale par leur hauteur totale annuelle.
- L'influence directe sur les régions hydrologiques par la répartition mensuelles et saisonnières.

On constate une individuation nette dans le bassin versant aux mois de Juin, Juillet et Août qui sont les mois les plus secs de l'année, et on remarque ainsi la diminution de la pluviométrie on allant du Nord vers le Sud, ce qui montre la liaison intime entre les altitudes et la hauteur de la lame précipitée. D'après les données de la station pluviométrique d'Ain Berda, les précipitations maximales sont enregistrées durant la période de Septembre-Mars. (Skhakhfa 2017)

- ✓ Pluviométrie moyenne 660 mm.
- ✓ Apport moyen en 12.9 Hm³.

Remarques

- ✓ Les données pluviométriques et hydrométriques ont été recueillies auprès de l'A.N.R.H de Constantine.
- ✓ Les données climatiques sont recueillies auprès du Centre de météorologique d'Annaba.

III-4 Caractéristique du relief du bassin versant

Le bassin versant d'Oued Ressoul fonctionne comme un collecteur, chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement. Cette transformation ne va pas sans pertes en eau, et celles-ci dépendent des conditions climatologiques régnant sur le bassin, mais aussi des caractéristiques physiographiques morphométriques du bassin (forme, réseau hydrographique, etc...).

La connaissance des paramètres morphométriques d'un bassin versant est nécessaire, afin de connaître leurs effets sur la variation du régime hydrologique. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influent fortement sur les caractéristiques hydrologiques et notamment le régime de l'écoulement en période de crue. Ces caractéristiques sont présentées respectivement dans le tableau (III-1).

Tableau III-1 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du B.V. (Skhakhfa 2017)

Type de paramètre	Unité	Symbole	Valeur
Superficie du bassin versant	Km ²	A	103
Périmètre du bassin versant	Km	P	65,89
Altitude Max	m	H _{max}	927
Altitude Min	m	H _{min}	55
Altitude Moy	m	H _{moy}	305
Médiane	m	H ₅₀	480
Largeur de rectangle équivalent	Km	L	3,53
Longueur de rectangle équivalent	Km	L	29,42
L'indice de pente globale	m/km	I _g	37,04
L'indice de compacité de Graveluis	-	K _c	1.81

III-5 Données utilisées

III-5-1 Données hydrométriques

La station d'Oued Ressoul (Ain Berda) retenue pour réaliser notre modélisation, représente un profil de cours d'eau stabilisé par un seuil bétonné, de type Parshall, et d'un limnigraphe Bulle à bulle. (Skhakhfa 2017)

Tableau III-2 : Caractéristique de la station hydrométrique d'Ain Berda

Nom	Code	X	Y	Z
Oued Ressoul	14 06 06	937.3	383.2	55

L'Oued Ressoul est un petit affluent de rive gauche de l'Oued Seybouse, important fleuve côtier de l'Est Algérien. La station d'Ain Berda, installée en 1968 pour l'étude des ressources en eau superficielle de la plaine d'Annaba, contrôle un bassin versant de 103 Km².

CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

On dispose d'une série de mesures des débits à partir de Novembre 2002 à Décembre 2003 au pas de temps horaire.

Etant donné l'instabilité du lit, et la nécessité de connaître avec précision les débits les plus faibles, la station a été équipée d'un Seuil-Jaugeur du type Parshall de 90 cm. Ce seuil est en béton.

L'équipement de la station comprend :

- une échelle composée de quatre éléments verticaux : le premier d'une hauteur de 88 cm, est fixé sur la paroi du convergent, le second à une hauteur de 112 cm et les deux autres éléments sont métriques ;
- un limnigraphe pneumatique Telimnip (Neyrpic), avec réduction 1/5.

Tableau III-3: Les caractéristiques des événements retenus pour l'étude

	Evènement 1	Evènement 2	Evènement 3
Débit max (m ³ /s)	77.55	84.05	91.18
Débit min (m ³ /s)	6.96	0.507	0.013
Débit moyen (m ³ /s)	22.38	25.53	7.3
Ecart type	18.81	24.81	10.14

III-5-2 Données pluviométriques

Les événements de crue mesurés sur le bassin versant d'Oued Ressoul entre 2001 et 2011 ont été analysés. Parmi les événements disponibles, nous avons retenus ceux qui répondent aux critères suivants :

- une pluie cumulée de courte durée ;
- une pluie à l'origine d'inondation ;
- une pluie qui correspond à un débit élevé ;
- une pluie uniforme sur tout le bassin versant.

CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

On a choisi ces évènements parce qu'ils contiennent des pics très importants, donc des crues qui peuvent engendrer des dégâts énormes.

Dans cette étude, on a retenu trois évènements de précipitations :

- ✓ le premier évènement de 11/01/2003 à 13/01/2003
- ✓ le deuxième évènement de 17/01/2003 à 19/01/2003
- ✓ le troisième évènement de 26/11/2002 à 04/12/2002

Les trois évènements sont présentés dans les figures (III-2, III-3 et III-4) suivants :

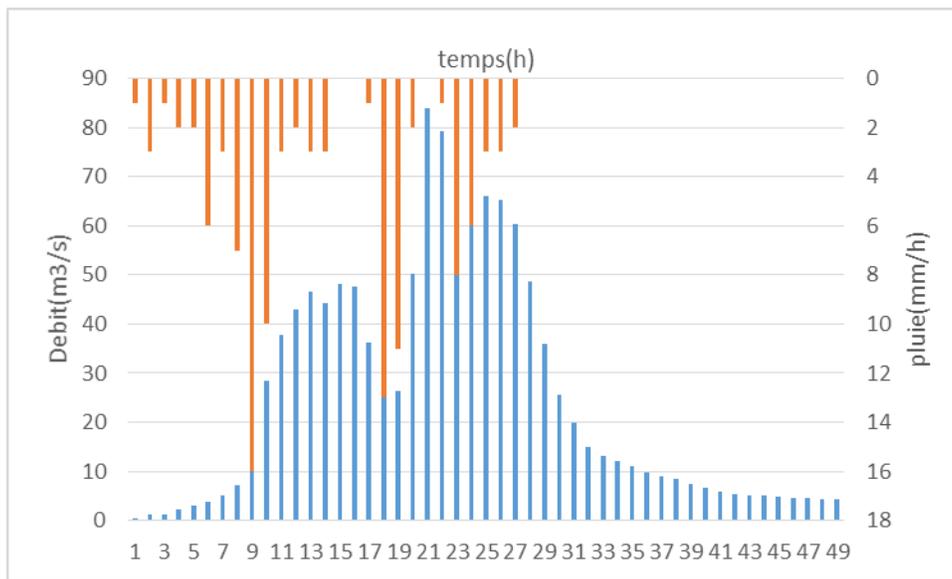


Figure III-5 : Précipitation pour l'évènement 1

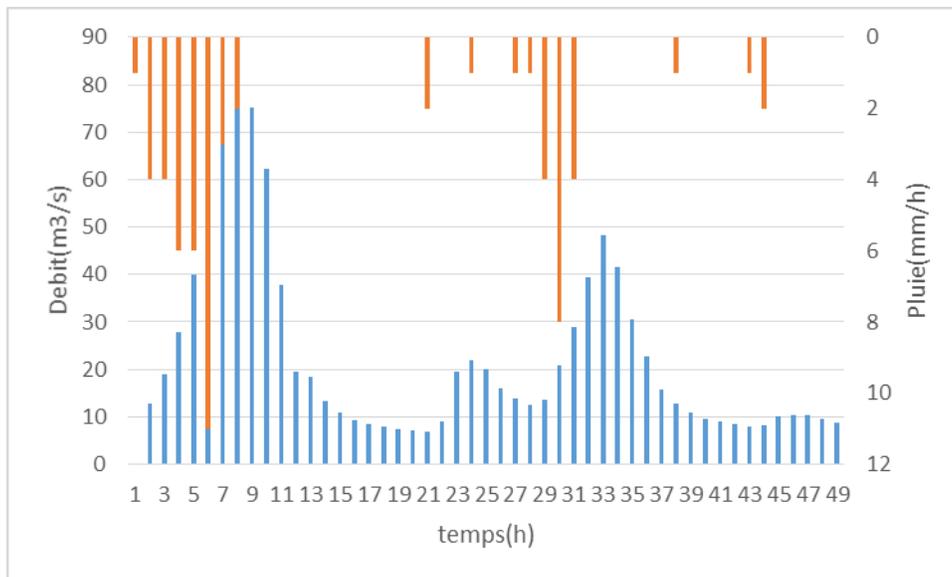


Figure III-6 : Précipitation pour l'évènement 2

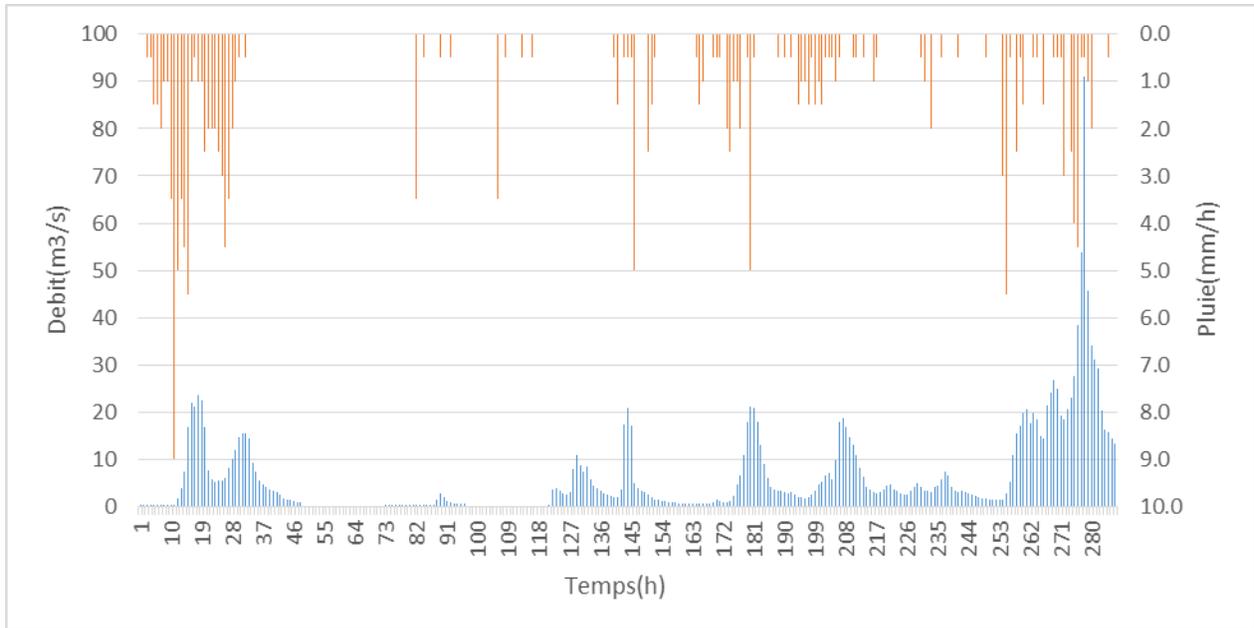


Figure III-4 : Précipitation pour l'évènement 3

Ces évènements retenus sont bien sur concomitants avec les données hydrométriques.

III-6 Conclusion

Nous avons présenté brièvement, dans ce chapitre, les caractéristiques du bassin versant étudié, et ses différents facteurs hydro climatologiques, ainsi que les données nécessaires pour effectuer une modélisation Pluie-Débit (simulation et prévision) au pas de temps courts.

Pour cela, trois évènements ont été retenus pour faire la comparaison entre les différents modèles, avec un pas de temps court, où on s'intéressera à la prévision des crues dans la région d'Ain Berda faisant partie du grand bassin de la Seybouse, en se limitant à l'étude du sous bassin d'oued Ressoul.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une comparaison entre les deux modèles qu'on a présenté dans le chapitre III, à savoir le modèle GR3H et le Tank Model couplé au filtre de Kalman. En premier lieu, on va comparer le Tank Model simple avec le GR3H, ensuite, on va mettre à jour les paramètres du Tank Model avec la procédure de Kalman tout en appliquant ces modèles sur les deux premiers évènements, ensuite, on l'appliquera sur le troisième évènement, et on fera une comparaison entre les trois modèles développés. Enfin, une autre comparaison va être présentée, c'est celle des différents pas de temps des prévisions qu'on essaiera d'étudier sur le couplage.

La validation de ces modèles passera par les différents critères des performances numériques et graphiques évaluant les caractéristiques des crues.

IV-2 Application du modèle GR3H pour les évènements 1 et 2

Il est d'usage en modélisation hydrologique, de subdiviser les données recueillies en deux parties, l'une réservée au calage et l'autre pour la validation du modèle. Dans notre cas, nous avons choisi de faire le calage avec l'évènement 1, et d'effectuer la validation des résultats avec l'évènement 2.

Il faut rappeler que dans un modèle événementiel (par épisode), les conditions initiales doivent être spécifiées comme une partie des entrées d'un modèle.

Les paramètres du modèle GR3H ont des gammes de variations proposées par le Cemagref pour initialiser le modèle, on a tenu compte de ces intervalles pour que le modèle ne diverge pas lors de la phase de calibration.

Le calage du modèle a été faite avec le solveur Excel, qui utilise des méthodes d'optimisations locales, comme déjà mentionné.

Les données initiales introduites sont :

Pour la capacité du réservoir de production $X1 = 365.037$ (mm)

Pour la capacité du réservoir de routage $X3 = 90.17$ (mm)

Pour le temps de temps de base d'hydrogramme unitaire $X4 = 1$ (h)

Et pour les niveaux initiaux des deux réservoirs de production et de routage $S0$ et $R0$ respectivement, sont choisis d'une façon à atteindre les meilleurs résultats. Pour ces deux premiers évènements les niveaux sont initialisés pour chaque phase.

Les taux de remplissage, pour le calage et la validation figurent dans le tableau suivant, où :

$S0/X1$: taux de remplissage du réservoir de production,

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

R0/X3 : taux de remplissage du réservoir de routage.

Tableau IV-1 : Taux de remplissages pour chaque phase

	S0/X1	R0/X3
Calage	0.5	0.209
Validation	0.759	0.461

- **Evaluation statistique**

Les résultats des critères numériques pour le calage (évènement 1) et la validation (évènement 2) figurent dans le tableau (IV-2).

Tableau IV-2 : Résultats des critères numériques du calage et de la validation avec le modèle GR3H

Le critère	NSE(%)	RSR	PBIAS(%)	X1	X3	X4
Calage	89.17	0.33	6.423	210.879	23.044	3.22
Validation	73.74	0.51	-2.974	/	/	/

D'après les résultats obtenus pour cette première modélisation, on voit bien qu'en période de calage et en se basant sur les critères : NSE, RSR, et PBIAS le modèle GR3H a donné de très bons résultats, il en est de même pour la période de validation, sauf pour le NSE ou on remarque qu'il y a une légère baisse de ce critère mais qui reste tout de même un bon résultat. En outre, le modèle développé surestime les valeurs prévues.

- **Evaluation des paramètres des crues**

Ces paramètres vont être utilisés par la suite dans tous autres cas :

PE1 : l'erreur sur la pointe de crue de la valeur prévue sur le même pas de temps que la pointe mesurée,

PE2 : l'erreur sur la pointe de crue entre les processus mesuré et prévu,

VE : l'erreur sur le volume de la crue,

TE : l'erreur temporelle entre les pics en heures (h).

Tableau IV-3 : Résultats des paramètres de crue du calage (événement 1) et de validation (événement 2) avec le modèle GR3H

	PE1	PE2	VE	TE (h)
Calage	0.0693	0.0693	-0.0642	0
Validation	0.4748	0.4748	0.0297	0

D’après ces résultats, on constate qu’il n’y a pas de décalage temporelle entre les deux processus mesuré et prévu, que ce soit en calage ou en validation, et pour l’erreur en pointe de crue, en calage elle est acceptable, alors qu’en validation elle est de 47.48% ce qui veut dire qu’il y a une surestimation, ce qui corrobore les résultats données par les critères numériques. Pour le volume total de crue, on remarque qu’il sous-estimé en calage et surestimé en validation, avec des erreurs généralement assez faibles.

• Evaluation graphique

Les figures (IV-1) et (IV-2), montrent les résultats du calage avec l’évènement 1, et la validation avec l’évènement 2.

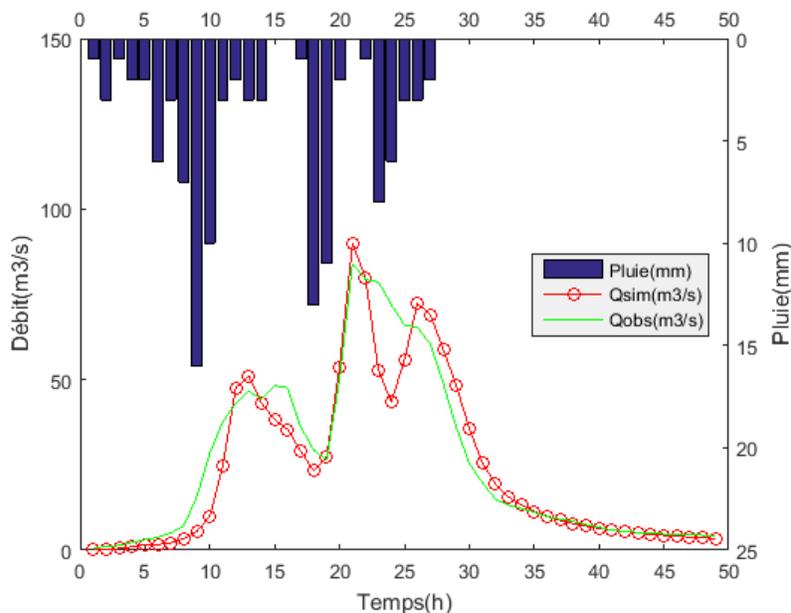


Figure IV-1 : Evolution des débits simulés et observés de l’évènement 1 (calage) avec le modèle GR3H

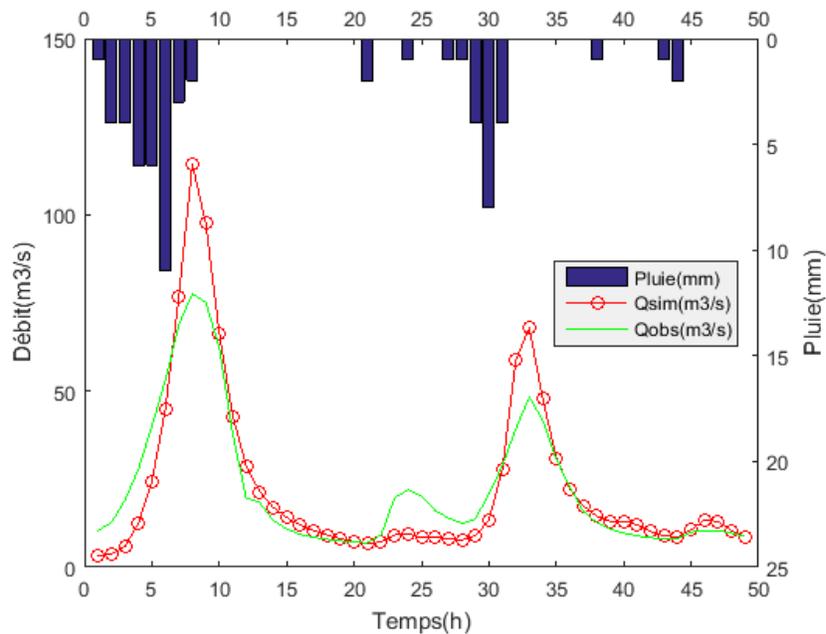


Figure IV-2 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 2 (validation) avec le modèle GR3H

On remarque d'après ces deux figures, que le modèle GR3H, reproduit bien l'évolution des débits observés, que ce soit en calage ou en validation, avec quelques perturbations sur les caractéristiques de la crue (la montée de la crue, la décrue, l'amplitude du pic, le temps d'apparition du pic, le volume de la crue) ou tous ces paramètres sont soit surestimés soit sous-estimés, ce que confirme les résultats des critères numériques.

On constate que le modèle a pu reconstruire l'évènement 2 tel qu'il est, avec une surestimation des pics de la crue, et sous-estimations des faibles débits.

• **Q-Q Plot :**

Sur les figures suivantes, on peut constater que le nuage de points représentant les débits observés et simulés, est bien réparti de part et d'autre de la première bissectrice, ce qui dénote une forte liaison entre eux, confirmée par la valeur du R^2 qui dépasse le 85% que ce soit en calage ou en validation.

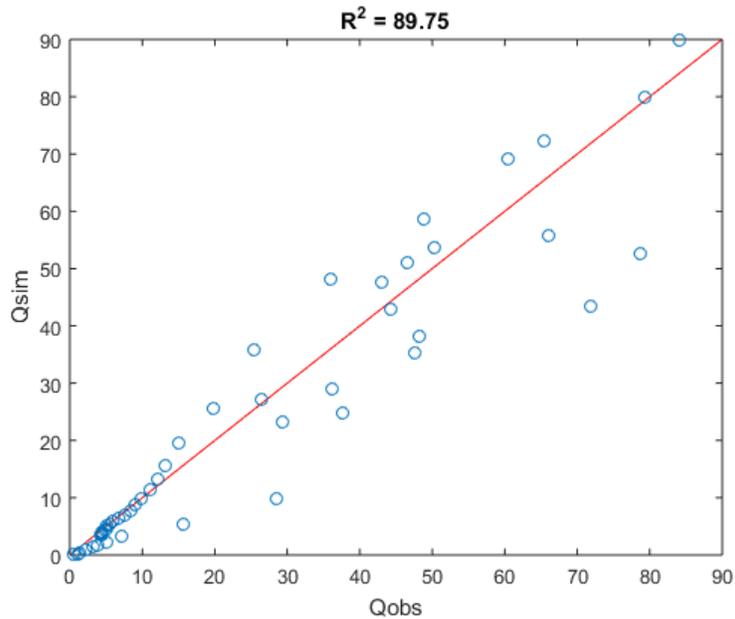


Figure IV-3 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 1 (calage) avec le modèle GR3H

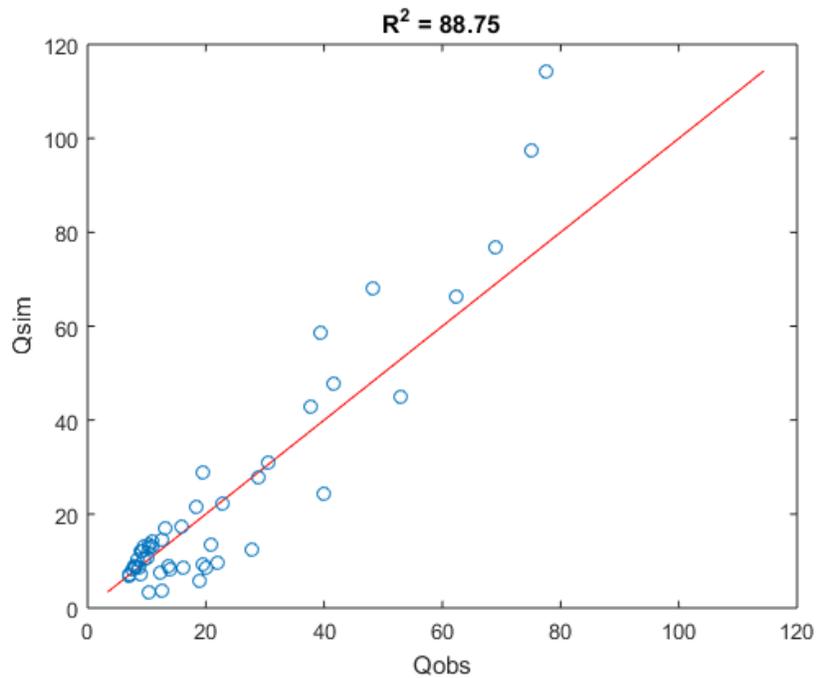


Figure IV-4 : Débit simulé en fonction du débit mesuré pour l'évènement 2 (validation) avec le modèle GR3H

IV-3 Application du Tank Model simple pour les évènements 1 et 2

La même procédure utilisée pour le modèle GR3H a été appliquée au Tank Model.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour le calage on a choisi, dans ce cas, d'utiliser la méthode 'Trial and Error', l'initialisation des paramètres a été faite d'une manière à atteindre les meilleurs résultats.

• Evaluation statistique

Les résultats des critères obtenus avec le Tank Model simple appliqué sur les deux premiers évènements sont présentés dans le tableau (IV-4), et les paramètres du Tank Model simple en périodes de calage et validation figurent dans le tableau (IV-5).

Tableau IV- 4 : Résultats des critères numériques du Tank Model simple pour les évènements 1 et 2

Le critère	NSE(%)	RSR	PBIAS(%)
Calage	67.86	0.5669	-30.8566
Validation	25.56	0.8628	42.1688

Tableau IV-5 : Paramètres du modèle issus du calage du Tank simple

Paramètre	A11	A12	A21	B1	B2	C11	C12	C21	H1	H2
Valeur	0.022	0.021	0.091	0.039	0.066	45	44	15.5	46	16

L'application du Tank Model simple sur le premier évènement (calage) a donné des résultats acceptables pour les critères de Nash et RSR, par contre avec le PBIAS on remarque des résultats médiocres, alors que pour le deuxième évènement (validation), on constate que le modèle n'a pas réussi à simuler correctement les débits observés, et ça se traduit numériquement sur la qualité des critères statistiques obtenus.

• Evaluation des paramètres des crues

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau IV-6 : Résultats des paramètres de crue du calage (1) et validation (2) avec le Tank Model simple

	PE1	PE2	VE	TE (h)
Calage	-0.2308	-0.3	0.31	-2
Validation	-0.512	-0.512	-0.422	0

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, indiquent qu'il y a un décalage de deux heures d'avance, entre les processus simulé et mesuré, ce qui est confirmé par la différence entre PE1 et PE2 en phase de calage, mais les erreurs sont généralement faibles comparativement avec celles de la phase de validation, où l'on remarque que les deux pics se produisent simultanément.

Pour les volumes des crues, le modèle a estimé un volume supérieur, en calage, à celui du processus mesuré, et l'inverse en validation, avec des erreurs un peu élevées.

• Evaluation graphique

Les figures suivantes représentent les différentes phases des simulations, des événements 1 et 2, obtenues avec le Tank Model simple.

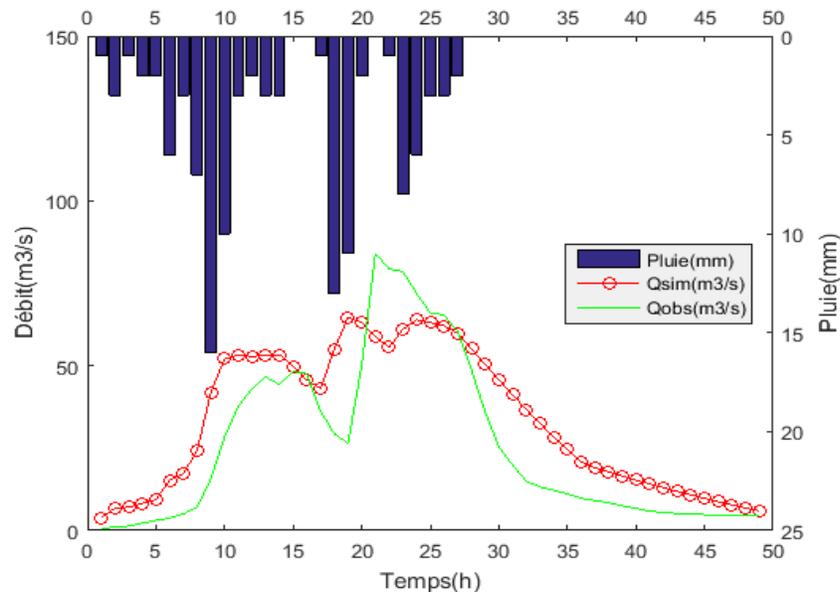


Figure IV-5 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 1 (calage) avec le Tank Model simple

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le Tank Model simple génère un débit simulé qui suit le débit mesuré d'une manière générale, mais avec des décalages en forme d'hydrogramme unitaire de crue, avec des surestimations sur les courbes de montée, et en décrue, et une sous-estimation des amplitudes des pics.

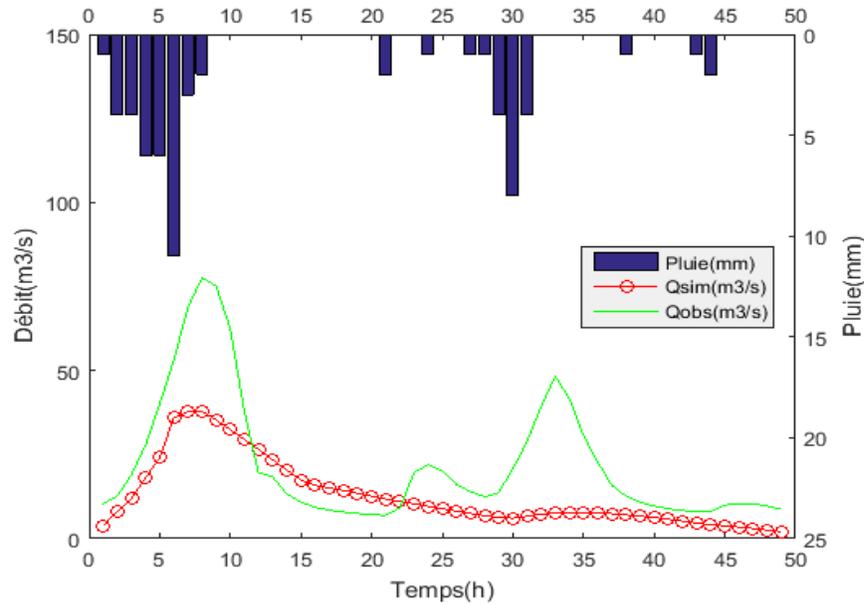


Figure IV-6 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 2 (validation) avec le Tank Model simple

On voit qu'il y a une nette différence entre les deux hydrogrammes avec une sous-estimation apparente des pics.

• Q-Q Plot :

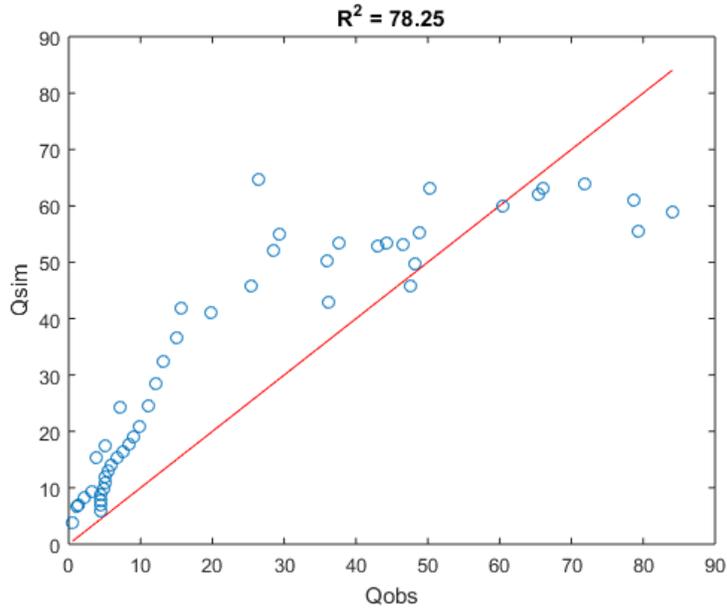


Figure IV-7 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 1 (calage) avec le Tank Model simple

Sur cette figure, on remarque que le nuage de points des débits est bien réparti de part et d'autre de la première la bissectrice, avec une bonne valeur de R^2 .

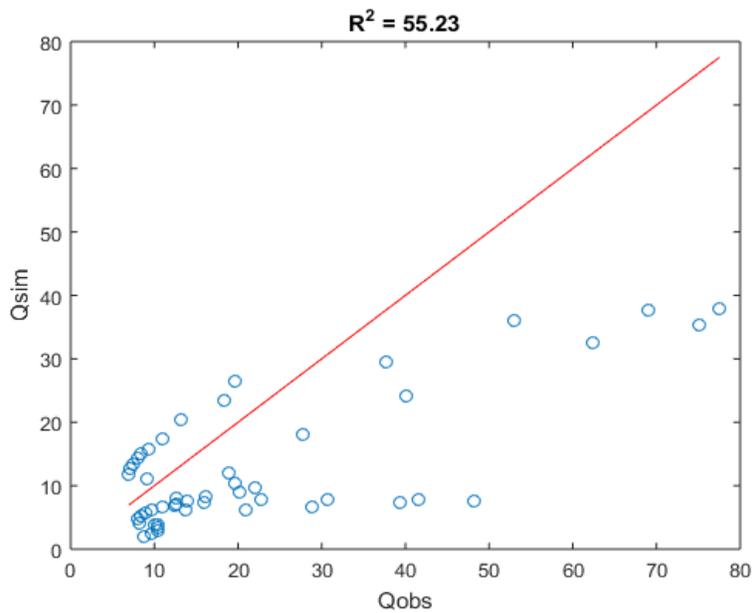


Figure IV-8 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 2 (validation) avec Tank Model simple

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le Q-Qplot de la phase de validation donne un R^2 insatisfaisant, où l'on voit que la majorité des points s'éloigne clairement de la première bissectrice.

IV-4 Application du Tank Model couplé au Filtre de Kalman pour les évènements 1 et 2

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats issus du couplage du Tank Model au Filtre de Kalman.

Pour mettre à jour notre modèle il faut qu'un état initial du vecteur de paramètres soit fourni au filtre de Kalman, pour cela, on a choisi d'utiliser comme état initial, le Tank Model simple avec ses caractéristiques présentés précédemment.

Quant aux paramètres du filtre, pour les deux premiers évènements on a la matrice de covariance P avec la diagonale suivante :

$$P(0,0) = [0.05, 0.05, 0.05, 0.01, 0.01, 0.1, 0.1, 0.1]$$

La matrice de covariance a la structure suivante :

En diagonale c'est les covariances des paramètres σ_i^2 pour le reste c'est $\sigma_i \cdot \sigma_j$.

Et pour tous les évènements : La covariance de bruit : $R = 10^{-2}$

Et la matrice de covariance du bruit de processus M(k) a une diagonale égale à 10^{-3} et 0 pour tout le reste.

• Evaluation statistique

Tableau IV-7 : Résultats des critères pour les événements 1 et 2 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

	Le critère	NSE(%)	RSR	PBIAS(%)
Évènement 1	Simulation	99.95	0.0232	1.12
	Prévision	90	0.3163	1.22
Évènement 2	Simulation	99.94	0.0246	0.09
	Prévision	87.34	0.3558	4.89

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

On remarque que le modèle couplé au Filtre de Kalman, présente de très bons résultats en simulation pour les 2 évènements, avec des critères parfaits, ou les valeurs de Nash avoisinent l'unité, des RSR proches de zéro, et des PBIAS inférieurs à 5%, alors qu'en prévision les performances du modèle chutent légèrement mais reste quand même très bons.

• Evaluation des paramètres de crues

Tableau IV-8 : Résultats des paramètres des crues des évènements 1 et 2 en simulation et prévision avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

		PE1	PE2	VE	TE (h)
Évènement 1	Simulation	-1.95×10^{-4}	-1.95×10^{-4}	0.011	0
	Prévision	0.014	-0.43	0.012	2
Évènement 2	Simulation	-5.47×10^{-4}	-5.47×10^{-4}	9.89×10^{-4}	0
	Prévision	-0.184	-0.184	-0.05	0

Les résultats de ce tableau, donnent une vision très claire sur l'aptitude du couplage, à reproduire les caractéristiques de la crue, où l'on constate que les erreurs sur les pics et sur les volumes des crues sont négligeables, que ce soit pour l'évènement 1 ou 2, en mode de simulation.

En mode prévision, le couplage pour l'évènement 1, présente un hydrogramme de crue retardé de deux heures par rapport au processus mesuré, résultats de la différence entre PE1 et PE2, avec un PE2 peu élevé, et une légère sous-estimation en volume.

Pour l'évènement 2, les pics des hydrogrammes mesuré et prévu se produisent au même moment, ce qui est acceptable pour la prévision, avec une sous-estimation du pic en amplitude, et en volume de crue, mais ce dernier est moins important du fait qu'il est proche de zéro.

• Evaluation graphique

• Evènement 1

La figure (IV-9) représente l'évolution des débits issus du couplage au Filtre de Kalman de l'évènement 1.

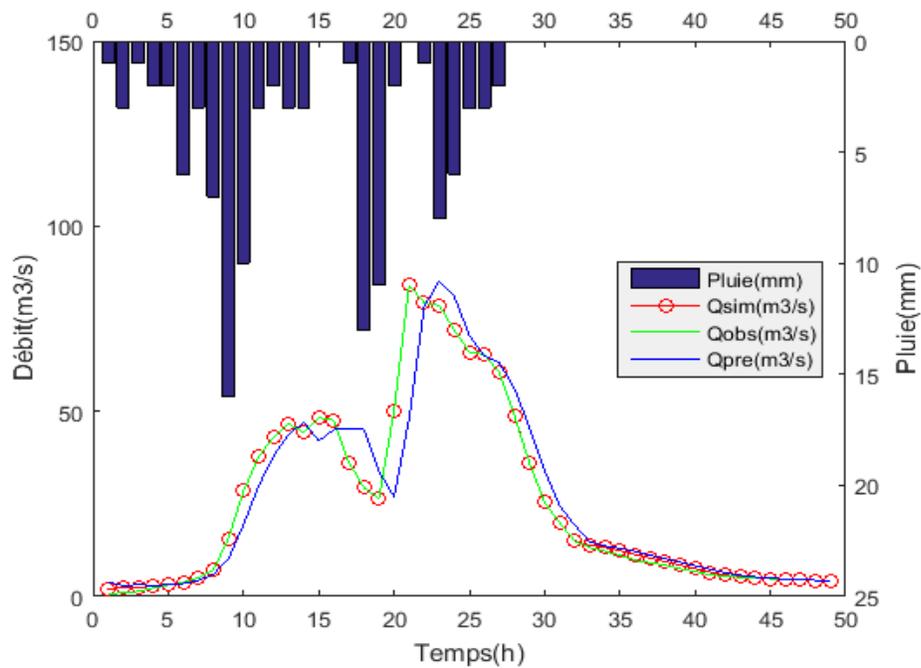


Figure IV-9 : Evolution des débits simulé, observé et prévu de l'évènement 1 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

On remarque que les hydrogrammes simulé et observé sont complètement confondus entre eux, par contre pour les hydrogrammes prévu et observé, on note une très bonne reproduction de l'allure, surtout au début et à la fin de l'évolution, mais avec un retard bien visualisé entre les deux, et un rapprochement notable des pics.

- **Q-Q Plot :**

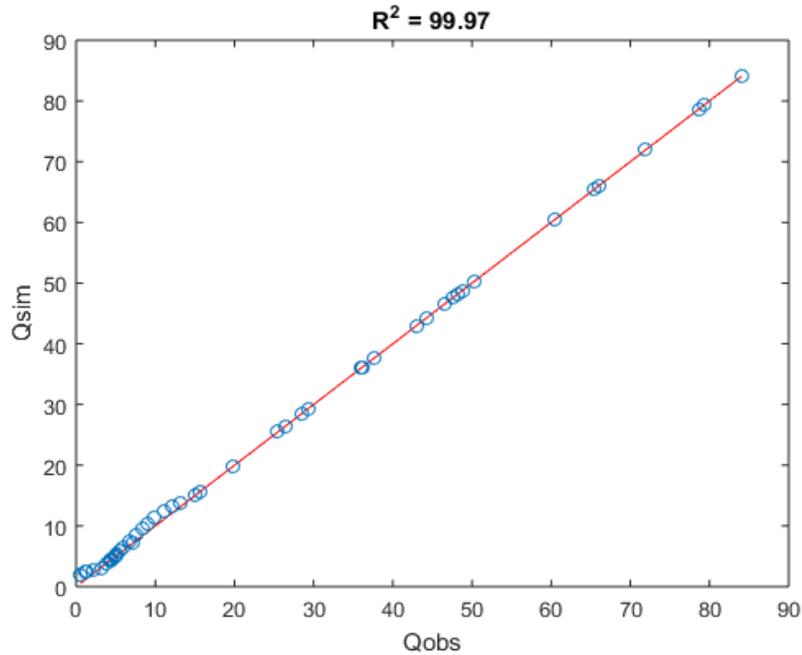


Figure IV-10 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 1 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Sur cette figure, on constate la très forte liaison entre les débits simulé et mesuré, où le nuage de point des débits, est bien confondu avec la première bissectrice, avec un R^2 proche de un.

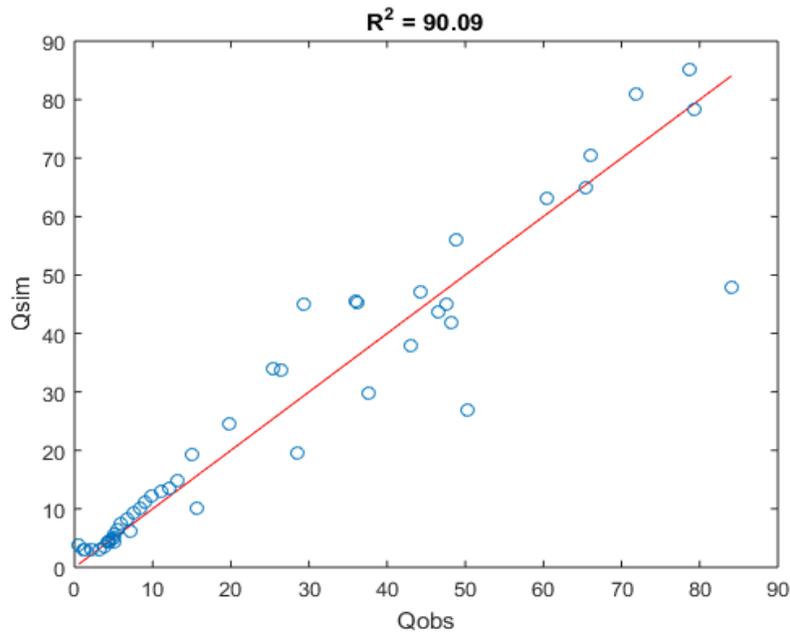


Figure IV-11 : Débit prévu en fonction du débit observé pour l'évènement 1 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Idem pour les débits prévu et mesuré, où l'on constate la aussi une bonne répartition du nuage de points des débits autour de la première bissectrice avec un R^2 dépassant les 90%.

• Evènement 2

La figure (IV-12) représente l'évolution des débits issus du couplage au Filtre de Kalman de l'évènement 2.

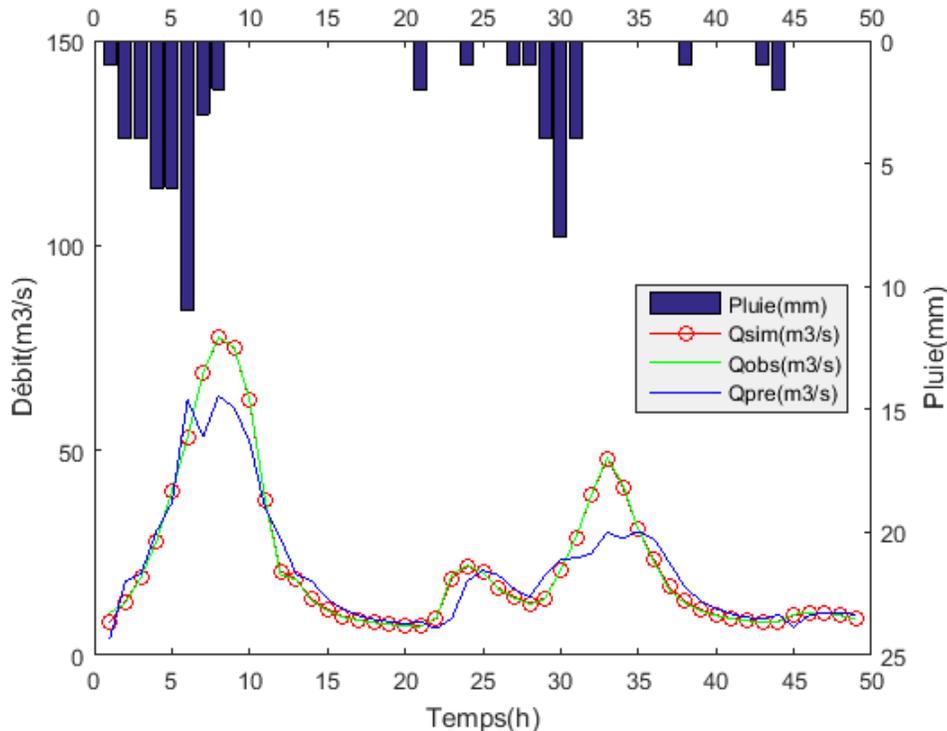


Figure IV-12: Evolution des débits simulé, prévu et mesuré de l'évènement 2 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Cette figure montre une parfaite reproduction entre les hydrogrammes simulé et observé, par contre, l'hydrogramme prévu est sous-estimé par le modèle, et spécialement ses pics, où l'on remarque un net écart entre les amplitudes des deux hydrogrammes, alors que pour le reste de l'évènement, on remarque qu'en courbe de montée de la crue, il y a une similitude des deux hydrogrammes, et pour la décrue, l'allure du débit prévu est aberrée et un peu en retard.

• Q-Q Plot :

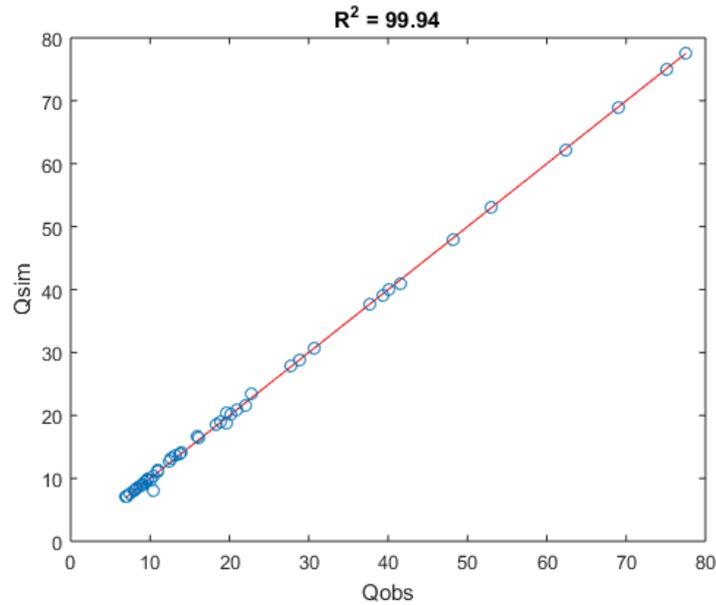


Figure IV-13 : Débit simulé fonction du débit observé pour l'évènement 2 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

En mode simulation, nous avons un R^2 parfait (proche de 1), et un nuage de points des débits, confondu avec la première bissectrice.

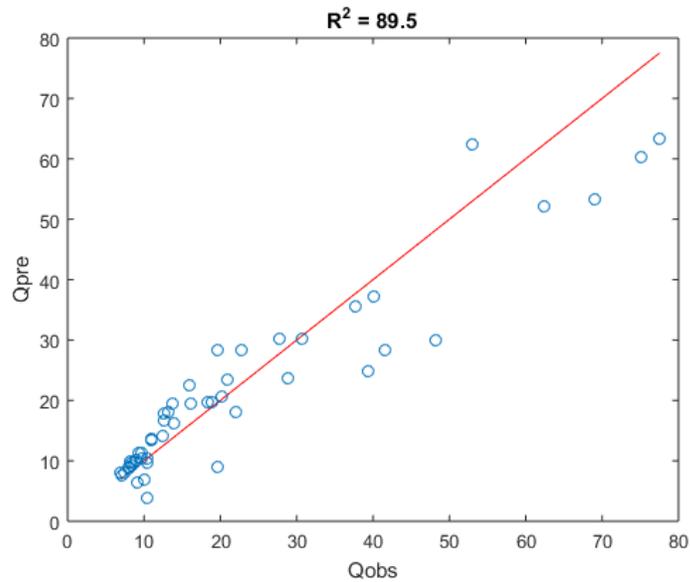


Figure IV-14 : Débit prévu fonction du débit observé pour l'évènement 2 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

En mode prévision, les points s'écartent en dessous de la première bissectrice, ce qui montre qu'il y a une sous-estimation des débits, mais d'une façon générale la prévision donne un R^2 très bon.

IV-5 Application du modèle GR3H pour l'évènement 3

L'évènement 3 sera subdivisé en deux, 75% pour le calage (3a), et 25% pour la validation (3b) du modèle.

Les niveaux initiaux des réservoirs de production et de routage sont les suivants :

Pour la capacité du réservoir de production $X1 = 365.039$ (mm)

Pour la capacité du réservoir de routage $X3 = 90.017$ (mm)

Pour le temps de temps de base d'hydrogramme unitaire $X4 = 3.22$ (h)

Pour l'évènement 3, on a initialisé la période de calage par les données ci-dessus, ensuite, nous avons initialisé la période de validation par les derniers niveaux calculés en calage, afin de préserver la continuité de l'évènement.

Les taux de remplissages pour les phases de calage et de validation figurent dans le tableau suivant :

Tableau IV-9: Taux de remplissages pour chaque phase

	S0/X1	R0/X3
Calage	0.5	0.2
Validation	0.636	0.509

• Evaluation statistique

Les résultats des critères en calage et validation pour l'évènement 3 présentés dans le tableau (IV-10).

Tableau IV-10 : Résultats des critères du calage (3a) et validation (3b) avec le modèle GR3H

Le critère	NSE(%)	RSR	PBIAS(%)	X1	X3	X4
Calage	36.78	0.795	-18.41	622.032	20	3.22
Validation	37.24	0.792	45.79	/	/	/

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'évènement 3 a donné des résultats insatisfaisants, que ce soit en calage ou en validation, ce qui se traduit par les critères numériques NSE, RSR et PBIAS.

• Evaluation des paramètres de crues

Tableau IV-11 : Résultats des paramètres des crues du calage (3a) et validation (3b) avec le modèle GR3H

	PE1	PE2	VE	TE (h)
Calage	0.096	-0.332	0.184	11
Validation	-0.071	-0.071	-0.46	0

D'après les résultats de ce tableau, et comme premier constat, on remarque un décalage entre les deux processus mesuré et simulé, très important en calage, avec un retard de onze heures, ce qui est prouvé par la différence entre PE1 et PE2, et une surestimation du pic après l'occurrence de la crue, avec un surplus en volume, ce qui exprime le mal fonctionnement du modèle, cependant, en validation, on peut constater que les pics interviennent simultanément, mais avec des amplitudes sous-estimées, avec la même remarque pour le volume.

• Evaluation graphique

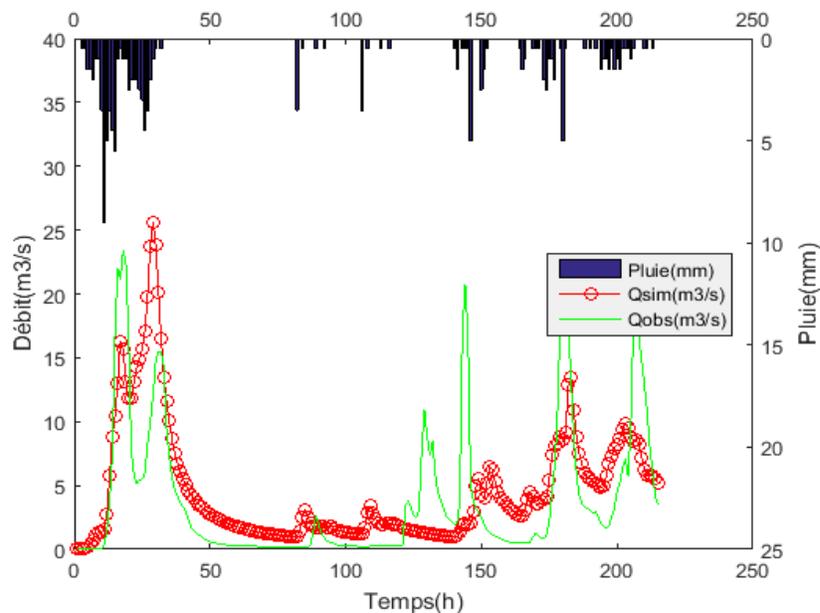


Figure IV-15 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 (calage) avec le modèle GR3H

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette figure montre bien la faiblesse du modèle GR3H, à reproduire convenablement les caractéristiques de la crue, où l'on voit, sans aucun doute qu'il surestime, et sous-estime les pics avec des retards temporels importants.

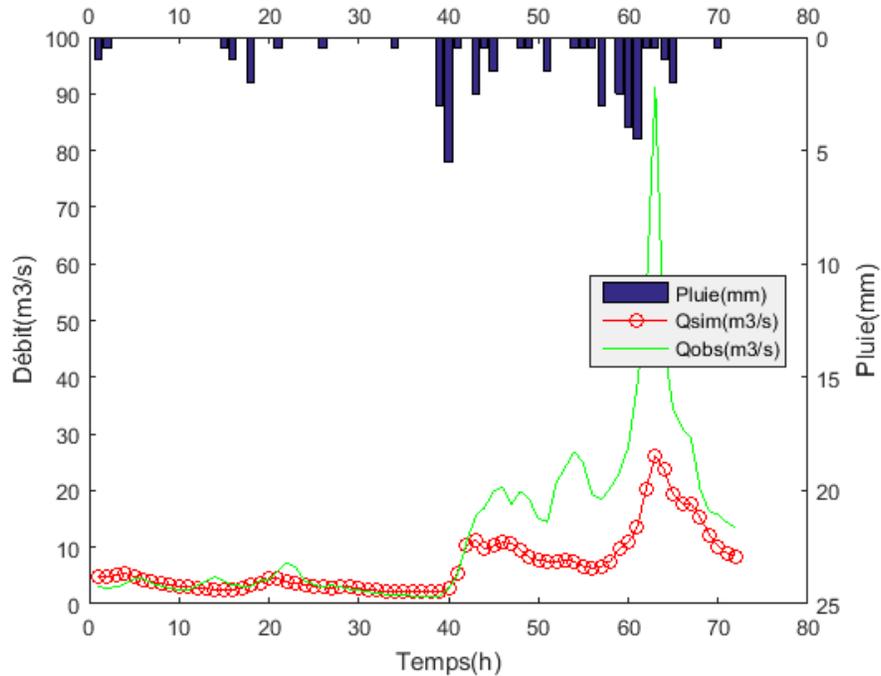


Figure IV-16 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 (validation) avec le modèle GR3H

La sous-estimation est remarquable sur cette figure et présente un déficit majeur pour le modèle GR3H à reproduire les pics.

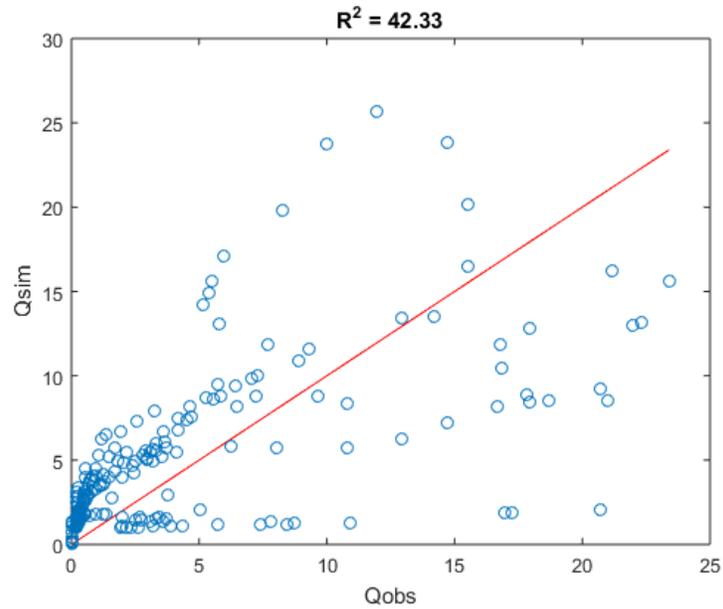


Figure IV-17 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement (calage) avec le modèle GR3H

Sur le graphique Q-Qplot, on voit que la majorité des points ne sont pas alignés autour de la première bissectrice, avec une valeur insatisfaisante du coefficient de détermination inférieure à 50.

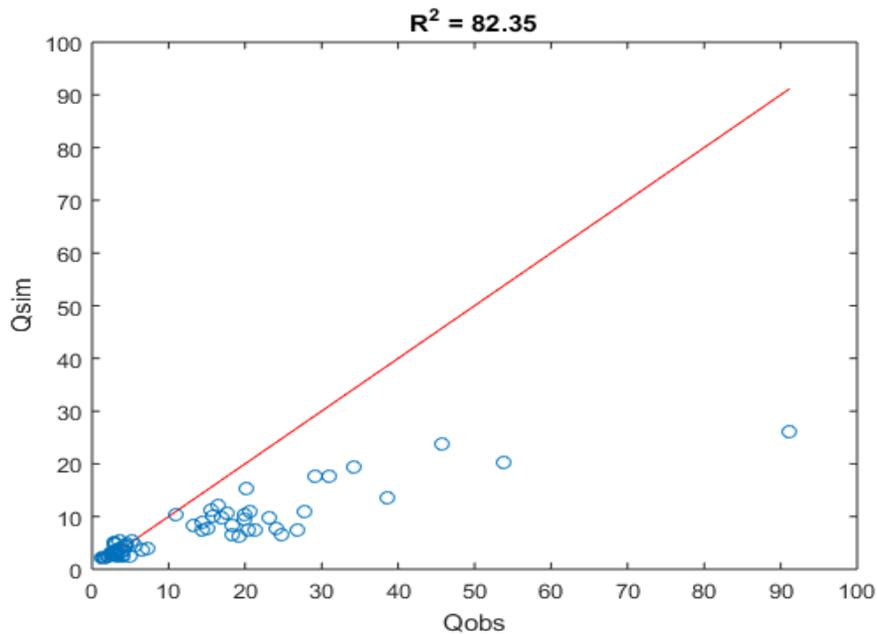


Figure IV-18 : Débit simulé en fonction du débit mesuré pour l'évènement 2 (validation) avec le modèle GR3H

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Malgré la très bonne valeur du coefficient de détermination entre les débits simulé et mesuré, qui se manifeste avec un R^2 dépassant les 75%, mais le nuage de points est loin de la première bissectrice, ceci se traduit par le manque en volume de crue simulé (sous-estimation).

IV-6 Application du Tank Model simple pour l'évènement 3

Les tableaux (IV-12) et (IV-13) présentent respectivement les résultats des critères numériques de l'évènement 3, en calage et en validation, et ses paramètres.

• Evaluation statistique

Tableau IV-12 : Résultats de l'évènement trois avec le Tank simple

Le critère	NSE(%)	RSR	PBIAS(%)
Calage	-22.62	1.1073	-71.4168
Validation	-32.40	1.1506	79.0706

Tableau IV-13 : Paramètres du modèle issus du calage du Tank simple

Paramètre	A11	A12	A21	B1	B2	C11	C12	C21	H1	H2
Valeur	0.005	0.003	0.005	0.006	0.006	0.6	0	0	5	5

En analysant les critères numériques, on remarque dans ce cas aussi que les résultats obtenus sont de mauvaise qualité, avec des valeurs de Nash négatives, ce qui veut dire que le modèle n'a jamais réussi à reproduire un débit simulé proche de l'observé, et ce qui est aussi montré par les autres critères.

• Evaluation des paramètres de crues

Tableau IV-14 : Paramètres de crue du calage du Tank simple

	PE1	PE2	VE	TE (h)
Calage	-0.64	-0.75	0.71	12

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Validation	-0.942	-0.945	-0.79	2
-------------------	--------	--------	-------	---

D'après ces résultats des paramètres des crues analysées, on remarque que les pics n'ont pas été reproduits complètement, aussi bien en calage qu'en validation, avec une sous-estimation apparente confirmée aussi avec le volume de la crue, avec un surplus en calage et un déficit en validation.

Le modèle a enregistré un retard énorme de douze heures en calage, et deux heures en validation ce qui reflète négativement son aptitude à faire des simulations de bonne qualité.

• Evaluation graphique

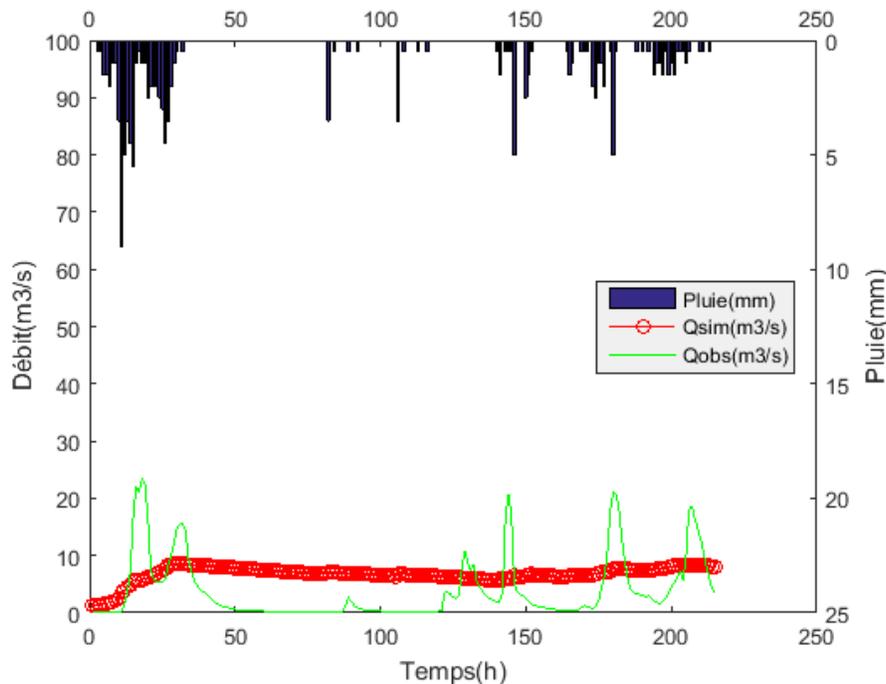


Figure IV-19 : Evolution des débits simulé et observé de l'évènement 3 (calage) avec le Tank Model simple

Sur ce graphique, on peut émettre la remarque que le débit simulé en calage représente, de façon générale, la moyenne du débit observé, et montre un écart important entre les hydrogrammes mesuré et simulé, avec des surestimations et sous-estimations concernant les pics, ce que confirme l'autre critère graphique Q-Qplot avec une valeur de R^2 proche de zéro.

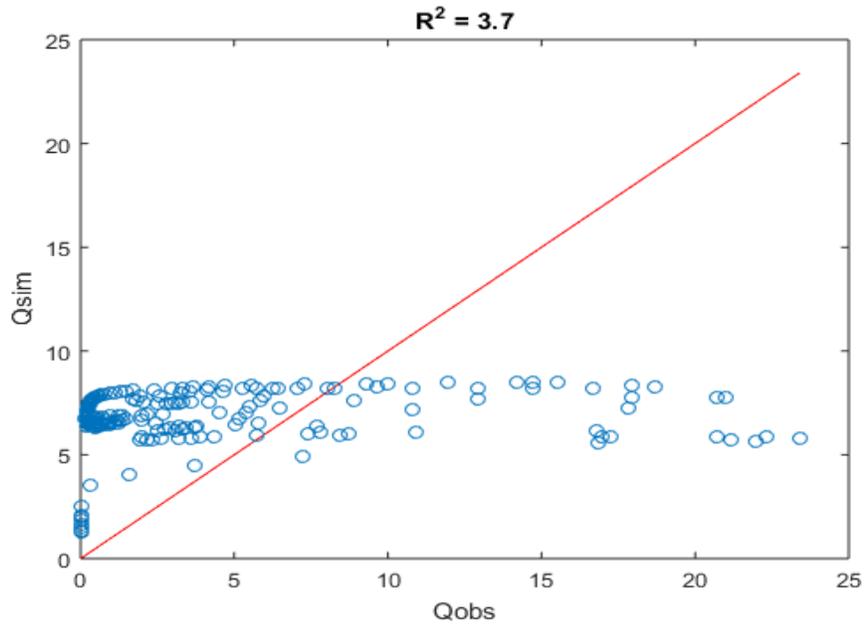


Figure IV-20 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 3 (calage) avec le Tank Model simple

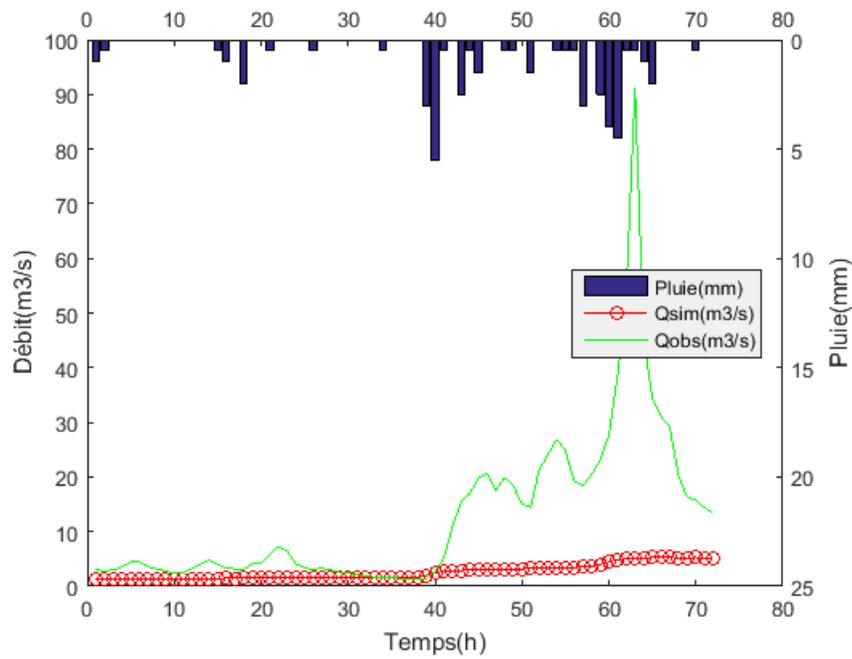


Figure IV-21 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 (validation) avec le Tank Model simple

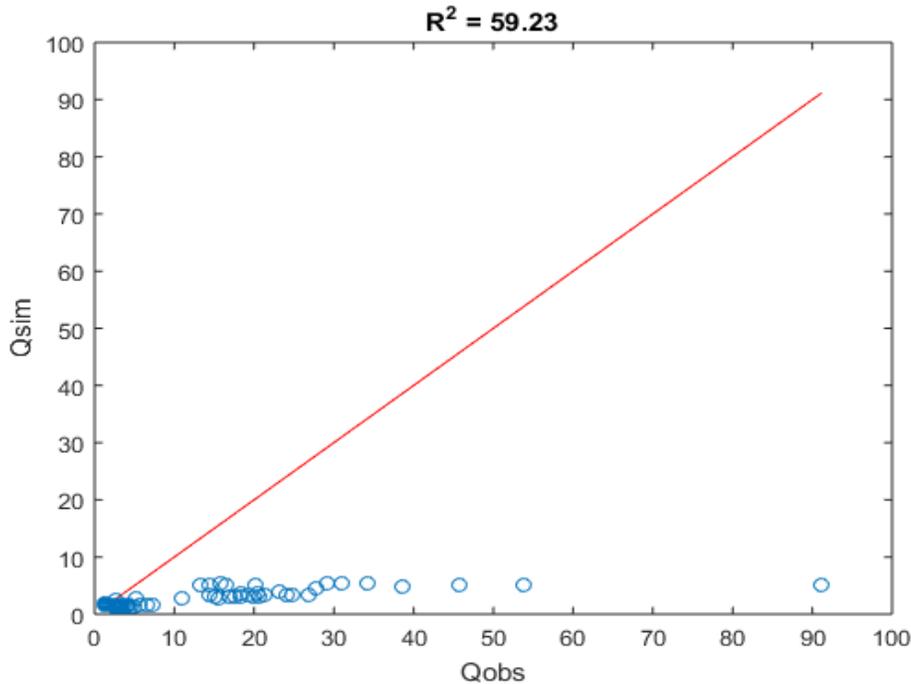


Figure IV-22 : Débit simulé en fonction du débit observé pour l'évènement 3 (validation) avec le Tank Model simple

Graphiquement en phase de validation, on peut remarquer que l'allure de l'hydrogramme simulé ne suit pas celle du débit mesuré et plus particulièrement sur les extremums, et aussi sur le graphique Q-Qplot, qui montre qu'il y a une corrélation mais hors de la bissectrice, avec un R^2 insatisfaisant, et une sous-estimation importante en volume de crue et en amplitude du pic.

IV-7 Application du Tank Model simple couplé au Filtre de Kalman pour l'évènement 3

Pour cet évènement on a choisi comme diagonale pour la matrice de covariance la suivante :

$$P(0,0) = [0.025, 0.025, 0.1, 0.3, 0.3, 3, 3, 3]$$

La matrice de covariance a une structure comme la suivante :

En diagonale c'est les covariances des paramètres σ_i^2 pour le reste c'est $\sigma_i \cdot \sigma_j$

La covariance de bruit $R = 10^{-2}$, et la matrice de covariance du bruit de processus $M(k)$ a une diagonale égale à 10^{-3} et 0 dans tout le reste.

• **Evaluation statistique**

Tableau IV-15 : Résultats des critères pour l'événement 3 avec le Tank simple couplé au Filtre de Kalman

	Le critère	NSE	RSR	PBIAS (%)
Évènement 3	Simulation	99.99	0.0046	0.18
	Prévision	80.49	0.4416	-0.43

L'ajout du Filtre de Kalman, a mis à jour les paramètres du modèle, et a permis d'obtenir de meilleurs résultats, où l'on constate son effet sur les critères numériques en simulation, dans le tableau ci-dessus, avec un NSE très proche de 1, un RSR proche de 0, et une très bonne valeur du PBIAS, mais cela n'empêche pas de mettre l'accent sur la faiblesse en prévision, par comparaison avec la phase simulation, mais reste en tous cas très bons.

• **Evaluation des paramètres de crues**

Tableau IV-16 : Résultats des critères pour l'événement 3 avec le Tank simple couplé au Filtre de Kalman

		PE1	PE2	VE	TE (h)
Évènement 3	Simulation	10^{-6}	10^{-6}	0.0017	0
	Prévision	-0.028	-0.42	-0.0045	1

Les résultats présentés dans ce tableau, ajoutent une confirmation ponctuelle à ceux des critères statistiques globaux, en mode de simulation, avec des différences entre les amplitudes des pics négligeables, et aussi sur le volume avec un pourcentage d'erreur très faible de 0.17%, comme pour l'erreur temporelle ou il n'y a pas un décalage en pic, ce qui veut dire que l'erreur en forme peut tout de même être négligé.

Néanmoins, la qualité du modèle en prévision et moins bonne qu'en simulation, c'est ce qu'on peut démontrer avec l'erreur sur les pics avec des sous-estimations apparentes, et un retard d'occurrence de pic pour l'hydrogramme prévu d'une heure, mais qui reste excellent en volume total de crue avec un écart négligeable.

• Evaluation graphique

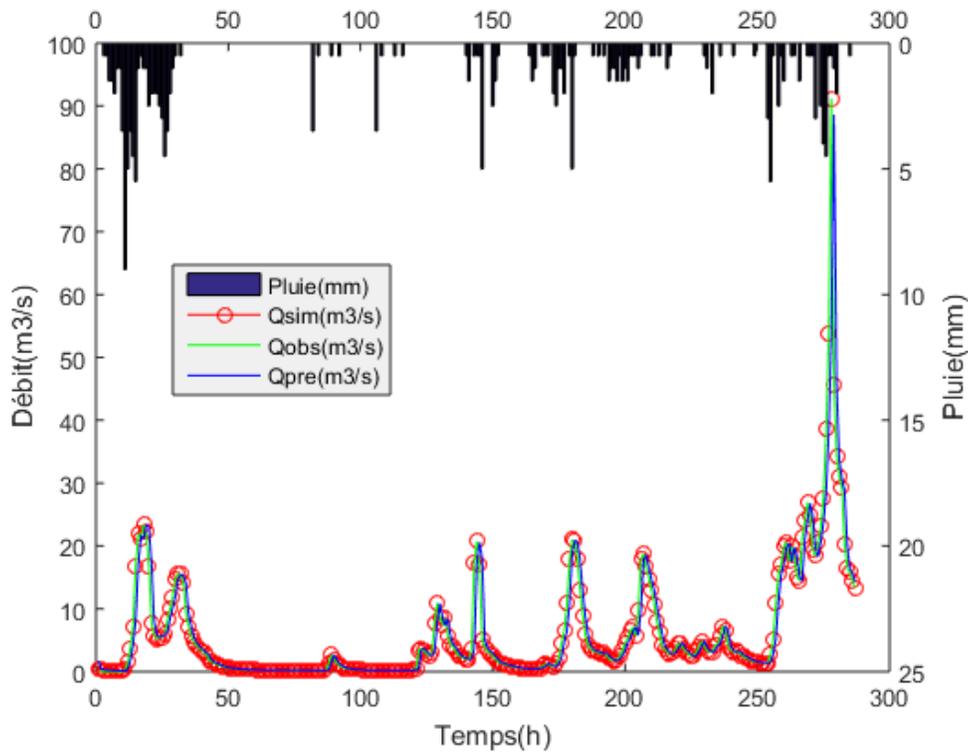


Figure IV-23 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps (1h)

Graphiquement, on ne peut pas faire de distinction entre les hydrogrammes simulé, mesuré et prévu, du fait que le modèle couplé, permet de reconstruire la crue observée, de manière quasi-parfaite, que ce soit en simulation ou en prévision, avec de légères différences qui apparaissent seulement pour les critères numériques.

Les figures ci-dessous, montrent la forte corrélation entre les débits simulé et observé qui apparait visuellement d'une façon très claire, avec un R^2 très proche de 1, où la ligne de régression des données présente elle-même la bissectrice, et pour les débits prévu elle est moins corrélée mais qui reste aussi très bonne.

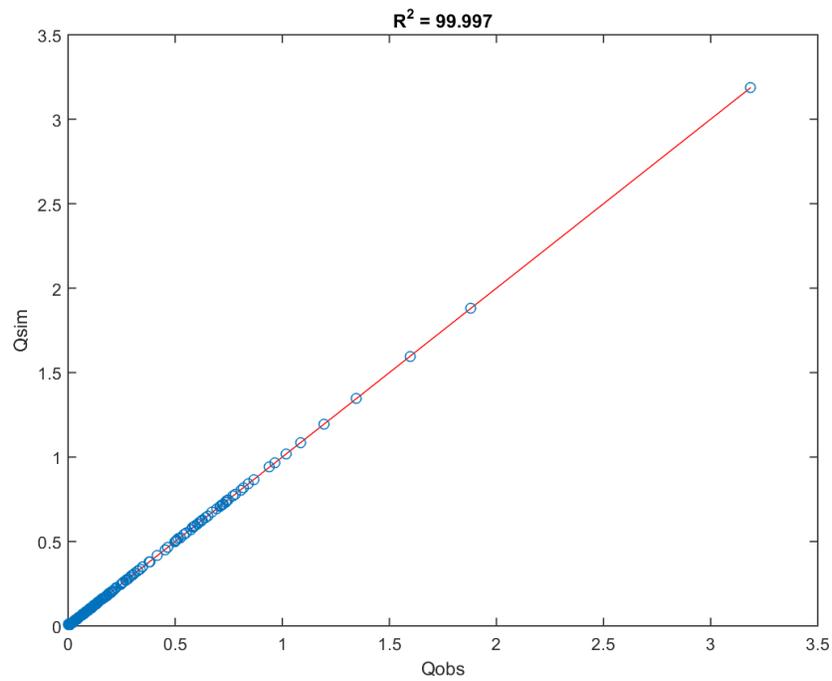


Figure IV-24 : Débit simulé fonction du débit observé pour l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

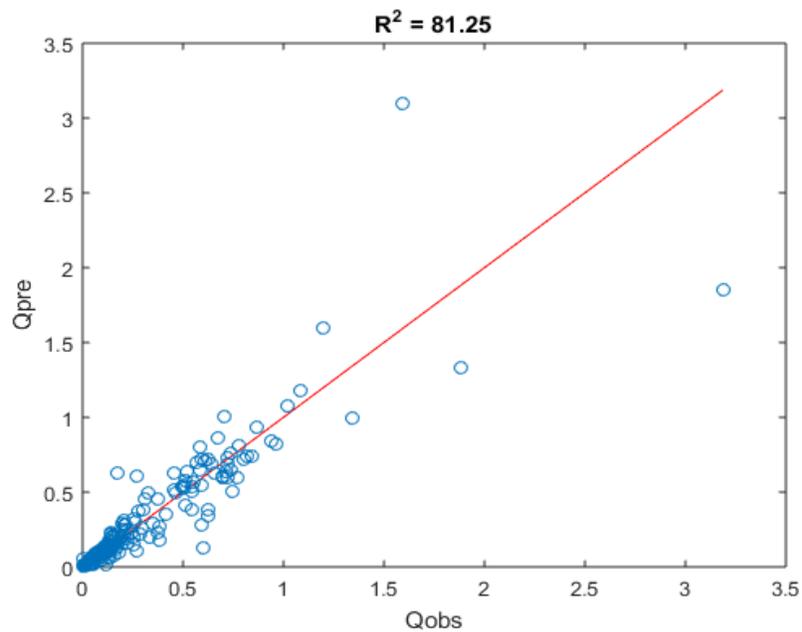


Figure IV-25 : Débit prévu fonction du débit observé pour l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

IV-8 Comparaison entre différents horizons de prévision avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman pour l'évènement 3

Pour bien étudier un modèle de prévision de crues, il faut le faire pour différents horizons de prévision. On a choisi d'utiliser l'évènement 3 pour réaliser ce travail.

En profitant de la longueur de la série étudiée, on a construit trois autres séries avec différents pas de temps de simulation (2h, 3h et 4h), l'initialisation et la procédure de Kalman sont les mêmes que pour le pas de temps d'une heure, pour ne pas remettre en cause les conditions initiales.

• **Evaluation statistique :**

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants pour la simulation et la prévision des débits :

Tableau IV-17 : Comparaison entre différents pas de simulation

L'horizon \ Le critère	1h	2h	3h	4h
NSE(%)	99.99	99.997	99.998	99.999
RSR	0.0046	0.0031	0.0022	0.0017
PBIAS(%)	0.18	-0.1224	-0.0672	-0.0411

L'influence du pas de temps sur la qualité de simulation du modèle couplé est positive, ça veut dire qu'au fur et à mesure, que celui-ci augmente, le modèle atteint les meilleures performances, ceci est confirmé par les valeurs de NSE qui sont très proches de 1, et il en de même pour les autres critères qui tournent autour des gammes de hautes qualités.

Tableau IV-18 : Comparaison entre différents pas de prévision

L'horizon \ Le critère	1h	2h	3h	4h
NSE(%)	80.49	65.35	54.63	48.94
RSR	0.4416	0.5887	0.6736	0.7145

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

PBIAS(%)	-0.43	1.69	3.36	6.14
-----------------	-------	------	------	------

A l'inverse de la phase de simulation, la qualité en prévision décroît au fur et à mesure, que le pas de temps s'accroît, où l'on constate une dévaluation brusque des critères des performances, qui passent de bonne en une heure à médiocre en quatre heures.

• Evaluation des paramètres des crues

Tableau IV-19 : Paramètres de crue en simulation et Comparaison entre différents pas de simulation

L'horizon	1h	2h	3h	4h
PE1	-1.0049×10^{-6}	-1.78×10^{-6}	-1.92×10^{-6}	-1.87×10^{-6}
PE2	-1.0049×10^{-6}	-1.78×10^{-6}	-1.92×10^{-6}	-1.87×10^{-6}
VE	0.0017	0.0012	6.72×10^{-4}	4.11×10^{-4}
TE(h)	0	0	0	0

D'après ces résultats, on voit que l'augmentation du pas de simulation diminue le volume total de la crue, avec un décalage temporel nul, pour tous les pas, et l'erreur sur les amplitudes des pics est variable suivant le pas étudié, comme le montre le pas de quatre heures qui reste le meilleur modèle en simulation.

Tableau IV-20 : Paramètres de crue en simulation et Comparaison entre différents pas de prévision

L'horizon	1h	2h	3h	4h
PE1	-0.0280	-0.0400	-0.0740	-0.1105
PE2	-0.4198	-0.5526	-0.5426	-0.5194
VE	-0.0045	-0.0169	-0.0336	-0.0614

TE(h)	1	1	1	1
-------	---	---	---	---

La prévision avec le Tank Model simple couplé au Filtre de Kalman, pour différents pas de temps, présente le même décalage, quel que soit le pas étudié, mais lorsque celui-ci augmente, l'erreur sur le volume total de la crue et l'erreur sur la hauteur de crue augmentent aussi, ce que confirment aussi les résultats des critères numériques.

• Evaluation graphique

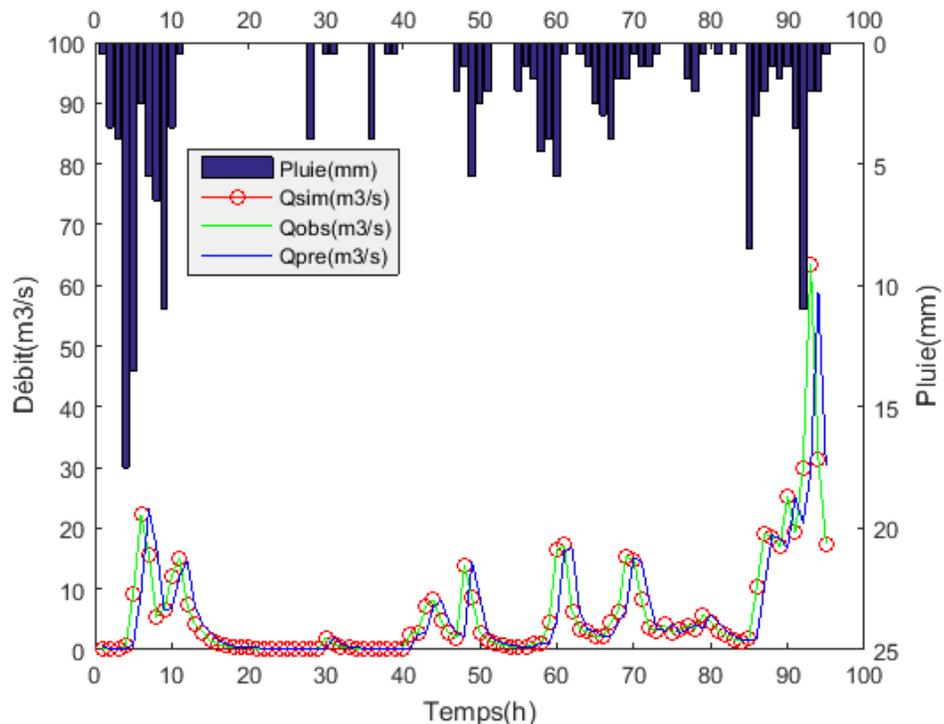


Figure IV-26 : Evolution des débits simulé et observé de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps de (2h)

On remarque qu'avec un pas deux heures, il y a une sous-estimation du débit prévu, mais l'hydrogramme simulé et prévu suivent bien l'observé avec un petit retard en prévision, que l'on peut aussi justifier par les graphiques Q-Qplot qui présentent un R^2 très bonne en simulation, et de qualité acceptable en prévision.

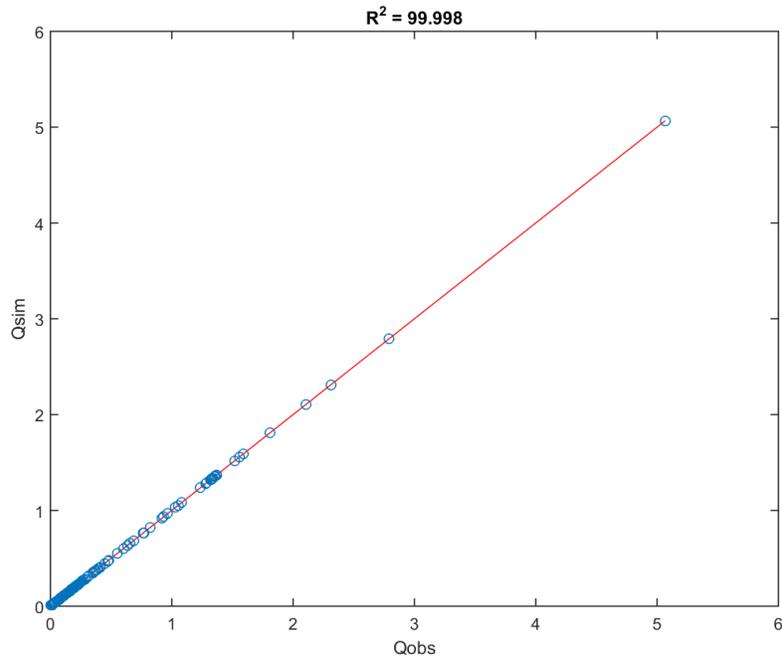


Figure IV-27 : Débit simulé en fonction du débit mesuré au pas de temps de (2h) de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

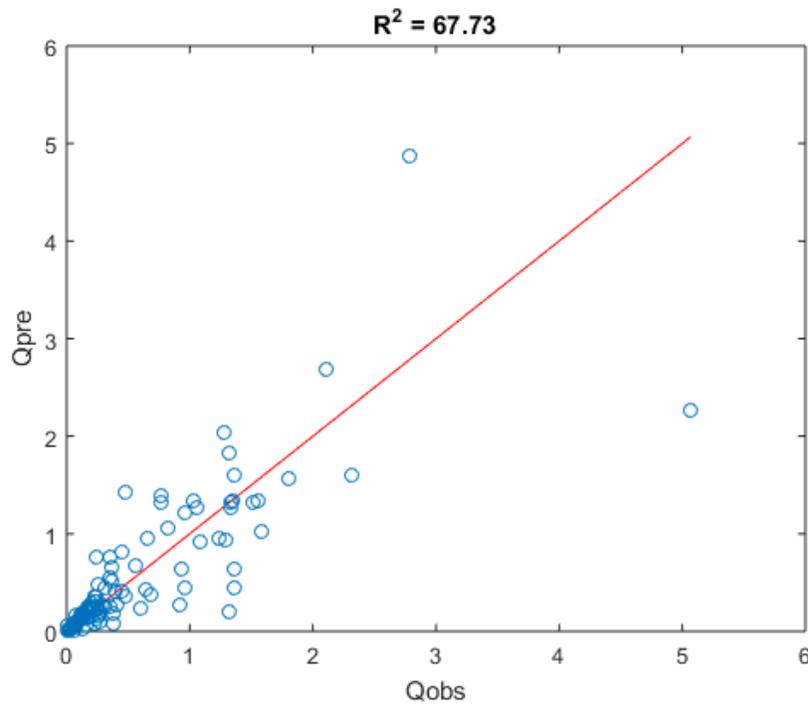


Figure IV-28 : Débit prévu en fonction du débit mesuré au pas de temps de (2h) de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

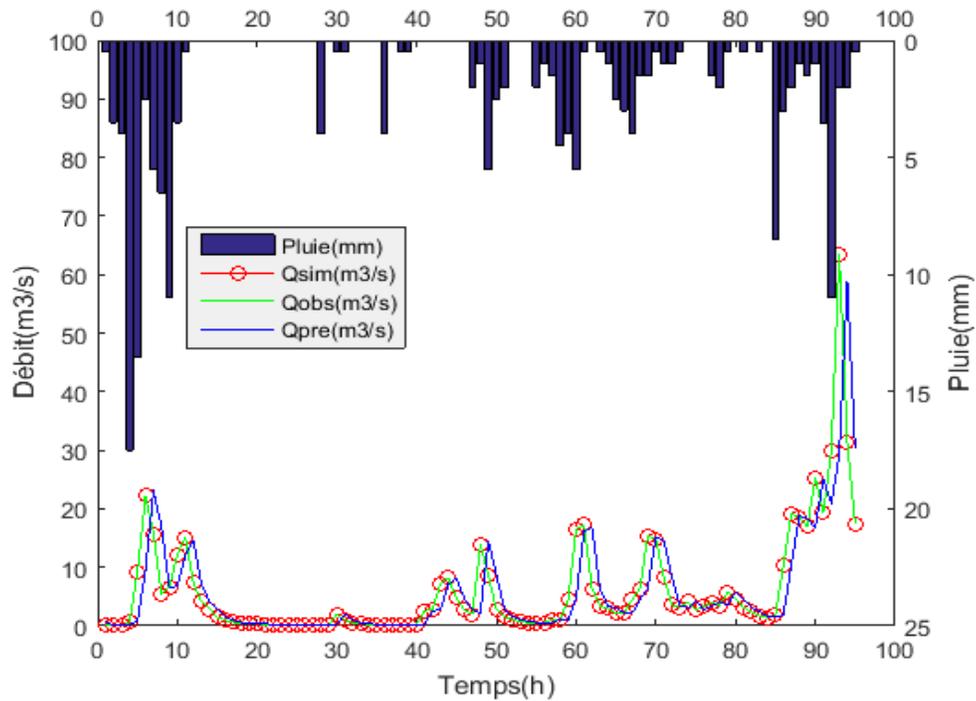


Figure IV-29 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps de (3h)

L'analyse de cette figure au pas de trois heures, montre bien le décalage du fait de la longueur de la série, en plus la sous-estimation des pics apparait clairement, mais en général, la simulation reste très bonne, alors que la prévision est de qualité moindre, ce qui peut se visualiser indéniablement sur les Q-Qplot.

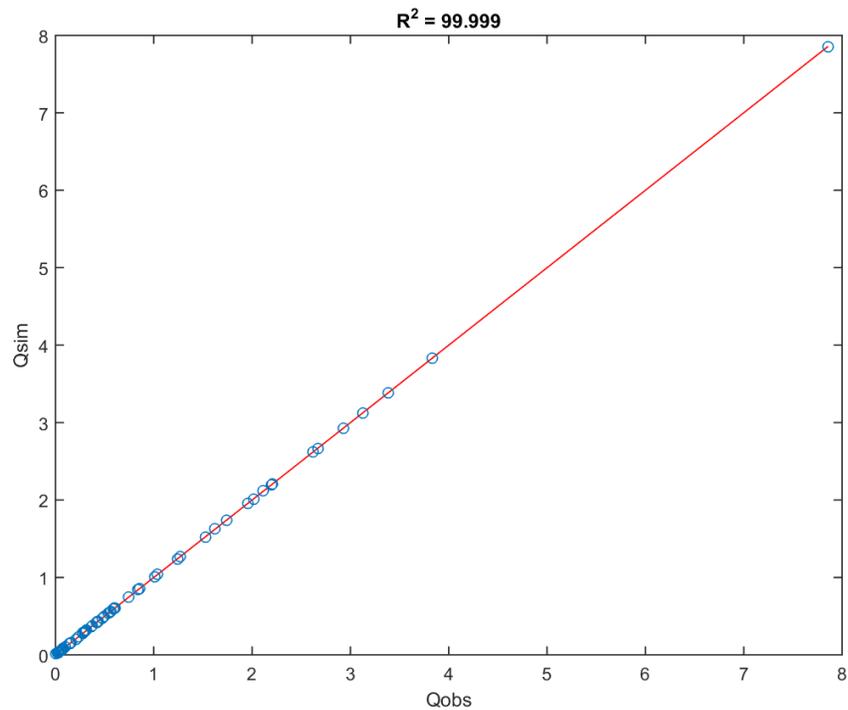


Figure IV-30 : Débit simulé en fonction du débit mesuré au pas de temps de (3h) de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

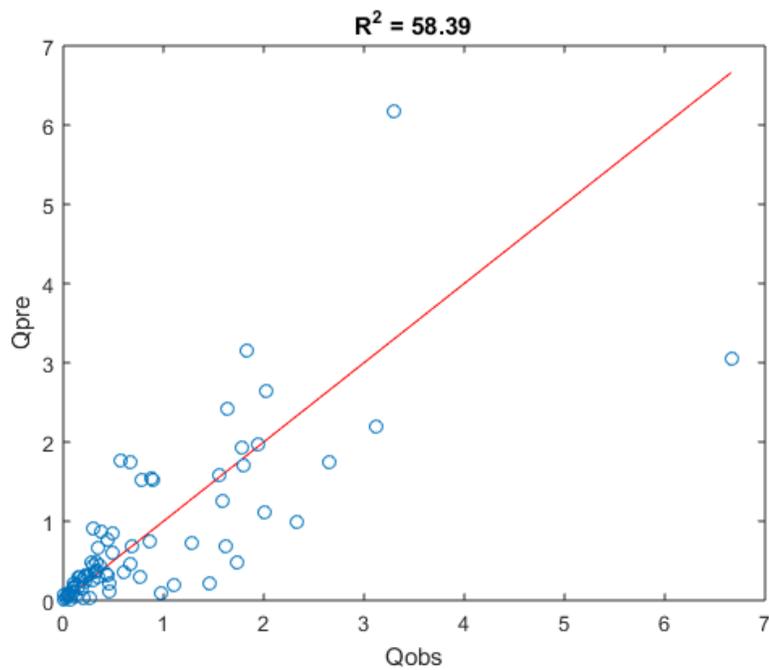


Figure IV-31 : Débit prévu en fonction du débit mesuré au pas de temps de (3h) de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

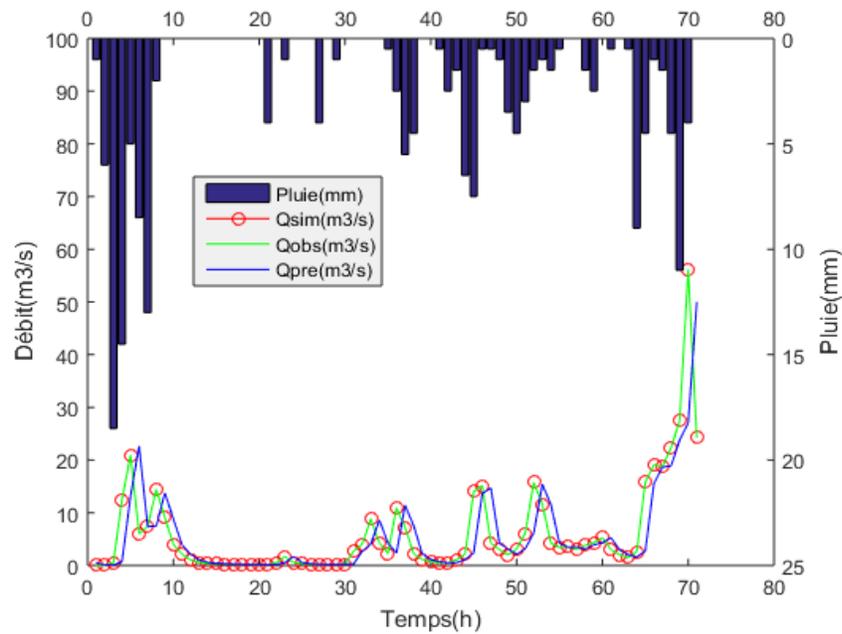


Figure IV-32 : Evolution des débits simulés et observés de l'évènement 3 avec Tank Model couplé au Filtre de Kalman au pas de temps de (4h)

Mêmes remarques que pour le pas de temps de 3h, ou l'on remarque là aussi, l'absence de la qualité de performances en prévision, surtout avec le dernier pic qui donne une vision complète de la performance du modèle avec les pas de temps longs, cependant, dans l'ensemble, on peut voir la reconstruction quasi-parfaite des pics en simulation.

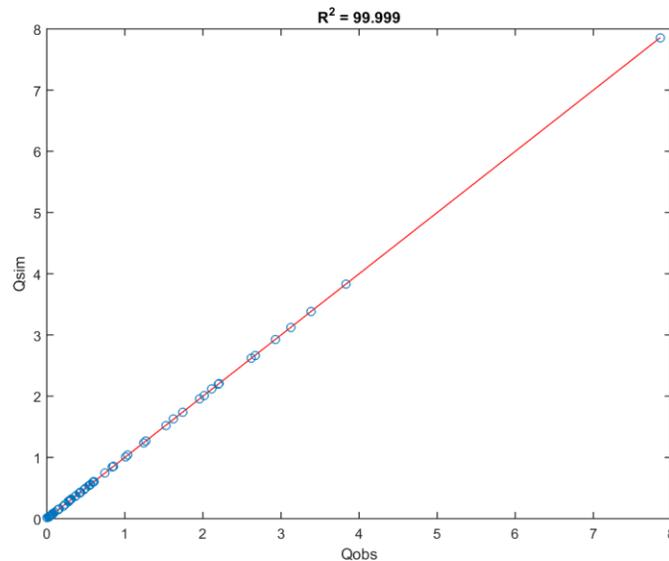


Figure IV-33 : Débit simulé en fonction du débit mesuré au pas de temps de (4h) de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

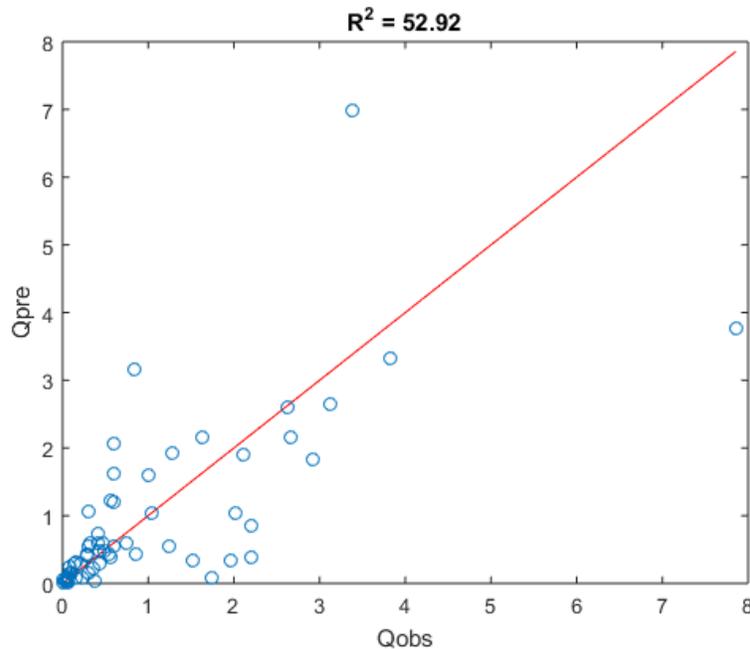


Figure IV-34 : Débit prévu en fonction du débit mesuré au pas de temps de (4h) de l'évènement 3 avec le Tank Model couplé au Filtre de Kalman

Sur le graphe des débits simulé fonction des débits mesuré, nous constatons l'alignement du nuage des données sur la bissectrice avec un coefficient de détermination presque parfait, par contre en prévision avec un délai de quatre heures le modèle couplé atteint la valeur la plus médiocre pour R^2 .

IV-9 Conclusion

Dans ce chapitre après avoir appliqué les deux modèles GR3H et le Tank Model sur trois évènements, où on a utilisé la procédure de filtrage de Kalman avec le Tank Model simple comme une méthode de mise à jour des paramètres de ce dernier, on peut conclure que le Tank Model couplé au filtre de Kalman, a donné les meilleurs résultats, comparé au modèle GR3H et la version simple du Tank Model, en se basant sur les différents critères d'évaluation numériques et graphiques, ainsi que sur les critères ponctuels (paramètres de crue).

Que ce soit en simulation ou en prévision le couplage a pu reproduire les évènements avec une forte corrélation entre les débits mesuré, simulé et prévu, ce qui n'est pas le cas pour le Tank simple et le GR3H.

Et pour étudier l'effet du pas de temps sur la qualité des prévisions, on a utilisé l'évènement 3 en profitant de sa longueur, pour construire des sous-évènements, avec des pas de temps différents

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

(1, 2, 3 et 4h) pour appliquer le modèle couplé, on a constaté, que le pas de temps est influencé par sa durée, ce qui veut dire, qu'au fur et à mesure que celui-ci augmente, la qualité des prévisions décroît, c'est ce qu'on a pu mettre en évidence avec les résultats obtenus et présentés ci-dessus, ou nous avons constaté qu'avec des pas de temps supérieurs à une heure, la qualité de performance du modèle diminue, tout en augmentant les durées séparant les mesures consécutives des débits et des hauteurs des pluies. En effet, plus l'horizon de prévision est grand, plus grandes seront les erreurs commises sur les dernières mesures, ceci se reflète sur les mises à jour du modèle, autrement dit, on se rapproche du fonctionnement sans mise à jour du modèle, soit le mode de simulation avec le Tank Model simple.

Enfin, on peut conclure que le filtre de Kalman standard est un outil fiable pour faire une mise à jour des paramètres du Tank Model simple, tout en introduisant des paramètres initiaux trouvés par calage manuel.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, on a tenté de traiter un problème de prévision de crue à l'aide d'un modèle conceptuel pluie-débit dans une approche comparative.

D'abord, nous avons pu appliquer les deux modèles GR3H et Tank Model simple sur trois évènements différents, ensuite, on a fait le couplage du Tank Model avec le Filtre de Kalman, qui présente le cœur de notre travail, avec une mise à jour des paramètres de ce dernier, en profitant de leur structure linéaire et simple.

Après avoir appliqué ces modèles, nous avons pu faire quelques remarques et observations sur la totalité des évènements :

- ✓ Le modèle GR3H présenté, est un outil de modélisation hydrologique fiable, en le comparant au Tank Model simple, mais il s'avère qu'il ne peut pas être l'outil incontournable pour la prévision des crues, vu sa structure un peu compliquée. En outre, il est difficile d'utiliser le modèle GR3H en mode adaptatif ;
- ✓ Le Tank Model simple, sans une procédure de mise à jour, donne des résultats d'une qualité médiocre, cela peut s'expliquer par le fait que l'initialisation du modèle en mode évènementiel, est très difficile, puisqu'on ne connaît pas l'état du bassin versant lors de la collection des données des évènements, et c'est aussi valable pour le modèle GR3H ;
- ✓ La combinaison entre le mode adaptatif et le mode de simulation présenté dans notre cas par le couplage du Filtre de Kalman, avec la version simple du Tank Model, permet d'obtenir des résultats très fiables en mode évènementiel, par l'ajustement des paramètres du modèle sur chaque pas de temps. L'effet de la procédure du Filtrage de Kalman, et son énorme puissance à faire des simulations parfaites, est remarquable dans une vue générale. De plus pour la prévision, on a constaté que le Filtre a pu prévoir les débits des crues mais avec un décalage temporel ou en amplitude, cela peut être dû à la phase d'initialisation des états internes du modèle et de ses paramètres ;
- ✓ Dans cette étude, on a choisi d'utiliser le pas de temps d'une heure, mais ceci est insatisfaisant pour anticiper les crues catastrophiques pour faire des mesures de préventions des risques, c'est pour ça qu'on a procédé à prolonger le pas de temps d'étude à d'autres horizons de prévision. Cette démarche nous a permis de conclure, que plus l'horizon est grand, plus la qualité des prévisions est médiocre ;
- ✓ Le problème auquel on a fait face dans ce projet de fin d'études, est celle de l'initialisation des états internes et des paramètres des modèles, comme cités ci-dessus

avec les deux modèles (avec ou sans mise à jour), c'est-à-dire d'utiliser le modèle en mode évènementiel, nous voyons que l'utilisation du mode continu sera bien pour la prévision en temps réel des crues, ou pour anticiper les débits d'étiages, donc en éliminant un tel problème d'initialisation.

Pour généraliser les résultats obtenus dans ce mémoire, il faut que l'application du filtre de Kalman passe par une variété de bassins versants algériens, et pour bien adapter la structure aux conditions initiales, nous devons disposer d'une grande base des données des débits et des précipitations et d'autres facteurs essentiels lors de l'assimilation des données en temps réel pour construire un système de prévision des crues en basant sur une structure conviviale du Tank Model pour simuler les événements crues et faire des anticipations des débits à venir.

Pour la prévision des crues, l'utilisation des modèles conceptuels adaptables avec des procédures de mise à jour tel que le filtre de Kalman pour des pas de temps courts présente une utilité en termes de gestion des risques engendrés par ce phénomène.

BIBLIOGRAPHIE

AGRICULTURE., E. E. Crues et sécheresses. In.

AMIRECHE, M. MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT A DIFFERENTS PAS DE TEMPS PAR LES MODELES CONCEPTUELS, NEUROFLOUS ET PAR LE FILTRE DE KALMAN. Thèse de Doctorat genie civil.Ouargla kasdi Merbah, 2018, 192p.

ARNAUD, P. Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation stochastique des pluies horaires: extension de sa zone de validité (pourtour méditerranéen français), paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. Doctorat Mécanique génie mécanique génie civil, formation doctorale ..., 1997.

BECHIRI, N. Evolution du chimisme des eaux de surface et Souterraines dans le bassin versant de la Seybouse (Nord-Est Algérien). memoire de magister:Géologie.Annaba: Université Badji Mokhtar-Annaba. , 2011, 102p.

BOUDAUD, M. AND M. GHEBRIOUA. Détermination de la structure du Tank Model couplé au filtre de Kalman pour un bassin versant Algérien de grande superficie. Application au bassin versant de Biskra. Memoire d'Ingéniorat:Hydraulique.Alger: Ecole nationale Polytechnique Alger, 2017, 96p.

DARRAS, T. Prévion des crues rapides par apprentissage statistique. 2016.

DJEBALI, K. Contribution à l'étude de l'aléa " inondations": Genèse et prédiction Cas de la vallée d'El-Abadia (w.Ain Defla).Departement Amenagement et Genie Hydraulique. Ecole Natinale superieur de L'hydraulique ENSH-BLIDA 2015, 112p.

EURONEWS. Catastrophes naturelles : "les inondations sont la plus grande menace". . In., 2018.

FOUCHIER, C. Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse de Master Doctorat Université Montpellier II, 2010.

FOURMIGUÉ, P. AND J. LAVABRE Prévion de crues avec le modçle conceptuel pluie-débit GR3H. Adaptabilité aux incertitudes sur la pluie. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 2005, 18(1), 87-102, <https://doi.org/10.7202/705551ar>.

GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN AND P. O. YAPO Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. Journal of hydrologic engineering, 1999, 4(2), 135-143p.

LEE, Y. AND V. SINGH Tank model using Kalman filter. Journal of hydrologic engineering, 1999, 4(4), 344-349.

LIU, J., C. D. DOAN AND S.-Y. LIONG Conceptual rainfall-runoff model with Kalman filter for parameter and outflow updating. Advances in Geosciences: Hydrological Science (HS), 2011, 23, 133-146p.

LOUAMRI, A. Le bassin-versant de la Seybouse (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux. These de Doctorat:AMENAGEMENT DU TERRITOIRE.Constantine: Université de Constantine, 2013, 315p.

MAKHLOUF, Z. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Paris 11, 1994.

MATHEVET, T. Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Doctorat spécialité Sciences de l'eau, ENGREF Paris, 2005.

MEMENTO DU MAIRE. Les inondations In., 2015.

MORIASI, D. N., M. W. GITAU, N. PAI AND P. DAGGUPATI Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE, 2015, 58(6), 1763-1785.

MOUELHI, S. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Doctorat Géosciences et ressources naturelles, ENGREF Paris, 2003.

MOULAHOU, A. W. Influence des Critères d'Evaluation sur le Calage Automatique des Modèles Conceptuels Globaux

par le Shuffled Complex Evolution (SCE-UA). Memoire d'Ingéniorat Hydraulique.Alger: Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2016, 146p.

OUACHANI, R., Z. BARGAOUI AND T. OUARDA Integration d'un filtre de Kalman dans le modele hydrologique HBV pour la prevision des debits / Integration of a Kalman filter in the HBV hydrological model for runoff forecasting. Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques - HYDROLOG SCI J, 2007, 52, 318-337, 10.1623/hysj.52.2.318.

PERRIN, C. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative Thèse de Doctorat. INPG (Grenoble)/Cemagref (Antony), 2000, 530.

PERRIN, C. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative 2002.

PERRIN, C., C. MICHEL AND V. ANDRÉASSIAN Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 2007.

RADJAH, S. Modélisation pluie-débit par le modèle S.W.A.T (Application au Bassin versant des Issers). Thèse de Master Hydraulique. Alger: Ecole Nationale Polytechnique, 2017, 46p.

SETIAWAN, B. I., T. FUKUDA AND Y. NAKANO Developing procedures for optimization of Tank Model's Parameters. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2003.

SKHAKHFA, I. Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu périurbain. Thèse de Doctorat Hydraulique. Annaba: UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR, 2017, 144p.

SUGAWARA, M. Automatic calibration of the tank model / L'étalonnage automatique d'un modèle à cisterne. Hydrological Sciences Bulletin, [1979/09/01] 1979, 24(3), 375-388, 10.1080/02626667909491876.

TANGARA, M. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Doctorat de l'Ecole pratique des hautes études de Paris, spécialité milieux ..., 2005.

TOUAIBIA, B. EROSION-TRANSPORT SOLIDE IMPACT SUR LES INONDATIONS TORRENTIELLES. Revue LJEE, 2015.

WMO, W. International glossary of hydrology. In.: Geneva: WMO, 1974.

YANG, X. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. Ecole nationale des ponts et chaussées-ENPC PARIS/MARNE LA VALLEE, 1993.

YTOUI, Y. MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT AUX PAS DE TEMPS MENSUEL ET JOURNALIER PAR LES MODELES CONCEPTUELS ET NEUROFLOUS (Application au bassin versant de l'ISSER). Projet de Fin d'Etudes pour Ingénieur en Hydraulique Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2012, 95p.