

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

**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.**

Réalisé par : **BOUDAUD Mehdi
GHEBRIOUA Mahdi**

Sous la direction de **Mr A.BERMAD
Mr M.AMIRECHE**

Présenté et soutenu publiquement le 17/06/2017

Composition du Jury :

Président	Mr A. BALI	Professeur	ENP
Promoteur	Mr A. BERMAD	Professeur	ENP
Co-promoteur	Mr M. AMIRECHE	MAA	Univ. Oum El Bouaghi
Examineur	Mr A. LEFKIR	MCA	ENSTP

ENP 2017

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

**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.**

Réalisé par : **BOUDAUD Mehdi
GHEBRIOUA Mahdi**

Sous la direction de **Mr A.BERMAD
Mr M.AMIRECHE**

Présenté et soutenu publiquement le 17/06/2017

Composition du Jury :

Président	Mr A. BALI	Professeur	ENP
Promoteur	Mr A. BERMAD	Professeur	ENP
Co-promoteur	Mr M. AMIRECHE	MAA	Univ. Oum El Bouaghi
Examineur	Mr A. LEFKIR	MCA	ENSTP

ENP 2017

ملخص

النمذجة الهيدرولوجية هي فرع من فروع علم المياه التي يتيح لنا فهم أفضل للتحويل من تدفق الأمطار على نطاق ومستجمعات المياه، ولهذا مزيد من البحوث تم القيام بها لتحقيق نماذج فعالة من شأنها إعادة إنتاج واقع رد مستجمعات المياه، من بين هذه النماذج تعتبر نموذج Tank فعالة لمستجمعات المياه الآسيوية.

نتائج الاختبارات التي أنشئت تشير أولاً على أن نموذج Tank لا يعطي نتائج جيدة لمستجمعات المياه بسكرة رغم اقترانه مع مرشح كالمان لأنه يتم استخدام بنية بسيطة للمناطق الرطبة، خلافاً للبنية المعقدة التي تعتبر فعالة للقاحلة وأعطى نتائج ممتازة مع محاكاة شبه مثالية.

كلمات الدالة : مستجمعات المياه، محاكاة، تانك النموذجي، النمذجة الهيدرولوجية، كالمان تصفية

Abstract

Hydrological modeling is the branch of hydrology that allows us to better understand the transformation of rainfall into flows at the watershed scale, and for this, several research studies have been carried out in order to produce efficient models that really reproduce The response of watersheds, among these models the Tank Model deemed effective for Asian watersheds.

The results of the established tests indicate first of all that the Tank Model does not perform well for the Biskra's watershed despite its coupling with the Kalman filter because the simple structure is used for wet regions, A complex structure that is considered reliable for arid regions and has yielded excellent results with near-perfect simulations.

Keywords: Watershed, Simulation, Tank Model, Hydrological modeling, Kalman filter.

Résumé

La modélisation hydrologique est la branche de l'hydrologie qui nous permet de mieux comprendre la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant, et pour cela plusieurs travaux de recherche ont été fait pour aboutir à des modèles performants qui reproduisent vraiment la réponse des bassins versants, parmi ces modèles le Tank Model jugé performant pour les bassins versants asiatiques.

Les résultats des tests établis indiquent tout d'abord que le Tank Model ne donne pas des bons résultats pour le bassin versant de Biskra et ce malgré son couplage avec le filtre de Kalman car la structure simple est utilisée pour des régions humides, contrairement à la structure complexe jugée fiable pour des régions arides et qui a donné d'excellents résultats avec des simulations quasi-parfaites.

Mots clés : Bassin versant, Simulation, Tank Model, Modélisation hydrologique, Filtre de Kalman.

Remerciement

Nous adressons nos sincères remerciements à notre promoteur Mr. Bermad, nous voudrions également témoigner notre gratitude pour sa patience, et sa disponibilité et ses conseils avisés qui nous ont été précieux afin de mener ce travail à bon port.

Nos remerciements s'adressent à Mr. Lefkir et Mr. Amireche, pour le temps qu'ils ont accordé à l'évaluation de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, nos profondes reconnaissances à tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et particulièrement ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Dédicaces

Mehdi BOUDAUD

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 mes très chères frères et soeurs.

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

Mahdi GHEBRIOUA

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon grand père

A toute ma famille.

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

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	11
1 Problématique Pluie-Débit et Modélisation Hydrologique	13
1.1 Introduction	13
1.2 Qu'est ce que l'hydrologie	13
1.3 Le cycle de l'eau	14
1.4 La modélisation hydrologique	16
1.4.1 Définition	16
1.4.2 Transformation de la pluie en débit	16
1.4.3 Objectif de la modélisation	17
1.4.4 Qu'est ce qu'un modèle	18
1.4.5 Classification des modèles Pluie-Débit	19
Modèle boîte noire	19
Les modèles conceptuels	20
TOPMODEL " les aires contributives saturées "	20
HEC HMS	21
Les modèles empiriques	22
Les modèles GR (génie rural)	22
Les caractéristiques des modèles GR	22
1.4.6 Démarche pour le développement d'un modèle hydrologique	23
Principe de la construction du modèle	23
Principe de calibration du modèle	24
Calage manuel	24
Calage automatique	24
Principe de validation du modèle	24
1.4.7 Les erreurs des modèle Pluie-Débit	25
1.4.8 Les critères d'évaluation d'un modèle Pluie-Débit	25
Evaluation graphique	25
Evaluation statistique	25
Coefficient de détermination	25
Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE	26
Index of agreement :	26

	NSE et D modifié :	27
	Les indices d'erreurs :	27
	Percent Bias(PBIAS) :	27
	RSR :	28
1.4.9	Intervalles d'appréciation des critères de validation :	28
1.5	Conclusion	29
2	Tank Model et filtre de Kalman	30
2.1	Introduction	30
2.2	Tank Model de Sugawara	30
2.2.1	Tank Model pour des régions humides	30
	Les avantages du Tank Model	31
	Les paramètres du Tank Model	31
	Les données nécessaires pour caler le TANK Model	31
	Initialisation et calage des paramètres	31
	La formulation mathématique du Tank Model	31
2.2.2	Tank Model pour des régions arides et semi-arides	35
	La formulation mathématique	36
	Le stockage dans chaque réservoir	36
	Le débit dans chaque sortie latérales	37
	L'infiltration de chaque réservoir	37
	Le débit total	37
2.3	Le filtre de Kalman	37
2.3.1	Introduction	37
2.3.2	Application du filtre de Kalman en Hydrologie	38
2.3.3	Algorithme du filtre de Kalman	40
	Modèle du système	40
	Modèle de mesure	40
	Phase de prédiction	41
	Kalman Gain	41
	Phase de correction	41
2.4	Couplage du Tank Model avec le filtre de Kalman	42
2.4.1	Région Humide	42
	Le modèle du système	42
	Le modèle de mesure	42
2.4.2	Région Aride et Semi-Aride	43
	Le modèle du système	43
	Le modèle de mesure	43
2.5	Conclusion	44
3	présentation de la zone d'étude	45
3.1	Situation Géographique	45
3.2	Étude Géologique	46
3.2.1	Introduction	46
3.2.2	Relief	47

3.2.3	Analyse Lithostratigraphique	47
	Le Crétacé supérieur	48
	Les formations du Tertiaire (CENOZOIQUE)	48
	Paléogène (LE NUMMULITIQUE)	48
	Le Néogène :	49
	Le Miocène marin :	49
	Le Miocène continental :	49
3.2.4	CONCLUSION	50
3.3	Hydrogéologie	51
3.3.1	La nappe phréatique du qatarienne	51
3.3.2	La nappe profonde	51
3.3.3	La nappe calcaire	51
3.3.4	La nappe du Miopliocène	51
3.4	Étude Hydrologique	52
3.4.1	Régime hydrologique en Algérie	52
3.4.2	Bassin versant d'Oued Biskra	54
3.4.3	Étude Climatologique	56
	Introduction	56
	Étude des Précipitations	56
	Étude des précipitations moyennes annuelles	56
	Étude des précipitations moyennes mensuelles	58
	Étude des précipitations saisonnières	59
	Étude des Températures	60
	L'humidité relative	60
	Indice d'Aridité	62
	Indice d'Aridité annuel de De.MARTONNE	62
	Indice d'aridité mensuelle de De.MARTONNE	63
	L'évapotranspiration potentielle	64
	Formule de Thornthwaite :	64
	Méthode de Turc :	64
	La formule d'Oudin :	66
	Conclusion	66
3.4.4	Collecte et Critique des données	67
	Introduction	67
	Collecte des données	67
	le choix des stations pluviométriques	69
	Critique des données	69
	Test de Grubbs et Beck	69
	Résultat du test de Grubbs et Becks	70
3.5	Conclusion	72
4	Applications, Observations et Discussions	73
4.1	Introduction	73
4.2	Tank Model(structure simple)	73
4.2.1	Application	73

4.2.2	Observations et Discussions	75
4.3	Application du Multi-Tank Model pour le bassin versant de Biskra .	77
4.3.1	Initialisation du modèle	77
	Résultats et Discussions	79
	Conclusion	79
4.3.2	Couplage du Tank Model avec le filtre de Kalman	80
	Initialisation	80
	Résultats et Discussions	81
4.4	Application du Multi-Tank Model pour le bassin versant de Bou- cheghouf	84
4.4.1	Initialisation des paramètres	84
	Observations et Discussions	86
4.4.2	couplage avec le filtre de Kalman	87
	Initialisation	87
	Résultats et Discussions	87
4.5	Conclusion	89
	Conclusion générale	90
	Bibliographie	92

Table des figures

1.1	Le cycle hydrologique	15
1.2	La démarche de la modélisation	23
2.1	Schéma représentant le Tank Model	31
3.1	Carte de situation géographique de la ville de Biskra (H.P.E 2005)	46
3.2	Principaux ensembles géo-structuraux de l'Algérie. (Hadj-Saïd, 2007)	47
3.3	les bassins versants en Algérie	54
3.4	le bassin versant d'oued Biskra	55
3.5	Variations inter-annuelles des précipitations .Station de BATNA . .	57
3.6	Variations inter-annuelles des précipitations .Station de MANAA . .	57
3.7	Variations inter-annuelles des précipitations .Station de DJEMOU- RAH	58
3.8	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles	58
3.9	Histogramme des précipitations moyennes saisonnières	60
3.10	Variation mensuelle des températures (1973-1978)	61
3.11	Évolution de l'évapotranspiration journalière (Formule d'Oudin) . .	65
3.12	Localisation des stations pluviométriques	68
3.13	Hydrogramme de la station de Djemourah	71
4.1	Évolution du débit en phase de calage	75
4.2	Évolution du débit en phase de validation	76
4.3	Comparaison des débits observés et simulés	76
4.4	Évolution du débit lors de l'initialisation	79
4.5	Évolution du débit en phase de calage	82
4.6	Évolution du débit en phase de validation	82
4.7	Comparaison entre les débits observés et simulés	83
4.8	Évolution du débit lors de l'initialisation	86
4.9	Évolution du débit en phase de calage	88
4.10	Évolution du débit en phase de validation	88
4.11	Comparaison entre les débits observés et simulés	89

Liste des tableaux

1.1	Intervalles d'appréciation des critères de validation	28
2.1	Valeurs des paramètres initiales suggérées par Sugawara	33
3.1	Caractéristiques des sous bassins de l'Oued Biskra	55
3.2	Précipitations moyennes annuelles (mm), relevées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH	56
3.3	Précipitations moyennes mensuelles (mm), relevées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH	59
3.4	Précipitations saisonnière (mm), relevées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH	59
3.5	Températures moyennes mensuelles (1973-1978)	60
3.6	Humidités relatives moyennes (1973-1978)	61
3.7	Tableau d'indice d'aridité	62
3.8	Indices d'aridité mensuelle	63
3.9	Stations hydrométriques du bassin versant d'Oued Biskra	67
3.10	Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin de Biskra .	68
3.11	Résultat de Grubbs et Beck	70
4.1	Paramètres initiaux du Tank Model	74
4.2	Capacités des stockages initiaux	74
4.3	Critères d'évaluation par le Tank Model	75
4.4	Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 1	77
4.5	Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 2	77
4.6	Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 3	78
4.7	Capacités des stockages initiaux	78
4.8	Les proportions des zones par Trial and Error.	78
4.9	Critères d'évaluation lors de la phase d'initialisation	81
4.10	Critère d'évaluation	81
4.11	Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 1	84
4.12	Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 2	84
4.13	Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 3	85
4.14	Capacités des stockages initiaux	85
4.15	proportions des zones par Trial and Error.	85
4.16	Critères d'évaluation lors de la phase d'initialisation	86
4.17	Critère d'évaluation	87

Introduction Générale

La Terre est la seule planète du système solaire à disposer, grâce à sa position privilégiée, d'eau liquide à sa surface. La petite molécule H₂O y est indispensable pour le développement de la vie. Habitat d'une partie de la faune et de la flore, vecteur de matières, érodant et modifiant les paysages, élément vital d'alimentation, l'eau devient de plus en plus, avec l'accroissement de la population humaine sur Terre, une denrée convoitée. L'eau douce, objet principal d'enjeux, ne constitue que 3 % de la ressource mondiale (le restant étant formé par les mers et les océans), dont les trois quarts sont stockés sous forme de glace.

Sa répartition quantitative à l'échelle du globe est très hétérogène, et souvent très différente de la répartition des populations. Enjeu de vie, l'eau devient de plus en plus une question politique, source de tensions croissantes entre États.

Le cours d'eau constitue un objet d'intérêt privilégié, en raison de l'accès aisé qu'il offre à la ressource. La connaissance de son débit est aujourd'hui un instrument indispensable à la gestion des systèmes aquatiques (notamment pour la prévision de débits, la gestion d'ouvrages de retenue, le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, etc.). De nombreuses recherches se sont donc attachées, depuis plus d'un siècle, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant, entité hydrologique de production et de concentration des écoulements. Un moyen pour arriver à comprendre la génération des débits et pour en établir des simulations est de remonter jusqu'à leur cause première, les pluies. Ainsi, les chercheurs ont essayé de construire des modèles permettant d'obtenir une représentation simplifiée et facilement utilisable de ce lien entre pluie et débit. Cependant, comme d'autres disciplines s'attachant à comprendre et à représenter des systèmes naturels, la modélisation pluie-débit et plus généralement l'hydrologie continentale sont confrontées à la difficulté d'appréhension des systèmes étudiés du fait de leur complexité intrinsèque : leurs caractéristiques spatiales sont très hétérogènes, de nombreux facteurs influencent leur dynamique temporelle et leur observation reste encore aujourd'hui difficile et coûteuse.

De ce fait le modèle pluie-débit trouve sa nécessité dans la mesure où le modèle conçu à partir des chroniques de pluies observées, peut générer des débits qui soient les plus proches possibles des débits observés, c'est à dire à partir des observations de pluie tombée, on peut arriver à reproduire (ou à prédire) la réponse en débit du bassin.

De tels modèles sont particulièrement utiles pour de nombreuses applications, par exemple la prévision des crues, où le fait de remonter à l'origine des débits (les pluies) permet d'allonger le délai de prévision par rapport à des méthodes n'exploitant pas cette information, la prévision des étiages etc.

Décrire la transformation de ces pluies en débits dans les cours d'eau est le sujet de la modélisation pluie-débit. Bien qu'il s'agisse là d'un problème apparemment très ordinaire, aucune solution satisfaisante n'existe à l'heure actuelle pour décrire le mécanisme de cette transformation. Pourtant des décisions d'aménagement, de prévision, de gestion sont à prendre : cela nécessite des modèles.

Notre mémoire de fin d'études, s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit et de sa représentation à l'échelle du bassin versant.

Ce mémoire s'articulera autour de quatre chapitres dans lesquels nous avons exposé l'ensemble du travail réalisé. Dans le premier chapitre nous avons présenté la modélisation hydrologique dans son sens global, et décrit les différents modèles hydrologiques existants.

Les approches théoriques utilisées, pour modéliser la Pluie en Débit, à savoir d'une part, le Tank Model avec ses deux structures (simple pour les régions humides et complexe pour les régions arides et semi-arides), et d'autre part, le Filtre de Kalman et son couplage avec le Tank Model ont fait l'objet du second chapitre.

Le chapitre trois est dédié à la présentation générale du bassin versant étudié, à savoir, ses caractéristiques climatiques et hydrologiques ainsi qu'une analyse statistiques des données hydro climatiques qui seront introduites dans le modèle élaboré.

Dans le chapitre quatre, nous avons présentés les principaux résultats auxquels nous avons abouti, soit sous forme des tableaux des critères d'évaluations numériques avec interprétations et commentaires, et des figures représentant l'évolution des débits simulés et observés par les modèles élaborés, corroborant les résultats numériques.

Enfin, une conclusion générale ressortira les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, ainsi que les perspectives d'amélioration des modèles pluie-débit tant que sur le plan théorique que pratique.

Chapitre 1

Problématique Pluie-Débit et Modélisation Hydrologique

1.1 Introduction

La modélisation hydrologique constitue l'une des principales méthodes permettant de répondre aux enjeux liés à la prédétermination des variables hydrologiques et leurs prévisions, Elle est beaucoup utilisée en complément de l'observation, pour la reconstitution et la vérification des données déjà observées[1].

Elle consiste à développer une représentation mathématique d'un hydro-système à l'échelle du bassin versant[1].

La modélisation a pour objectif de simuler à l'exutoire du bassin versant les débits résultants des divers sollicitations météorologiques[1].

1.2 Qu'est ce que l'hydrologie [1]

L'hydrologie est la science de la terre qui s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol.

Au titre des échanges entre l'atmosphère et la surface terrestre, l'hydrologie s'intéresse aux précipitations (pluie et neige), à la transpiration des végétaux et à l'évaporation directe de la couche terrestre superficielle.

L'hydrologie de surface étudie le ruissellement, les phénomènes d'érosion, les écoulements des cours d'eau et les inondations.

L'hydrologie de subsurface ou hydrologie de la zone non-saturée étudie les processus d'infiltration, de flux d'eau et de transport de polluants au travers de la zone non saturée. Cette zone a une importance fondamentale car elle constitue l'interface entre les eaux de surfaces et de profondeur.

L'hydrologie souterraine ou hydrogéologie porte sur les ressources du sous-sol, leur captage, leur protection et leur renouvellement.

1.3 Le cycle de l'eau [1]

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants.

Le terme "Cycle de l'eau" nécessite la permanence des échanges entre l'eau de surface et l'eau atmosphérique, par un jeu qui combine l'évaporation et les précipitations, alors que l'évaporation qui est causée par le réchauffement de la surface des océans sous l'effet du rayonnement solaire, entraîne la libération de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cette vapeur se déplace ensuite au gré des mouvements des masses d'air par des phénomènes de convection et d'advection. Elle est soumise à des conditions favorables, la vapeur d'eau se condense pour former les nuages qui se déplacent vers les continents et se transforment partiellement en précipitation. Que ces précipitations prennent la forme de neige ou de pluie, la majorité d'entre elles retournent aux océans, qui occupent environ 70% de la surface de la terre.

✓ La précipitation, sous forme de pluie ou de neige, est la source d'apport en eau. Elle dépend principalement des conditions climatiques.

✓ L'évapotranspiration correspond à l'eau qui est transpirée par les plantes et évaporée au niveau du sol. Elle dépend de la température, du type de végétation et des propriétés physiques du sol et aussi du taux d'humidité dans l'air.

✓ Le ruissellement de surface (ou écoulement de surface) survient lors d'un événement de précipitation durant lequel la capacité d'infiltration du sol est atteinte de sorte que l'eau ne peut plus le pénétrer et s'écoule en surface. Il dépend entre autres, du climat, de la pente, du type de sol et ses propriétés physiques, et de l'utilisation du sol.

✓ L'infiltration (qui devient l'écoulement de l'eau souterraine) se divise en deux parties :

- Le ruissellement hypodermique s'effectue près de la surface et il est constitué de l'eau qui s'infiltré dans le sol et qui circule horizontalement dans les couches supérieures jusqu'à ce qu'elle face résurgence à la surface, par la pente du terrain ou dans un cours d'eau, ou bien jusqu'à ce qu'elle s'infiltré plus bas vers l'aquifère.

- La recharge correspond à l'eau qui atteint l'aquifère. Le partage entre le ruissellement hypodermique et la recharge dépend surtout des propriétés hydrogéologiques et des formations géologiques.

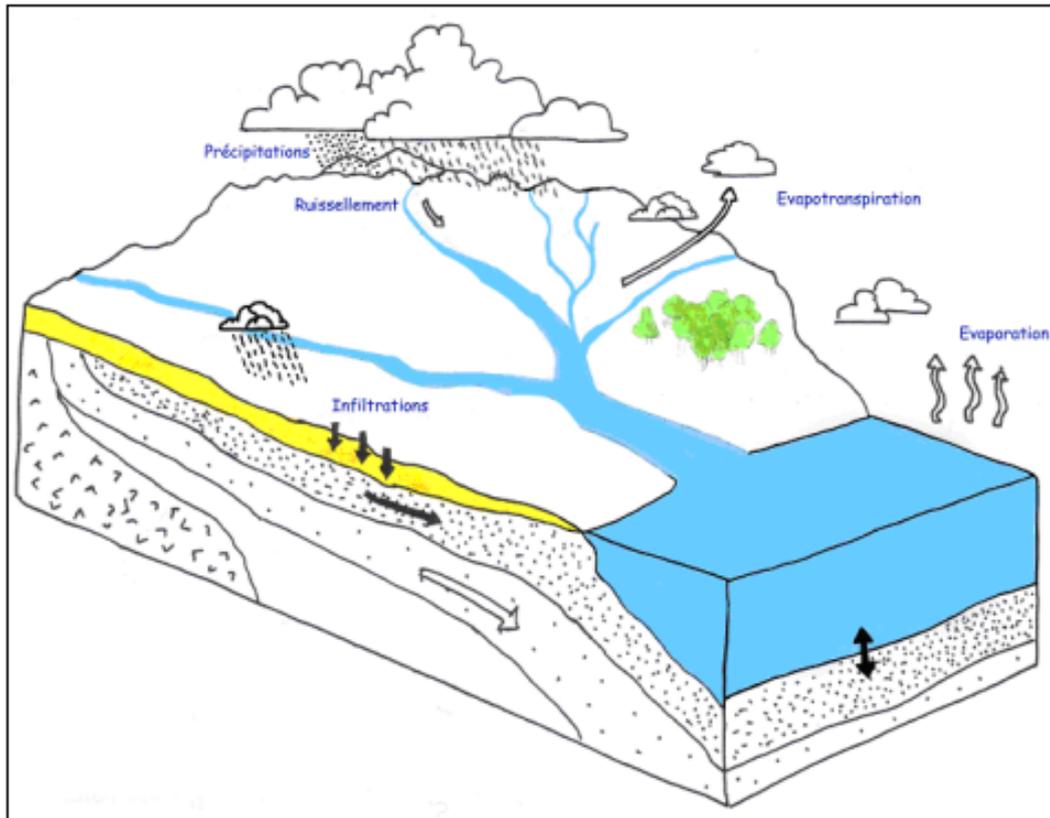


FIGURE 1.1 – Le cycle hydrologique [1]

1.4 La modélisation hydrologique

1.4.1 Définition

La modélisation hydrologique est une activité en Hydrologie. Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques les modèles hydrologiques distribués utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique. L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit a commencé dans les années soixante[1]. Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil « simple » permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc ...)[1].

1.4.2 Transformation de la pluie en débit [2]

La complexité des processus hydrologiques fait que la connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants reste assez mal connue. Les études de terrain menées depuis une cinquantaines d'années sur de petits bassins de recherches ont permis d'apporter des réponses partielles à deux des questions fondamentales qui se posent à l'hydrologue .

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

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

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

✓ La fraction infiltrée contribue par un écoulement beaucoup plus lent à travers les couches superficielles au débit de base et la recharge des nappes. Cette théorie nous permet de distinguer quatre cheminements de l'eau des rivières :

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

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

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

1.4.3 Objectif de la modélisation [3]

La modélisation pluie-débit peut réussir à répondre à de nombreuses questions centrées sur l'eau, gestion des risques et de la ressource notamment. Michel (1989)[4] et Refsgaard et Abbott (1996)[5] répertorient l'essentiel de ces problématiques. Si des aspects de qualité des eaux peuvent être étroitement liés à des aspects de quantité, nous nous intéresserons ici uniquement à une modélisation pluie-débit quantitative, dont nous donnons quelques-unes de ces problématiques :

- ✓ Simulation des débits, pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques.
- ✓ 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 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.
- ✓ Prévision des crues et des étiages : il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin.
- ✓ 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.

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés. Si d'autres approches hydrologiques que la modélisation pluie -débit proposent des réponses à certaines de ces problématiques (analyse fréquentielle statistique sur les débits pour la prédétermination), cette dernière paraît cependant très profitable pour des questions supposant un traitement temporel continu, comme la prévision des débits. Dans ce cas, le fait de remonter à l'origine des débits (la pluie) permet en plus de profiter d'un délai supplémentaire par rapport à des méthodes n'exploitant que l'information sur les débits.

1.4.4 Qu'est ce qu'un modèle [3]

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système physique donnée et des différents processus explicatifs de son fonctionnement. Il est réalisé afin de pouvoir simuler tout ou partie du comportement du système. La présentation du système peut être physique et repose sur un modèle réduit du système. Elle est plus souvent mathématique. Elle est alors formalisée par un ensemble d'équations exprimant les lois ou les concepts jugés utiles pour décrire de façon approprié e son comportement.

Un modèle est constitué :

- ✓ D'un ensemble de variables généralement mesurables choisies pour représenter le phénomène étudié.
- ✓ D'un ensemble de relations mathématiques entre ces variables pour représenter son fonctionnement avec l'intervention de quelques paramètres.

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments :

- ✓ Le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui définissent l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase. Dans notre cas, le système est typiquement le bassin versant défini plus loin.
- ✓ L'objectif de modélisation, pour lequel le modèle est développé.
- ✓ Le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel de la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés.

1.4.5 Classification des modèles Pluie-Débit [3]

Si la modélisation pluie-débit représente un étroit domaine de l'hydrologie, elle n'en est pas moins féconde en termes de production de modèles. Le développement des moyens de calculs informatiques a certainement été l'un des facteurs majeurs ayant favorisé l'essor de ce secteur de recherche depuis le début des années 60, avec la création de dizaines de modèles. Encore aujourd'hui, de nouveaux modèles sont très souvent proposés dans la littérature. Ce foisonnement tient d'une part de la diversité des approches possibles, qui font appel à des concepts et des points de vue différents sur la manière de représenter la réponse d'un bassin versant à des événements de pluie. Il tient certainement d'autre part d'un certain degré d'ignorance sur la meilleure façon de modéliser la relation pluie-débit. Devant la complexité et la diversité des systèmes observés, il est probable cependant que la solution miracle n'existe pas.

Beaucoup de classifications des modèles ont été proposées et il y a presque autant de classifications que d'hydrologues ! La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes, et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuante. Clarke (1973)[6] et Ambroise (1998)[7] 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, 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.

Modèle boîte noire [8]

Propose un schéma sans lien direct avec la réalité. Elle ne fait appel qu'aux seuls variables d'entrée et de sortie d'un bassin sans faire intervenir de données sur sa nature physique. Elle fournit une description purement mathématique et globale de la transformation pluie-débit sans chercher à la décomposer en processus. Son objectif est uniquement d'obtenir des sorties les plus proches possibles des débits

d'un bassin versant réel.

Les modèles conceptuels [8]

Les modèles dit conceptuels, visent à représenter les principaux processus hydrologiques de façon raisonnable sans recourir aux paramètres de la paramétrisation des lois physiques qui les gouvernent.

Les modèles conceptuels considèrent le bassin versant comme une combinaison de réservoirs conceptuels reliant entre eux par les différentes lois d'échange.

La variété des modèles à réservoirs utilisés en modélisation hydrologique est quasi-infinie. Les modèles à réservoirs dit encore modèles capacitifs, se différencient d'abord par la façon dont ils décrivent l'espace. Ils sont la plupart du temps globaux, ils peuvent être distribués ou semi-spatialisés.

Les modèles à réservoirs se différencient ensuite par le degré de simplification retenu pour représenter les processus en jeu, ainsi que par le nombre de réservoirs, la nature des réservoirs et la façon dont les réservoirs sont organisés pour représenter ces processus.

Quel que soit le réservoir impliqué dans la structure d'un modèle à réservoirs, son comportement est régi par un système de trois équations :

- ✓ L'équation de continuité qui exprime la conservation de la masse d'eau pour le réservoir ;
- ✓ Une équation de stockage, reliant le volume stocké dans le réservoir à la hauteur du stock dans le réservoir ;
- ✓ Diverses équations de débit, exprimant les débits en provenance ou à destination d'autres compartiments du système modélisé en fonction de la hauteur du stock dans le réservoir.

TOPMODEL " les aires contributives saturées " [8]

TOPMODEL (Topographie based hydrological MODEL) est un modèle hydrologique initialement développé par (Beven & Kirkby, 1979), (Beven, 1989), (Beven, 1992) à l'Université de Lancaster. Il s'agit d'un modèle pluie-débit qui suit une approche articulée autour de deux idées centrales :

- ✓ Le ruissellement se produit sur des zones contributives variables.
- ✓ La topographie influence la manière dont le ruissellement se produit.

L'originalité de TOPMODEL réside dans la définition de l'indice topographique. Cet indice est un paramètre dynamique qui traduit la propension qu'a un pixel à se saturer plus ou moins vite. TOPMODEL modélise le sol à l'échelle du versant de la façon suivante :

- ✓ La surface du sol donne lieu au ruissellement superficiel (Horton ou Aires contributives saturées).
- ✓ La zone racinaire retient l'eau de pluie en début d'événement.
- ✓ La zone insaturée transfère la pluie infiltrée vers la zone saturée selon l'équation de Darcy.
- ✓ La zone saturée s'écoule vers l'exutoire.

HEC HMS [8]

Ce logiciel a été développé par le HEC (Hydrologic Engineer Center) de US Army corps of Engineers. La première version de ce logiciel est apparue en 1995. Il s'agit d'un modèle pluie débit, constitué par un ensemble de modèles hydrologiques qui permettent de décrire le fonctionnement d'un bassin versant de manière spatialisée. La géométrie du bassin versant peut-être conceptualisée par un ensemble de sous unités hydrologiques liées entre elles par des éléments hydrauliques. Cette description se fait à l'aide d'outils géométriques prédéfinis. La description des pluies se fait par l'introduction d'observations faites sur des pluviographes ou bien de pluies synthétiques.

Chacune des unités hydrologiques ainsi que chacun de ces éléments de liaison sont caractérisés par de multiples modèles de simulation hydrologiques et hydrauliques.

Parmi ces modèles, on trouve :

- ✓ Les modèles de pertes par infiltration, retenue ou évapotranspiration qui permettent d'évaluer le ruissellement : modèle de perte initiale et à taux constant, modèle à déficit et à taux de perte constant, modèle basé sur le Curve Number (CN), modèle de Green et Ampt ;
- ✓ Les modèles de ruissellement direct sur les versants : les modèles liés à la méthode de l'hydro gramme unitaire, le modèle de l'onde cinématique ;
- ✓ Les modèles des écoulements souterrains : le modèle constant, le modèle à récession exponentielle, le modèle à réservoir linéaire ;
- ✓ Les modèles d'hydrologie fluviale dont les équations de base sont celles des écoulements à surface libre : le modèle Muskingum, le modèle du décalage (lag

model), le modèle de l'onde cinématique, le modèle de Muskingum-Cunge; ces modèles prennent en compte la géométrie des tronçons (bifurcations, confluences).

Les modèles empiriques [1]

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydro système considéré. Ils s'expriment la relation entre les variables d'entrées et celles de sorties du système à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré ni à expliquer le fonctionnement de l'hydro système.

Les modèles GR (génie rural) [9]

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

- ✓ Représentation globale du bassin versant ;
- ✓ Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements ;
- ✓ Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples ;
- ✓ Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances ;
- ✓ Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés) ;
- ✓ Evaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

Les caractéristiques des modèles GR [9] :

- Les modèles GR proposent des relations de comportement simples a l'échelle du bassin versant.
- Les modèles GR sont globaux.
- Les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J) et horaire (GR5H) Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

1.4.6 Démarche pour le développement d'un modèle hydrologique [1]

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

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

- ✓ La construction du modèle
- ✓ La calibration du modèle
- ✓ L'évaluation du modèle qui implique sa validation

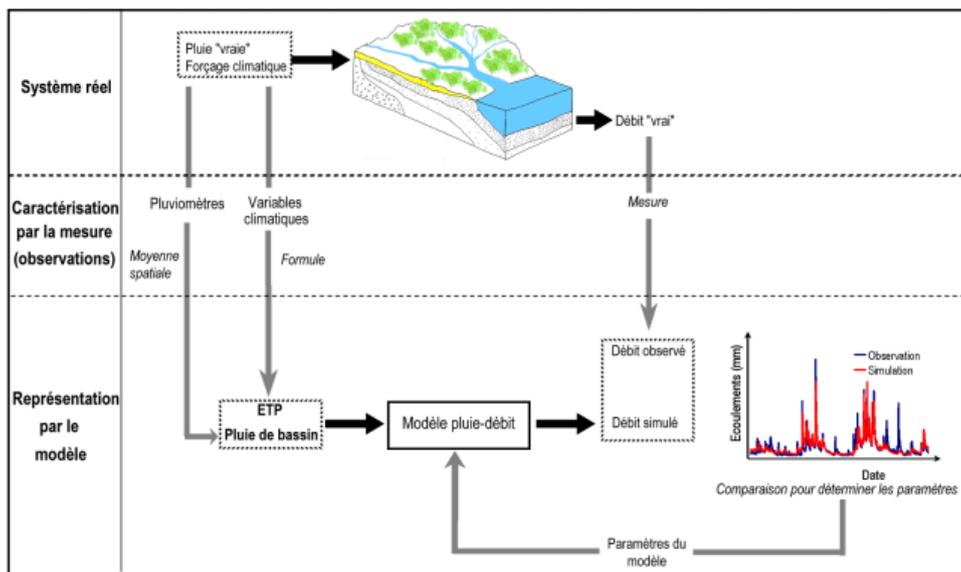


FIGURE 1.2 – La démarche de la modélisation [1]

Principe de la construction du modèle [1]

La construction du modèle consiste à effectuer la schématisation de l'hydro-système 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 prise 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.

Principe de calibration du modèle [1]

la calibration du modèle vise l'optimisation de la structure du modèle et surtout l'estimation des paramètres apparaissent dans chacune des équations du modèle, en chacun des éléments de la discrétisation spatiale. Certains de ces paramètres sont parfois dérivables de données mesurées ou de cartes thématiques disponibles sur le bassin versant. la plupart des paramètres doivent cependant être ajustés par calage.

Suivant la nature du modèle, les paramètres sont soit, calculés directement sur le terrain, soit estimés par calibration (calage) durant une période plus ou moins longue, en optimisant (manuellement ou automatiquement), l'erreur d'ajustement des variables mesurées à leur variables observées. Le but de calage est de se rapprocher le plus possible, le comportement du modèle de celui du bassin modélisé.

Calage manuel [2] Consiste à déterminer un jeu de paramètres par tâtonnement qui lui permet d'obtenir un optimum, ce dernier est réalisé lorsque l'erreur est minimisée entre les données simulées et observées, l'inconvénient de ce calage est qu'il est fastidieux, nécessite un temps relativement long.

Calage automatique [2] Les données simulées sont ajustées aux données observées, au moyen d'un programme informatique, mais il présente certains inconvénients d'être influencé par quelques contraintes :

- ✓ Indépendance des paramètres (autocorrélation) : le changement de valeur d'un paramètre peut être compensé par la modification d'autres paramètres
- ✓ La faible sensibilité de certaines fonctions objectives.
- ✓ La présence d'optima locaux, ou également la présence de plusieurs zones de convergence.

Principe de validation du modèle [1]

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

- ✓ La validité signifie que la représentation du milieu et des processus qui s'y déroulent et plausible ou acceptable. la validation est généralement effectuée en comparant, sur la base de critères choisis et pour diverses variables hydrologiques, les données observées et les données obtenues par simulation en sortie du modèle. Cette validation est effectuée sur un jeu de données autres que celui utilisé pour la calibration du modèle. la validation vise la structure retenue pour décrire le milieu et les processus de même que les valeurs affectées aux différents paramètres du

modèles.

✓ La robustesse et la sensibilité impliquent que les résultats pouvant être obtenus par simulation avec le modèle :

- Ne diverge pas lorsque la valeur des variables d'entrée est légèrement modifiée du fait des erreurs et des incertitudes qui leurs sont associés ;
- Mais qu'ils soient sensibles aux variations des facteurs dont on cherche à estimer les effets.

1.4.7 Les erreurs des modèle Pluie-Débit [10]

Comme pour tout modèle hydrologique, l'extrapolation des résultats basée sur la pluie débit est soumise à une certaine incertitude dont les principales sources sont les erreurs dans la structure du modèle, les erreurs de mesures et/ou de calcul des données d'entrée du modèle, les erreurs de calage et les erreurs d'extrapolation.

1.4.8 Les critères d'évaluation d'un modèle Pluie-Débit [2]

Evaluation graphique

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

Evaluation statistique

Afin de juger la pertinence des modèles, plusieurs critères ont été développés, la validation du modèle est vérifiée par une comparaison des débits calculés et observés et pour cela on va citer quelques critères :

Coefficient de détermination Le coefficient de détermination R^2 est définie comme étant le carré du coefficient de corrélation.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{obs.moy})(Q_{sim.i} - Q_{sim.moy})}{\sqrt{\sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{obs.moy})^2} \sqrt{\sum_1^n (Q_{sim.i} - Q_{sim.moy})^2}} \right]^2 \quad (1.1)$$

$Q_{obs.i}$: le débit observé à la journée i.

$Q_{obs.moy}$: le débit observé moyen.

$Q_{sim.i}$: le débit simulé (calculé) à la journée i .

$Q_{sim.moy}$: le simulé (calculé) moyen.

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

$$0 < R^2 < 1$$

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

Coefficient de NASH-SUTCLIEFFE Proposé par Nash et Sutcliffe en 1970, c'est un critère qui 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 :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{sim.i})^2}{\sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{obs.moy})^2} \right] \quad (1.2)$$

- ✓ Le NSE varie entre $-\infty$ et 1
- ✓ Un NSE proche de 1 représente une très bonne simulation.
- ✓ Un NSE < 0 indique que la moyenne des observations représente un meilleur indice que la valeur simulée par le modèle, ce qui représente 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.

Index of agreement : Proposé par Willmot (1981). C'est une mesure standardisée de l'erreur de prédiction du modèle.

Il représente le rapport de l'erreur quadratique moyenne par l'erreur potentielle (Willmot, 1984) :

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{sim.i})^2}{\sum_1^n (|Q_{obs.i} - Q_{sim.moy}| + |Q_{obs.i} - Q_{obs.moy}|)} \right] \quad (1.3)$$

L'erreur potentielle représente la plus grande valeur que peut atteindre l'erreur quadratique. L'erreur quadratique moyenne au numérateur fait que le « D » est

sensible aux pics et insensible aux étiages.

Les inconvénients de ce critère sont : l'insensibilité aux sous/surestimations des prédictions et qu'il donne dans certains cas une valeur supérieure à 0.65 malgré que le modèle ne donne pas de bonnes simulations.

NSE et D modifié :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_1^n |Q_{obs.i} - Q_{sim.i}|}{\sum_1^n |Q_{obs.i} - Q_{obs.moy}|} \right] \quad (1.4)$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_1^n |Q_{obs.i} - Q_{sim.i}|}{\sum_1^n |Q_{obs.i} - Q_{sim.moy}| + |Q_{obs.i} - Q_{obs.moy}|} \right] \quad (1.5)$$

Ces deux critères réduisent la surestimation de l'erreur lors des pics ce qui donne une meilleure évaluation globale.

Les indices d'erreurs :

MAE, MSE, RMSE : L'erreur moyenne absolue, l'erreur quadratique moyenne, et racine de l'erreur quadratique moyenne, sont les indices d'erreurs les plus utilisés. 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.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_1^n |Q_{obs.i} - Q_{sim.i}| \quad (1.6)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{sim.i})^2 \quad (1.7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (Q_{obs.i} - Q_{sim.i})^2} \quad (1.8)$$

Percent Bias(PBIAS) : Mesure la tendance moyenne des valeurs simulées (plus grande ou plus petite) par rapport aux valeurs observées (GUPTA et al., 1999), donc estime la sous/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.

$$PBIAS = \frac{\sum_1^n(Qobs.i - Qsim.i)}{\sum_1^n(Qobs.i)} \quad (1.9)$$

RSR :

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_1^n(Qobs.i - Qsim.i)^2}}{\sqrt{\sum_1^n(Qobs.i - Qobs.moy)^2}} \quad (1.10)$$

Le RSR incorpore les avantages d'un indice d'erreur statistique et d'un facteur de normalisation pour qu'il soit applicable aux différentes variables, en accordant le même poids à tous les débits.

Il varie de la valeur optimale « 0 » qui indique une variation résiduelle nulle et donc un modèle de simulation parfait, à des valeurs positives très grandes.

1.4.9 Intervalles d'appréciation des critères de validation :

TABLE 1.1 – Intervalles d'appréciation des critères de validation

Taux de performance	RSR	NSE	PBIAS(%)
Très bon	0 < RSR < 0.5	0.75 < NSE < 1.0	PBIAS < 10
Bon	0.5 < RSR < 0.6	0.65 < NSE < 0.75	15 < PBIAS < 30
Satisfaisant	0.6 < RSR < 0.7	0.5 < NSE < 0.65	30 < PBIAS < 55
Insatisfaisant	RSR > 0.7	NSE < 0.5	PBIAS > 55

1.5 Conclusion

La modélisation pluie débit met en valeur la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

Nous avons présenté dans ce chapitre le contexte de la modélisation hydrologique, on a défini que ce que ça veut dire une modélisation hydrologique et ses enjeux et objectifs, on a donné quelques exemples de modèles pluie débit et la manière dont ces modèles sont classés et à la fin de ce chapitre on a donné quelques critères d'évaluer la performance des modèles pluie débit .

Chapitre 2

Tank Model et filtre de Kalman

2.1 Introduction

Un modèle pluie débit est un modèle hydrologique mathématique, qui décrit la relation pluie débit au sein du bassin versant, ces derniers sont non linéaires et varient dans le temps, leurs paramètres sont déterminés à partir des séries de données historiques, lors de l'utilisation de ces modèles des erreurs peuvent survenir à cause de l'incertitudes du processus dynamique, et les erreurs de mesures, pour réduire ces erreurs le filtre de kalman pourrait être utilisé.

Le filtre de kalman est un algorithme récursif et de traitement de données optimal. Le filtre de kalman permet de mettre à jour l'état du système avec la disponibilité des données observées.

le tank model est utilisé pour simuler les débits à partir des précipitations et de l'évapotranspiration ,tandis que le filtre de kalman sert à mettre à jour les paramètres du Tank Model.

2.2 Tank Model de Sugawara

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 [11].

Sugawara a développé deux types ; un pour des régions humides ; et un pour des régions arides et semi-arides [11].

2.2.1 Tank Model pour des régions humides

Il est composé de quatre réservoirs posés verticalement en série avec une sortie latérale et une autre à la base de chaque réservoir [11].

La précipitation est mise dans le réservoir supérieur et l'évaporation est soustraite du réservoir supérieur, si le réservoir supérieur est vide l'évaporation sera soustraite du deuxième réservoir, si le deuxième réservoir est vide l'évaporation sera soustraite du troisième réservoir ainsi de suite [11].

Les sorties latérales sont les eaux de ruissellement. La précipitation est mise dans le réservoir supérieur ainsi que l'évaporation sera soustraite à partir du même réservoir et ce dernier se vidange par deux voies, la sortie latérale qui va ruisseler directement pour donner naissance à l'écoulement de surface, la deuxième voie c'est une infiltration par la sortie de la base pour alimenter le deuxième réservoir [11].

Le deuxième réservoir aussi se vidange comme le premier par deux voies, par la sortie latérale qui représente l'écoulement intermédiaire, et une infiltration par le fond pour alimenter le réservoir suivant. Ainsi que le troisième réservoir va se vidanger par deux voies, par la sortie latérale pour donner l'écoulement de sub-base et une infiltration pour alimenter le dernier réservoir. Le quatrième réservoir aussi se vidange par deux voies, la sortie latérale pour donner l'écoulement souterrain [11].

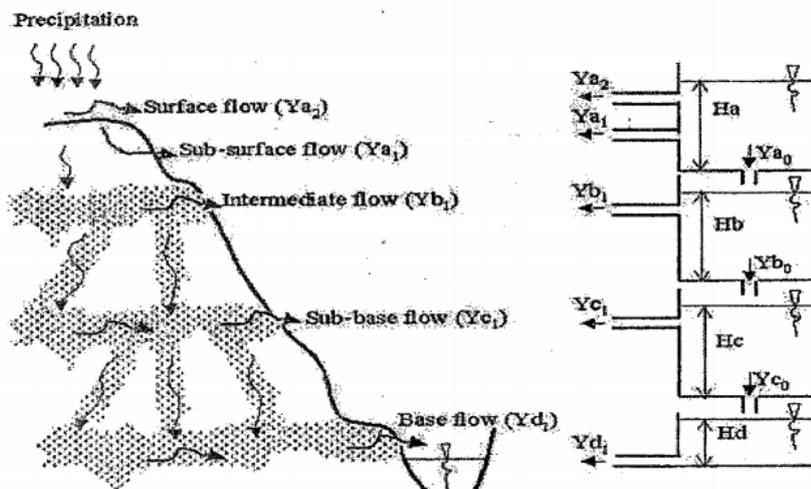


FIGURE 2.1 – Schéma représentant le Tank Model [12]

Les avantages du Tank Model [12]

- ✓ Il est simple et dans certaines mesures il a des caractéristiques raisonnables.
- ✓ Il peut représenter le caractère non linéaire des écoulements de surface.
- ✓ il représente les différents composants de l'écoulement.
- ✓ Le modèle peut être adapté aux bassins expérimentés.

Les paramètres du Tank Model [12]

C'est une notion propre aux modèles conceptuels, ne représentant pas un sens physique et intervient du fait qu'il est impossible de représenter les processus du phénomène. Ces paramètres sont déterminés par une phase de calage.

Dans notre cas d'étude le tank model comporte 18 paramètres à initialiser.

- ✓ Les paramètres des débits (coefficient des débits) : a_{11} , a_{12} , a_2 , a_3 , a_4 ;
- ✓ Les paramètres d'infiltration (coefficient d'infiltration) : b_1 , b_2 , b_3 , b_4 ;
- ✓ Le stockage dans les réservoirs : S_1 , S_2 , S_3 , S_4 ;
- ✓ Les hauteurs des sortie latérales : H_{11} , H_{12} , H_2 , H_3 , et H_4 qui représentent la hauteur des orifices (H_4 est toujours égale à zéro).

Les données nécessaires pour caler le TANK Model [12]

- ✓ Les données journalières des précipitations dans le bassin versant (mm/j).
- ✓ Les données journalière des débits en (mm/j).
- ✓ Les données journalière d'évapotranspiration (mm/j).
- ✓ La topographie et la morphologie du bassin versant.

Initialisation et calage des paramètres [11]

Le système Tank Model est non linéaire et les mathématiques sont presque inutile 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*).

L'étalonnage et l'initialisation du Tank Model est une tâche très simple. Bien sur que le premier, le deuxième et le troisième essai ne donneront pas de bons résultats mais nous pouvons apporter des modifications aux paramètres du modèle, cependant après quelques essais le résultat devra devenir bon.

TABLE 2.1 – Valeurs des paramètres initiales suggérées par Sugawara 12

Le paramètre	La valeur initiale	Max	Min
a_{11}	0.1	0	1
a_{12}	0.1	0	1
a_2	0.03	0	1
a_3	0.006	0	1
a_4	0.001	0	1
b_1	0.2	0	1
b_2	0.06	0	1
b_3	0.012	0	1
H_{11}	15	5	60
H_{12}	25	25	60
H_2	15	0	30
H_3	15	0	60

La formulation mathématique du Tank Model [13]

Supposant qu'au temps t les stockages dans chaque réservoir sont respectivement $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$ et les débits sortant de chaque réservoirs sont $Q_{11}(t)$, $Q_{12}(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$, $Q_4(t)$ et la somme de ces cinq débits représente le débit ruisselé au temps t . L'infiltration à partir de chaque réservoir est $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$, et $f_4(t)$, et $R(t)$ et $ETP(t)$ représentent la pluie et l'évapotranspiration au temps t .

Le stockage dans chaque réservoir au temps $t + 1$

Le réservoir 1 :

$$S_1(t + 1) = S_1(t) - ETP(t + 1) + R(t + 1) - Q_{11}(t) - Q_{12}(t) - f_1(t) \quad (2.1)$$

Le réservoir 2 :

$$S_2(t + 1) = S_2(t) + f_1(t) - Q_2(t) - f_2(t) \quad (2.2)$$

Le réservoir 3 :

$$S_3(t + 1) = S_3(t) + f_2(t) - Q_3(t) - f_3(t) \quad (2.3)$$

Le réservoir 4 :

$$S_4(t + 1) = S_4(t) + f_3(t) - Q_4(t) - f_4(t) \quad (2.4)$$

L'infiltration à partir de chaque réservoir au temps t

$$f_1(t) = S_1(t) \times b_1 \quad (2.5)$$

$$f_2(t) = S_2(t) \times b_2 \quad (2.6)$$

$$f_3(t) = S_3(t) \times b_3 \quad (2.7)$$

$$f_4(t) = S_4(t) \times b_4 \quad (2.8)$$

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

Le réservoir 1 :

$$Q_{11}(t) = a_{11} \times (S_1(t) - H_{11}) \quad Si \quad S_1(t) > H_{11} \quad (2.9)$$

$$Q_{11}(t) = 0 \quad Sinon$$

$$Q_{12}(t) = a_{12} \times (S_1(t) - H_{12}) \quad Si \quad S_1(t) > H_{12} \quad (2.10)$$

$$Q_{12}(t) = 0 \quad Sinon$$

Le réservoir 2 :

$$Q_2(t) = a_2 \times (S_2(t) - H_2) \quad Si \quad S_2(t) > H_2 \quad (2.11)$$

$$Q_2(t) = 0 \quad Sinon$$

Le réservoir 3 :

$$Q_3(t) = a_3 \times (S_3(t) - H_3) \quad Si \quad S_3(t) > H_3 \quad (2.12)$$

$$Q_3(t) = 0 \quad Sinon$$

Le réservoir 4 :

$$Q_4(t) = a_4 \times (S_4(t) - H_4) \quad Si \quad S_4(t) > H_4 \quad (2.13)$$

$$Q_4(t) = 0 \quad Sinon$$

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

$$Q_T(t) = Q_{11}(t) + Q_{12}(t) + Q_2(t) + Q_3(t) + Q_4(t) \quad (2.14)$$

Le Tank Model déjà décrit est appliqué pour analyser des débits journaliers à partir des données de pluie et d'évapotranspiration journalières.

Pour l'analyse des inondations le Tank Model sera utilisé avec des données (pluie, évapotranspiration) horaires ainsi que les débits seront de même unité, mais avec une structure un peu différente composé de deux réservoirs au lieu de quatre réservoirs.

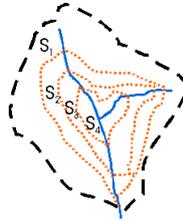
2.2.2 Tank Model pour des régions arides et semi-arides

Dans les régions arides ou semi-arides où l'évapotranspiration annuelle est supérieure à la précipitation annuelle, les zones montagneuses deviennent plus sèches à cause du déplacement des eaux souterraines qui se déplacent vers le bas par gravité, les zones proches des rivières restent humides car elles reçoivent des eaux souterraines [11].

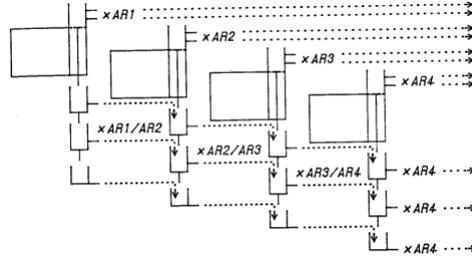
Pendant les saisons humides, le pourcentage des surfaces humides augmente ainsi que l'écoulement de surface contrairement aux saisons sèches où le pourcentage des surfaces sèches augmente avec la diminution de l'écoulement avec augmentation de l'évaporation dans les zones humides [7].

Des dispositions plus complexes sont nécessaires. Si des périodes sèches prolongées caractérisent une région, deux ensembles de réservoirs, ou plus, sont disposés en parallèle. Pour chaque ensemble, les écoulements par le bas se font de la même manière que dans le modèle simple. Chaque réservoir de chaque ensemble contribue, par son écoulement latéral, à l'alimentation du réservoir correspondant de l'ensemble voisin, sauf que tous les écoulements latéraux des réservoirs du dernier ensemble vont directement dans le réseau hydrographique. De plus, l'écoulement latéral (orifice du haut) du réservoir supérieur de chaque ensemble alimente directement le réseau hydrographique. Chaque ensemble est considéré comme représentant d'une zone du bassin, le plus bas correspondant à la zone la plus proche des cours d'eau. Lorsque les variations saisonnières font évoluer les conditions climatiques vers la sécheresse, la zone avoisinant les cours d'eau peut rester relativement humide après que celle qui en est la plus éloignée s'est asséchée. Les auteurs du modèle ne prétendent pas que la représentation au moyen de réservoirs est parfaitement conforme à la réalité, mais plutôt que la configuration des réservoirs est une approximation qui présente quelque analogie avec la méthode des différences finies. En outre, les formulations mathématiques qui définissent l'écoulement de

l'eau dans les réservoirs ressemblent aux concepts de l'hydrologie classique [11].



(a) Le découpage des zones [11]



(b) Schéma représentant le Multi-Tank Model [11]

Dans la première zone l'entrée et la sortie du modèle (précipitation, évapotranspiration et débit) est mesuré en unité de hauteur d'eau, mais pour transférer l'eau vers la zone suivante, nous devons convertir en unité de volume en multipliant les débits sortant de chaque réservoir par la surface de la zone [11].

Les débits de la première zone sont transférés en volume dans le réservoir correspondant de la deuxième zone et puis reconvertis en unité de hauteur en divisant par la surface de la deuxième zone [11].

Par conséquent les sorties des réservoirs inférieurs de la première zone sont multipliées par $AR1/AR2$ avant qu'il ne soit versé dans le deuxième réservoir [11].

La formulation mathématique

Ce type est composé de deux ou plusieurs ensembles de réservoir seront regroupés pour bien modéliser le phénomène pluie débit.

Le stockage dans chaque réservoir au temps $t + 1$

Pour le 1^{er} ensemble (la 1^{ère} zone), ça sera exactement comme les formule du Tank Model simple.

Pour le 2^{ème} et le 3^{ème} ensembles, les débits latéraux sortant des ensembles

précédant entrent en jeu, on prend pour notation i qui signifie l'ensemble :

$$S_{i.1}(t+1) = S_{i.1}(t) + ETP(t+1) + R_i(t+1) - Q_{i.1}(t) - Q_{i.2}(t) - f_{i.1}(t) \quad (2.15)$$

$$S_{i.2}(t+1) = S_{i.2}(t) + F_{i.1} - Q_{i.3}(t) - F_{i.2}(t) + Q_{i-1.3}(t) \frac{AR_{i-1}}{AR_i} \quad (2.16)$$

$$S_{i.3}(t+1) = S_{i.3}(t) + F_{i.2} - Q_{i.4}(t) - F_{i.3}(t) + Q_{i-1.4}(t) \frac{AR_{i-1}}{AR_i} \quad (2.17)$$

$$S_{i.4}(t+1) = S_{i.4}(t) + F_{i.3} - Q_{i.5}(t) - F_{i.4}(t) + Q_{i-1.5}(t) \frac{AR_{i-1}}{AR_i} \quad (2.18)$$

Le débit dans chaque sortie latérales au temps t

Pour les réservoir supérieur :

$$Q_{i.1}(t) = a_{i.1} (S_{i.1}(t) - H_{i.1}) \quad (2.19)$$

$$Q_{i.2}(t) = a_{i.2} (S_{i.1}(t) - H_{i.2}) \quad (2.20)$$

Pour $j = 3, 4, 5$:

$$Q_{ij}(t) = a_{ij} (S_{ij}(t) - H_{ij}) \quad (2.21)$$

L'infiltration de chaque réservoir au temps t

Pour $1 \leq i, j \leq 4$

$$F_{ij}(t) = S_{ij}(t) \times b_{ij} \quad (2.22)$$

Le débit total au temps t :

$$Q_T = (Q_{11} + Q_{12})AR_1 + (Q_{21} + Q_{22})AR_2 + \left(\sum_{j=1}^{j=5} Q_{3.j} \right) AR_3 \quad (2.23)$$

2.3 Le filtre de Kalman

2.3.1 Introduction

Le filtre de Kalman est un outil mathématique puissant et particulièrement utile dans le monde de l'embarqué. Il permet en effet d'estimer l'état d'un système, en fonction de son état précédent, des commandes appliquées et de mesures bruitées [14].

La gestion des crues nécessite des prévisions en temps réel des débits des bassins versants. Le filtre de Kalman (Kalman, 1960)[15] est l'un des outils statistiques utilisés à cet effet depuis 1960 dans le domaine de la propagation des crues et depuis 1980 dans le domaine de la transformation pluie-débit. Il permet de prendre

en compte l'information acquise en temps réel pour l'amélioration de la prévision des débits futurs [14].

La modélisation de la réponse d'un bassin versant aux forçages atmosphériques, ou modélisation pluie-débit, en raison de la complexité des processus transformant la pluie en débit, introduit beaucoup d'incertitudes dans les sorties (Drécourt, 2003). Nash & Sutcliffe (1970) ont déjà affirmé que la prévision opérationnelle des crues exige, en plus du modèle pluie-débit, une méthode pour la correction continue de la prévision à partir de l'erreur observée des premières prévisions (feedback). Ainsi la performance de la prévision des modèles pluie-débit peut être améliorée avec l'aide de cette information provenant de ce feedback. Les procédures de mise à jour actualisent une ou plusieurs des variables suivantes : variables d'entrée, variables d'état, paramètres, ou variables de sortie [14].

Parmi les techniques permettant de réduire ces incertitudes figurent les procédures de mise à jour qu'on peut combiner avec le modèle pluie-débit. Ces procédures peuvent être représentées soit par des méthodes automatisées (par exemple le filtre de Kalman) soit par des méthodes manuellement interactives (par exemple l'essai-erreur). Le filtre de Kalman est l'un des algorithmes d'estimation optimale les plus utilisés pour l'estimation de l'état du système à partir de (Bras & Rodriguez, 1993) [14] :

- ✓ l'équation d'état ou d'évolution et la loi de comportement pour les sorties en fonction des variables d'état [14].
- ✓ les hypothèses sur les caractéristiques des erreurs de modélisation et de mesure [14].
- ✓ les informations sur les conditions initiales. On parle de filtrage lorsque l'instant auquel l'estimation est réalisée correspond à celui où les observations sont obtenues [14].

2.3.2 Application du filtre de Kalman en Hydrologie

"Les techniques d'assimilation des données sont couramment employées dans des domaines aussi différents que l'hydrologie, la médecine ou la physique spatiale, notamment pour l'estimation des trajectoires lorsque les moyens de mesure sont multiples (Boudevillain, 2003)[16]. Le filtre de Kalman est adapté au filtrage linéaire récursif de données discrètes. Le filtre fournit une estimation du vecteur d'état et de sa matrice de covariance des erreurs qui contient les informations concernant la précision des variables.

Pour les systèmes linéaires, c'est le filtre de Kalman standard qui est appliqué. Cependant, pour les systèmes non-linéaires, une variante du filtre, qui est le filtre de Kalman étendu, et dans laquelle le modèle est linéarisé pourrait être envisagée. Plusieurs nouvelles variantes du filtre de Kalman sous-optimal ont été développées durant les dernières années, tels que le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) et le

filtre de rang réduit. Ces variantes ont été principalement appliquées en météorologie et en océanographie (Hoteit, 2001), mais jusqu'ici leur emploi en modélisation hydrologique est limité.

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses études utilisant le filtre de Kalman dans la modélisation pluie-débit (Bàlint, 2002)[17] ont été présentées dans la littérature. Un grand nombre de ces études a utilisé des modèles très simples de prévision du débit, tel que les modèles à moyenne mobile auto-regressive (ARMA) et les modèles à réservoir linéaire. Peu d'études ont été réalisées sur le filtre de Kalman en combinaison avec des approches plus avancées de modèle conceptuel pluie-débit. Quelques exemples importants et représentatifs des filtres de Kalman en combinaison avec des modèles pluie-débit sont les contributions de Wood & Szöllösi-Nagy (1978) et Kitanidis & Bras (1980a,b). Un filtre Kalman étendu a été intégré dans le Système de Prévision de Rivière du Service National Météo (NWSRFS) des Etats Unis qui est basé sur le modèle conceptuel non-linéaire Sacramento d'humidité du sol. L'état du système y est représenté par le contenu en eau dans les différents réservoirs constituant le modèle et les sorties sont les débits. Wood & O'Connell (1985) ont intégré dans le NWSRFS un filtre de Kalman standard. Ils ont testé différentes méthodes pour l'estimation simultanée des variables d'état et des paramètres. Les concepts de l'hydrogramme unitaire et de la précipitation antérieure ont été utilisés par Husain avec un filtre de Kalman standard pour simuler divers événements de crue. Georgakakos (1986a,b) a développé un modèle hydrométéorologique conceptuel qui consiste en un modèle de la précipitation, un modèle d'humidité du sol (une modification du modèle Sacramento d'humidité du sol) et un modèle d'acheminement de l'écoulement. Le modèle stochastique a été traduit en une forme d'état spatial et a été utilisé en combinaison avec un filtre de Kalman étendu, donnant une bonne performance comparativement à d'autres méthodes de prévision. Le même modèle conceptuel a été utilisé par Puente & Bras (1987) pour tester plusieurs variantes du filtre de Kalman non-linéaire. Georgakakos & Smith (1990)[18] ont utilisé le même modèle d'humidité du sol et un modèle d'écoulement en combinaison avec un filtre de Kalman étendu. Ils rapportent une prévision généralement améliorée et concluent que cette approche est faisable dans un environnement opérationnel pour la prévision en temps réel. Lee & Singh ont intégré un filtre de Kalman standard avec le modèle de la cascade de réservoirs linéaires de Nash (Lee & Singh, 1998)[19] et un modèle à réservoir (Lee & Singh, 1999). Ils ont trouvé que la précision des deux modèles a augmenté, son incertitude ayant été réduite. Un filtre de Kalman standard a été intégré avec succès dans le modèle conceptuel pluie-débit IHACRES par Schreider et al. (2001). Quesney et al. (2000) ont utilisé un filtre de Kalman étendu pour l'assimilation de mesures d'humidité de surface (par télédétection Radar ERS/SAR) dans un modèle hydrologique conceptuel global. Un modèle dynamique linéaire spatio-temporel a été développé par Amisigo & van de Giesen (2005) pour combler les lacunes dans des séries de débit journalier. Ils utilisent à cet effet un filtre de Kalman pour l'estimation des variables d'état.

Il y a peu d'exemples qui illustrent la capacité d'un filtre de Kalman d'ensemble en modélisation pluie-débit. Cependant un des exemples en hydrologie est présenté par Hartnack & Madsen (2001)[20] où un filtre de Kalman d'ensemble a été utilisé pour améliorer la performance de la partie hydraulique du modèle MIKE 11. Les tests qui ont été exécutés admettent l'existence d'erreurs dans la condition aux limites du débit du modèle MIKE 11 et proposent de les rectifier en utilisant le niveau d'eau et les mesures de débit. Les auteurs concluent que la performance totale du filtre était très satisfaisante dans tous les tests réalisés. Un autre exemple tout récent est présenté par Moradkhani et al. (2005) qui utilisent une approche d'estimation paramètre-état basée sur le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) pour l'estimation séquentielle à la fois des paramètres et des variables d'états d'un modèle hydrologique conceptuel. Troch et al. (2003)[21], dans un essai sur les méthodes d'assimilation dans la modélisation hydrologique, affirment que l'accent devrait être mis dans les études futures sur l'intégration à l'échelle du bassin versant du filtre de Kalman à travers la modélisation pluie-débit." [14]

2.3.3 Algorithme du filtre de Kalman [13]

Le filtre de Kalman est composé de deux modèles : modèle du système et modèle de mesure.

Modèle du système

$$X(k) = \Phi(k|k-1)X(k-1) + \Gamma(k|k-1)W(k-1) \quad (2.24)$$

- $X(k)$ le vecteur d'état a l'instant k .
- $X(k-1)$ le vecteur d'état qui précède.
- $\Phi(k|k-1)$ la matrice de transition a l'état actuel.
- $\Gamma(k|k-1)$ la matrice de transition de l'erreur précédente a l'erreur actuelle.
- $W(k-1)$ le vecteur d'erreur propre au système (bruit gaussien).

Modèle de mesure

$$z(k) = H(k)X(k) + v(k) \quad (2.25)$$

- $z(k)$ le vecteur des observations (mesures), c'est une combinaison entre le vecteur d'état et celui de l'erreur.
- $H(k)$ le vecteur de transition des mesures.
- $X(k)$ le vecteur d'état.

$v(k)$ erreur propre à la mesure.

Les erreurs $w(k)$ et $v(k)$ sont des bruits gaussiens qui suivent une distribution normale

$$P(W(k)) \sim N(0, M(k))$$

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

L'algorithme du filtre de Kalman est bien décrit par Boudevillain (2003) et Welch & Bishop (2003). Le filtre fonctionne suivant deux étapes. La première est une phase de prévision ; la seconde, une phase de validation suivie d'une phase d'estimation. S'agissant d'un filtre récursif (itératif), l'état estimé à l'instant $t - 1$ est utilisé dans la phase de prévision à l'instant t .

Phase de prédiction

Dans cette partie, On fait une prédiction de l'estimation courante $X(k|k - 1)$ à partir de l'estimation précédente $X(k - 1|k - 1)$:

$$X(k|k - 1) = \Phi(k|k - 1)X(k - 1|k - 1) \quad (2.26)$$

De même, il faut prédire la matrice de covariance de l'erreur courante $P(k|k - 1)$ à partir de la précédente $P(k - 1|k - 1)$:

$$P(k|k - 1) = \Phi(k|k - 1)P(k - 1|k - 1)\Phi(k|k - 1)^T + M(k - 1) \quad (2.27)$$

Kalman Gain

Maintenant que l'on a nos prédictions, il faut calculer le gain de Kalman K :

$$K(k|k) = P(k|k - 1)H(k)^T[H(k)P(k|k - 1)H(k)^T + R(k)] \quad (2.28)$$

Phase de correction

Une fois le Kalman Gain est calculé, il faut mettre à jour afin de prendre en compte la nouvelle mesure effectuée :

$$X(k|k) = X(k|k - 1) + K(k)[z(k) - H(k)X(k|k - 1)] \quad (2.29)$$

$$P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k - 1) \quad (2.30)$$

Les résultats de cette étape seront les entrées initiales à prédire et à corriger pour l'étape suivante.

2.4 Couplage du Tank Model avec le filtre de Kalman

Cette section décrit comment le TANK mModel est incorporé avec le filtre de Kalman. 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 les paramètres du tank model.

2.4.1 Région Humide [13]

Le modèle du système

Le vecteur d'état est composé des 13 paramètres du Tank Model, c'est un vecteur colonne :

$$X(k) = [a_{11} \ a_{12} \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ H_{11} \ H_{12} \ H_2 \ H_3 \ H_4]^T$$

La matrice de transition $\Phi(k)$ est une matrice identité (14×14) ainsi que la matrice de transition de l'erreur $\Gamma(k)$ propre au modèle.

Le modèle du système sera :

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

Le modèle de mesure

La mesure est l'observation dans notre cas d'étude correspond aux débits

$$Q_T = z(k) = H(k) X(k) + v(k)$$

$H(k)$ vecteur ligne (14,1) correspond à la différence entre le stockage et la hauteur des orifices de sortie de débit dans chaque réservoir.

$$H(k) = [h_{11} \ h_{12} \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Avec :

$$h_{11} = S_1 - H_{11}; \quad h_{12} = S_1 - H_{12}; \quad h_2 = S_2 - H_2; \quad h_3 = S_3 - H_3; \quad h_4 = S_4 - H_4.$$

2.4.2 Région Aride et Semi-Aride

Le modèle du système

Le vecteur d'état est composé des 39 paramètres du Tank Model ($F_{i,4} = 0$), c'est un vecteur colonne :

$$X(k) = [a_{11} \ a_{12} \ \dots \ a_{21} \ a_{22} \ \dots \ a_{31} \ a_{32} \ \dots \ H_{34} \ H_{35}]^T$$

La matrice de transition $\Phi(k)$ est une matrice identité (39×39) ainsi que la matrice de transition de l'erreur $\Gamma(k)$ propre au modèle.

Le modèle du système sera :

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

Le modèle de mesure

La mesure est l'observation dans notre cas d'étude correspond aux débits

$$Q_T = z(k) = H(k) X(k) + v(k)$$

$H(k)$ vecteur ligne (39,1) correspond à la différence entre le stockage et la hauteur des orifices de sortie de débit dans chaque réservoir.

$$H(k) = [h_{11} \ h_{12} \ 0 \ \dots \ 0 \ h_{21} \ h_{22} \ 0 \ \dots \ 0 \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33} \ h_{34} \ h_{35}]$$

Avec :

$$h_{ij} = \begin{cases} S_{i,1} - H_{ij} & \text{si } j = 1, 2 \\ S_{ij} - H_{ij} & \text{si } j = 3, 4, 5 \end{cases}$$

Pour $i = 1, 2, 3$

2.5 Conclusion

Le Tank Model du fait de sa construction complexe, et son grand nombre de paramètres à caler reste l'inconvénient de ce modèle, malgré les bons résultats obtenus pour les bassins versants Asiatiques.

Le filtre de Kalman est utilisé principalement lorsque la modélisation donne des résultats médiocres afin d'améliorer ces derniers, en corrigeant le vecteur d'état qui contient les paramètres initiaux du modèle.

Chapitre 3

présentation de la zone d'étude

3.1 Situation Géographique

La Wilaya de Biskra se situe au Sud-Est de l'Algérie, elle occupe une superficie de 21671 Km^2 , son altitude est de 128 mètres/au niveau de la mer. (ANAT). Biskra se localise dans les coordonnées géographiques 34 degré 48'Nord et 054 degré 4'Est.

La wilaya de Biskra est limitée :

- ✓ Au Nord : par la wilaya de Batna et de M'sila.
- ✓ Au Sud : par la wilaya de Ouargla et d'El-Oued.
- ✓ A L'Est : par la wilaya de Khenchela.
- ✓ A L'Ouest : par la wilaya de Djelfa.

La zone d'étude, circonscrite dans la wilaya de Biskra, est située au Sud-Est de l'Algérie, à environ 480 km au Sud-Est d'Alger.

D'une superficie de 127.55 Km^2 , la ville de Biskra est limitée au Nord, par la commune de Branis, au Nord-Ouest par la commune d'El Outaya, à l'Est par la commune de Chetma, au Sud-Est par la commune de Sidi Okba, au Sud- Ouest par la commune d'Oumache et à l'Ouest par la commune d'El Hadjeb. (Fig 3.1).

3.2. ÉTUDE GÉOLOGIQUE

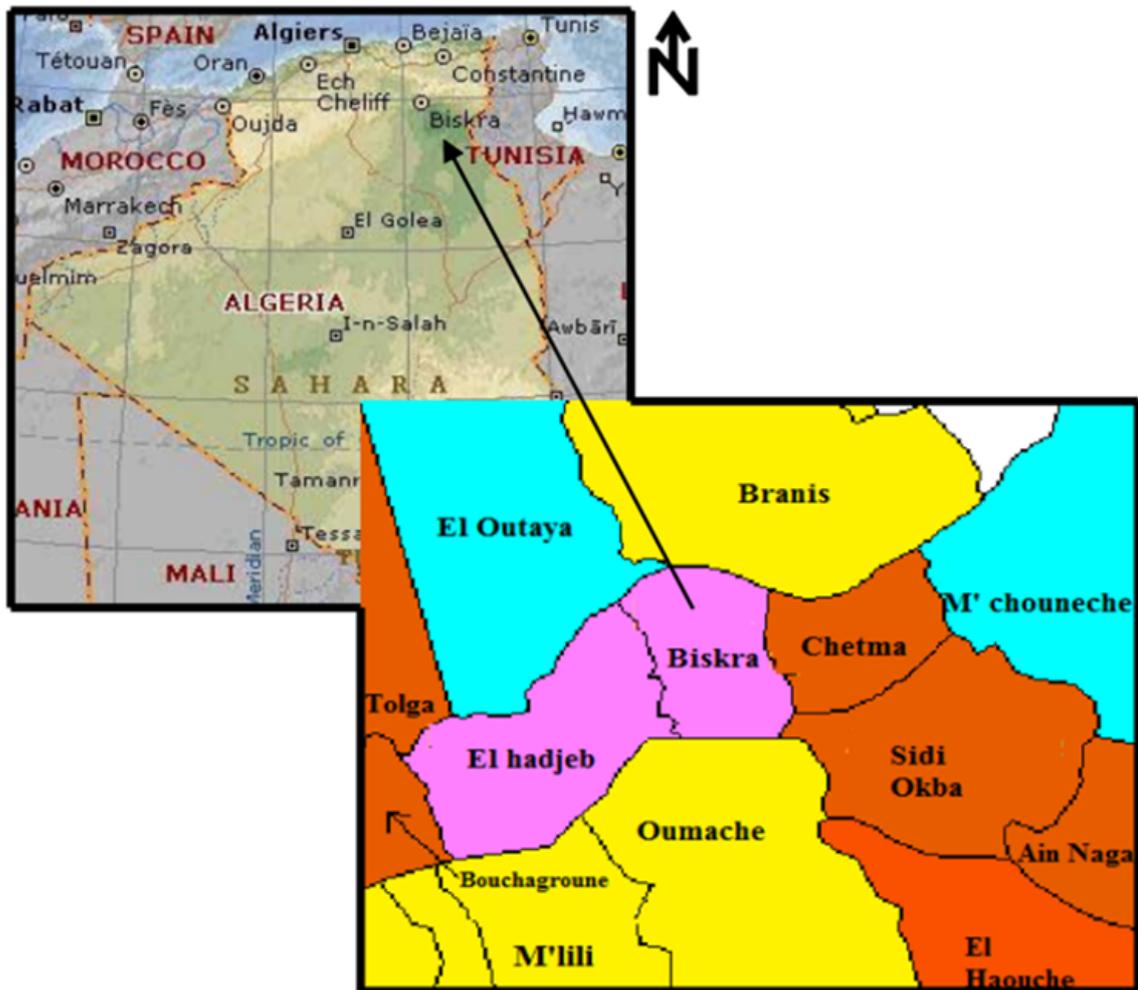


FIGURE 3.1 – Carte de situation géographique de la ville de Biskra (H.P.E 2005) [22].

3.2 Étude Géologique [22]

3.2.1 Introduction

Du point de vue géologique, la région de Biskra représente un pays de transition structurale et sédimentaire, au Nord c'est un pays montagneux, tandis qu'au Sud, c'est un pays effondré, qui fait partie du Sahara Septentrional. Le passage entre ces deux domaines distincts se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de flexures, de plis-failles et de failles, d'orientation Est-Ouest, appelées « accidents sud atlasiques » (Fig 3.2).

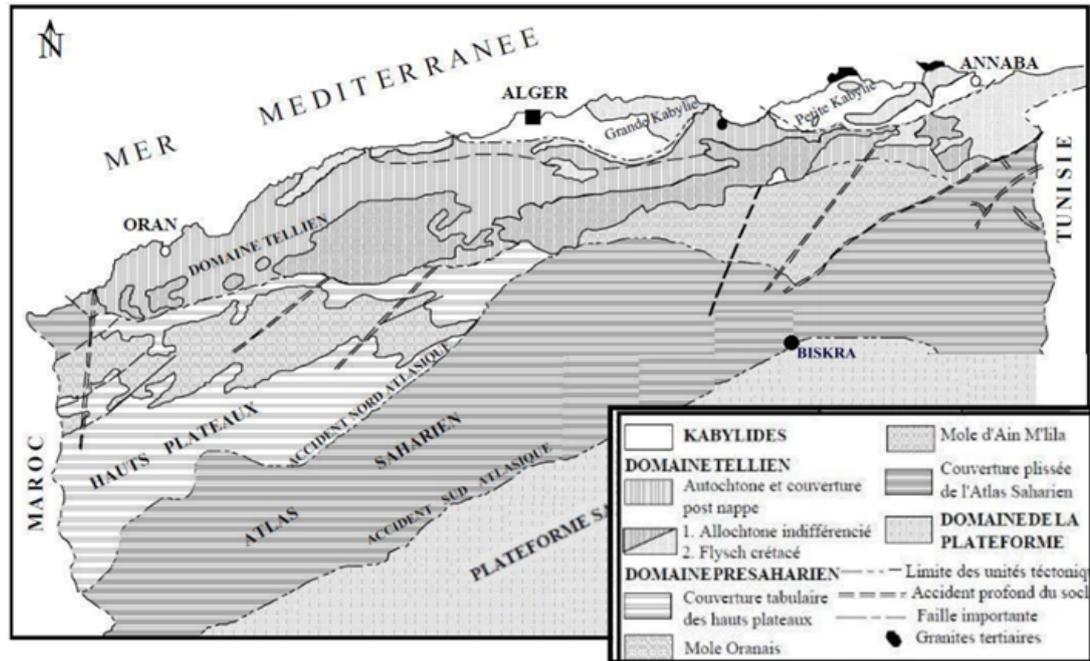


FIGURE 3.2 – Principaux ensembles géo-structuraux de l’Algérie. (Hadj-Saïd, 2007) [22]

3.2.2 Relief

La région de Biskra constitue la transition entre les domaines atlasiques plissés du nord et les étendues plates et désertiques du Sahara au sud.

- ✓ Une zone montagneuse au nord du bassin.
- ✓ Une zone de plateau localisé à l’ouest.
- ✓ Une zone de plaine dans la partie centrale.
- ✓ Une zone de dépression dans le sud.

3.2.3 Analyse Lithostratigraphique

La région de Biskra forme une zone de transition progressive entre le domaine atlasique et le domaine saharien septentrional (Fig 3.2), car la continuité géologique de part et d’autre de l’accident sud atlasique est vérifiée entre Branis et Chetma. C’est une région « syn-orogénique », liée principalement à la tectonique de l’orogénèse atlasique (alpine). A tous moments, les phénomènes tectoniques syn sédimentaires d’ampleurs diverses, commandent la sédimentation, par conséquent le devenir des bassins. Les relations tectonique-sédimentation sont étroitement liées. La région a vécu du Miocène au Quaternaire et en partie à l’actuel. Elle appartient à un ensemble d’aires sédimentaires, plus ou moins indépendantes qui se sont surimposées à l’orogénèse tellienne ou hercynienne.

La série lithostratigraphique comprend de bas en haut les termes suivants :

Le Crétacé supérieur

Le Sénonien : il existe dans tous les synclinaux de l'Aurès ainsi qu'autour des anticlinaux. Il est très épais (2000m en moyenne) et occupe en affleurement des surfaces considérables. Sa partie supérieure, formée généralement de calcaires massifs, donne des crêtes immenses et continues qui sont un des éléments caractéristiques de l'orographie de la région.

Au Nord-Est d'El Outaya, au Djebel el Mellah, le noyau de percement triasique a amené en affleurement un petit îlot de marnes noires et de calcaires crayeux assez fossilifères, situé au pied de cette montagne, attribué par R. Laffite au Campanien. Au Nord et à l'Est de ces marnes, affleurent des calcaires massifs que cet auteur, à cause de leur position au dessus du Campanien et de leur faciès, attribuait au Maestrichtien. Sur le versant nord de l'anticlinal de Boughezal, le Sénonien est représenté par d'importantes masses calcaires maestrichtiennes, sur une épaisseur de 400 à 500m environ, en même temps que se développe un faciès à rudistes exceptionnel. (A.Haouchine, 2010).

Les formations du Tertiaire (CENOZOIQUE)

Paléogène (LE NUMMULITIQUE)

Série marine du Nummulitique (Eocène inférieur et moyen) : Aucun sédiment marin plus ancien que le Lutétien n'est connu dans l'Aurès. Avant le Burdigalien qui repose en transgression et en discordance sur tous les terrains sans exception, seuls les terrains continentaux s'intercalent parfois entre le Lutétien et le Burdigalien. Cette période correspond à l'émersion et au plissement de la région.

✓ *L'Eocène inférieur* : il affleure à l'Est-Sud-Est de Djebel El Mellah. Il est représenté par quelques dizaines de mètres de marnes jaunes verdâtres, légèrement gypseuses et des calcaires argileux à lamellibranches.

Un banc de calcaire micro-conglomératique, marque l'implantation de la sédimentation marine. Cette formation affleure également à l'Est d'El Outaya (Djebel Ahmar) où elle est représentée par des calcaires riches en silex noir et souvent fissurés.

✓ *L'Eocène moyenne* : il affleure à l'Est de Biskra, sur le flanc nord de Djebel Ahmar. Il est caractérisé par une sédimentation lagunaire de type : argiles, gypses, anhydrites et calcaires ; sa puissance varie de 100 à 400m environ (A.Haouchine, 2010).

Série continentale du Nummulitique (Eocène supérieur) : Le Nummulitique continental se trouve dans deux situations différentes :

3.2. ÉTUDE GÉOLOGIQUE

✓ Dans les synclinaux, où il commence à se former, dès l'émergence de la région, recouvrant en discordance le Burdigalien.

✓ En discordance, sur tous les termes des séries plus anciennes affleurantes dans l'Aurès, jusqu'au Trias.

Le Néogène : Le Néogène est bien développé dans les plaines, facilement accessibles de la périphérie de l'Aurès, notamment entre Biskra et El Kantara. Il est subdivisé en deux sous-étages : le Néogène marin (Miocène inférieur) et le Néogène continental (Miocène supérieur et Pliocène).

Le Miocène marin : Le Miocène marin affleure au Nord d'El Outaya, sur le flanc nord de Djebel Modiane, Djebel Magraoua et à l'Est de la région de Branis. Il est représenté par des marnes rouges à gypse et silex. Plus au Nord, à Sebâa Mgataâ, le Miocène est formé de molasses marno-calcaires, riches en pectinidés et en mollusques. Au dessus, viennent des marnes, sans fossiles avec gypses diffus. L'épaisseur totale est d'environ 200 à 300m (A.Haouchine, 2010).

Le Miocène continental : Au dessus du Miocène marin, viennent des assises continentales très développées au Sud de l'Aurès, où elles acquièrent une épaisseur considérable.

Le Miocène supérieur : il affleure au Nord- Est de Biskra, à Bled Salaouine, sous forme de couches marno-calcaires brunes rougeâtres. A l'Ouest, sur le flanc sud de Djebel Maghraoua et surtout sur Djebel Moddiane, le Miocène supérieur est constitué de conglomérats et de brèches, pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

A l'Est d'El Outaya, R. Laffite a observé des couches rouges reposant sur le Miocène marin fossilifère ce sont des marnes rouges, conglomérats, sables, des grès grossiers avec de rares bancs de graviers, de poudingues mal cimentés et des poudingues grossiers qu'il attribue au Miocène supérieur. La puissance de cet ensemble est d'environ 500m.

Le Pliocène : le Pliocène forme une série d'affleurements très continus au Nord et au Nord- Est de Biskra. Il est également représenté par la croûte calcaire-gypseuse, englobant souvent des masses de poudingues, des sables et des graviers dans le Sud de l'Oued Djedi. (A.Haouchine, 2010).

3.2.4 CONCLUSION

Située dans une région fortement tectonisée, représentant la zone de transition structurale et sédimentaire entre deux domaines distincts : l'Atlas saharien, sur-élevé au Nord et le Sahara, pays effondré au Sud. La région de Biskra occupe un vaste synclinal, affecté par un ensemble de plis et de failles ainsi qu'une succession de petits synclinaux et anticlinaux.

L'ensemble de la litho stratigraphie de cette plaine est constitué par les terrains crétacés formés de grès, marnes, calcaires et argiles.

3.3 Hydrogéologie [22]

Les études géologiques et hydrogéologiques ont permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de part leurs constitution lithologie, leurs structures géologiques et les facilités d'exploitation qu'ils présentent. Ces aquifères appartient au Quaternaire, au Moi-Pliocène, à l'Eocène inférieur et le Sénonien supérieur et à l'Albien.

3.3.1 La nappe phréatique du qatarienne

Elle est connue au niveau des palmeraies de Tolga et se localise souvent sur des accumulations alluvionnaires. On classe dans cette catégorie la nappe de l'oued Biskra et celle de l'oued Djedi. Elles doivent leurs alimentations normalement à partir des précipitations et des eaux d'irrigation .la plupart des eaux de cette nappe sont salées ou très salées [22].

3.3.2 La nappe profonde

Cette nappe souvent appelée albiennne, elle est caractérisée par une température très élevée. Elle est rarement exploitée, sauf à l'Oued Djellal ou Sidi Khaled ou les formations gréseuses de l'albien ou de barrémien sont touchées à une profondeur de 1500à 2500 mètres [22].

3.3.3 La nappe calcaire

Cette nappe est localisée dans la totalité de la région de Biskra. Elle est plus exploitée qu'à l'Est de Biskra à cause des faibles profondeurs relatives de captage. A l'ouest, la profondeur est de 150à plus de 200m alors qu'à l'est, la profondeur dépasse les 400m [22].

L'alimentation de cette nappe se fait par deux zones d'affleurement de l'éocène inférieur, la première à l'Ouest de Daoucen et Ouled Djellal, la seconde au nord de Tolga, entre Foughala et Boucheghroune et les versants de la plaine de l'Outaya. Cette nappe subit une baisse de niveau piézométrique suite à la surexploitation [12].

3.3.4 La nappe du Miopliocène

Cette nappe à une extension considérable. Elle est capturée par de nombreux forages dans les plaines. Son épaisseur reste faible sur les piémonts et augmente au milieu de la plaine. Son alimentation est assurée par les)pluies exceptionnelles dans les zones d'affleurement les exutoires sont constitués par les sources et par les vastes zones d'évaporation [22].

3.4 Étude Hydrologique

3.4.1 Régime hydrologique en Algérie [23]

Les variations saisonnières des débits des cours d'eau sont tributaires d'une multitude de facteurs climatiques et physiques du bassin versant (le régime de précipitations, la nature lithologique des bassins versants, les conditions climatiques, l'équipement des bassins en ouvrages hydrauliques, etc.). La connaissance et la prévision de ces variations sont indéniablement d'une grande importance pour une gestion rationnelle des ressources en eau.

La classification des bassins versant en fonction des similarités de leurs caractéristiques hydrologiques présente un intérêt capital dans le choix et l'adaptation d'un modèle « pluies- débits ».

De nombreuses études ont montré que les cours d'eau situés au Nord de l'Algérie se caractérisent par un régime hydrologique simple (alternance inter annuelle de hautes et de basses eaux), traduisant ainsi la prépondérance d'un seul mode d'alimentation. En fait, le régime d'alimentation des cours d'eau en dans le nord de l'Algérie, à climat méditerranéen, est de type pluvial. Le maximum des débits est enregistré pendant la période hivernale et le début du printemps, et le minimum (période d'étiage) s'étend sur quatre à cinq mois pendant la période estivale et le début de l'automne.

Par contre, les stations hydrométriques appartenant aux bassins versants du Sud (Chott El-Hodna n 05, Macta n 11 et Medjerda n 12), sont caractérisées par un régime hydrologique complexe (TAÏBI, 1993). Du fait qu'elles appartiennent au climat semi-aride, les précipitations se font plutôt rares et le phénomène d'évaporation est très intense. Le maximum de précipitation est enregistré pendant l'automne sous forme d'orages. Les débits des cours d'eau les plus importants sont caractéristiques de la période automnale ; l'étiage survient pendant la période estivale.

Les débits spécifiques au Nord sont de l'ordre de 6.6 à 63.7 $l/s/Km^2$ respectivement à la station de Pierre du Chat (160801) et de Baghlia (022001). Dans les hauts plateaux et le bassin endoréique du Chott El- Hodna, ils sont de l'ordre de 1.5 à 24 $l/s/Km^2$ aux stations de Yabous (070601) et de Sidi Ali Ben Youb (110201) respectivement.

Il est important de rappeler ici les données qui ont servi à la modélisation hydrologique des débits mensuels :

- Nous disposons des chroniques de débits mensuels de 162 stations hydrométriques, réparties d'une façon hétérogène à travers le territoire d'étude (Source : ANRH et ANBT).

- Les données d'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, sous forme de grilles régulières réalisées dans le cadre d'une étude antérieure.
- Les chroniques de pluies mensuelles de 887 postes pluviométriques, sous forme de grilles régulières (360 grilles de pluies mensuelles).
- Les données pluviométriques mensuelles de 652 postes pluviométriques (source : ANRH).

Les bassins sont caractérisés par des surfaces très variées (entre 19 et 43 681 Km^2). A priori, les grands bassins versants sont soumis à deux types de climat, méditerranéen au Nord et semi-aride au Sud (exemple du bassin versant du Cheliff ,Soummam, Biskra) .

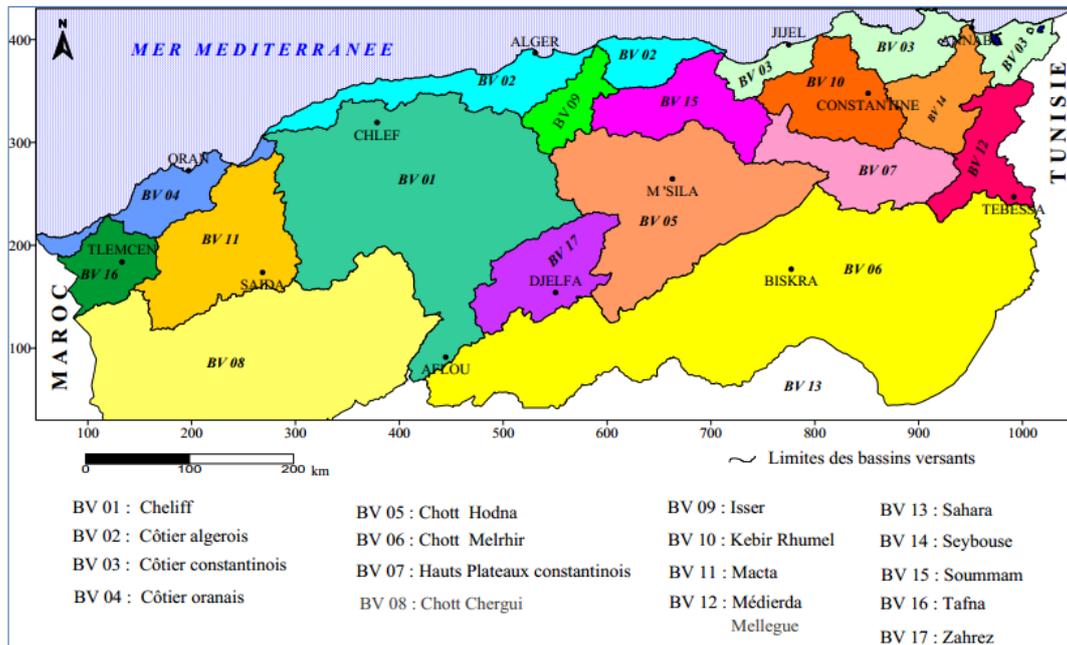


FIGURE 3.3 – les bassins versants en Algérie [23]

3.4.2 Bassin versant d'Oued Biskra [22]

Le bassin versant d'oued Biskra est un sous bassin situé à l'intérieur du bassin versant n° 6 Chott Melghir dans le Sahara algérien, avec un climat semi-aride, il se divise en trois sous bassin versant.

L'oued Biskra : c'est le principal cours d'eau dans la région, son réseau hydrographique est constitué par un grand nombre d'affluents et sous affluents, qui collectent les eaux de ruissellement, venants du Sud-Ouest de l'Aurès. L'oued Biskra résulte de la jonction de deux affluents : oued El Hai et oued Djemourah, qui drainent respectivement une superficie de 1788 et 906 km^2 , dont la confluence donne naissance à l'oued Biskra, à une altitude de 200m.

L'oued El Hai prend son origine sur les flancs de l'Atlas Saharien, qui à son tour prend sa naissance du confluent des deux oueds : oued Fedhala , issu du djebel Ich Ali (1815m) et l'oued Tilatou qui descend des monts de Bellezma (2091m) et coule dans la direction SE-NO.

L'oued Djemourah résulte aussi de la jonction de deux oueds : oued Abdi et oued Bouzina.

L'oued Abdi prend sa source du Djebel Lazreg (1937m) et Djebel Boutlarmine (2178m), il coule vers le Sud-Ouest. L'oued Bouzina prend sa source du Djebel Lazreg (1937m) et Djebel Boutlarmine (2178m), il coule vers le Sud-Ouest.

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

L'oued Bouzina coule dans le synclinal de Bouzina, depuis sa source (Djebel El Mahmal 2321m) en contre bas de la plaine de Nerdi, jusqu'au Khanguet El Anseur où il traverse le flanc Sud- Est du synclinal pour rejoindre l'oued Abdi à Menaâ, formant l'oued Djemoura ; qui reçoit sur sa rive gauche l'oued Bouguatou.

L'oued Lafrah prend son origine de Djebel Ich Oumared (1270m), mais en réalité c'est un petit ravin saisonnier, qui menace en période de crue.

TABLE 3.1 – Caractéristiques des sous bassins de l'Oued Biskra [24]

Paramètre	unité	El Hai	Djemourah	Biskra complémentaire	Biskra
Surface du bassin	km^2	1788	906	93	2787
Périmètre du bassin	km	229	184	99	250
Indice de compacité		1,52	1,71	2,87	1,33
Altitude maximale	m	2091	2321	1270	2321
Altitude moyenne	m	200	200	150	150
Altitude minimale	m	956	998	410	950
Altitude médiane	m	1060	1200	400	1080
Longueur du talweg principal	km	107	93	57	108

Le bassin de oued Biskra est délimité à l'aide du logiciel Arc Gis sous l'extension de Arc Swat.2

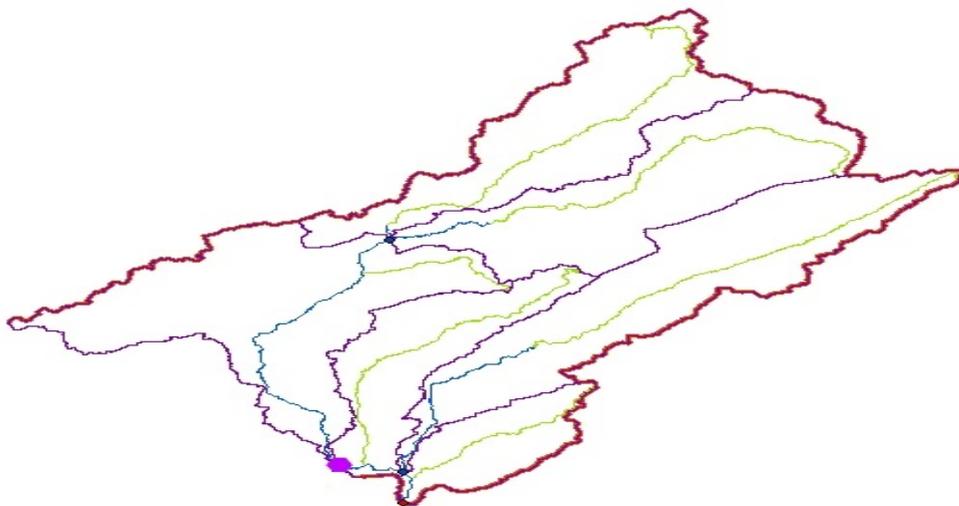


FIGURE 3.4 – le bassin versant d'oued Biskra

3.4.3 Étude Climatologique

Introduction

L'Algérie est caractérisée par le contraste entre le climat méditerranéen de la bordure littorale et le climat désertique du Sud, en passant par le climat montagneux des plateaux, nous serons donc amenés, avant toutes choses, à préciser le type du climat du secteur que nous avons étudié [24].

Pour notre région d'étude, nous nous sommes basés sur les observations disponibles, relevées dans les stations existantes au sein du bassin versant du Biskra.

Étude des Précipitations

Le terme « précipitations » englobe toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, que se soit sous forme liquide (pluie) ou sous forme solide (neige, grêle) [14]. Dans notre région d'étude, les précipitations sont faibles.

TABLE 3.2 – Précipitations moyennes annuelles (mm), relevées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH

L'année	1973	1974	1975	1976	1977	1978	P_{Moy}	P_{Min}	P_{Max}
P_{BATNA}	488.9	361.6	488.9	417.8	160.5	231.4	358.2	160.5	488.9
P_{MENAA}	136.0	244.5	224.1	417.6	122.8	174.9	220.0	122.8	417.6
$P_{DJEMOURAH}$	20.2	114.8	101.6	194.9	82.5	79.1	98.8	20.2	194.9
P_{moy}	215.0	240.3	271.5	343.4	121.9	161.8	225.6	101.2	367.1

Étude des précipitations moyennes annuelles D'après cette série de 6 ans « 1973-1978 » Table 3.1, La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée sur cette période est de 358.2 mm. Toutefois, la pluviométrie annuelle est très variable d'une année à l'autre. Cette variabilité inter-annuelle des précipitations (Fig 3.5) montre une irrégularité assez prononcée, avec des périodes humides qui ont des valeurs supérieures à la moyenne, jusqu'à 417.6 mm (1976) et des périodes sèches dont les valeurs sont inférieures à la moyenne, jusqu'à 122.8 mm (1977).

Cette irrégularité s'applique aussi bien pour les deux autres stations (MENAA et DJEMOURAH); (Fig 3.6, Fig 3.7).

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

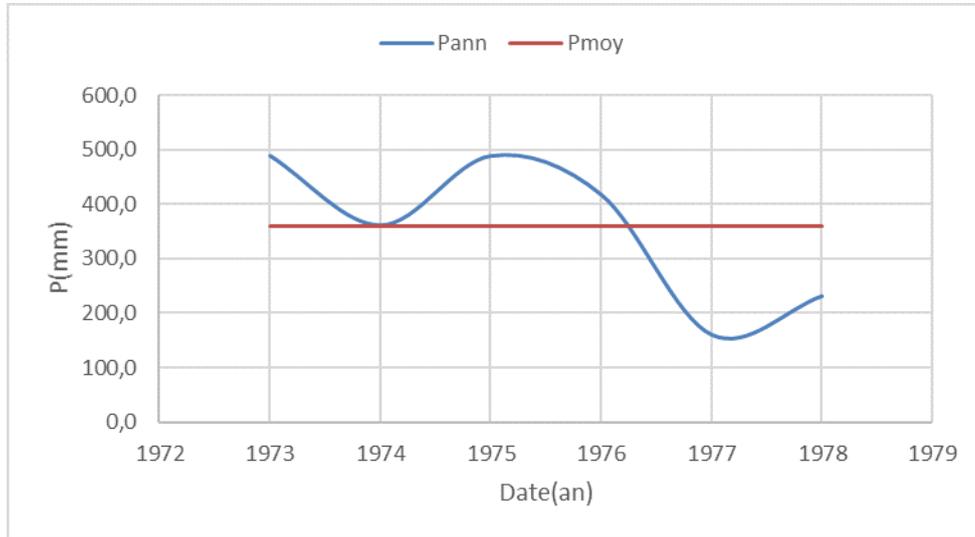


FIGURE 3.5 – Variations inter-annuelles des précipitations .Station de BATNA

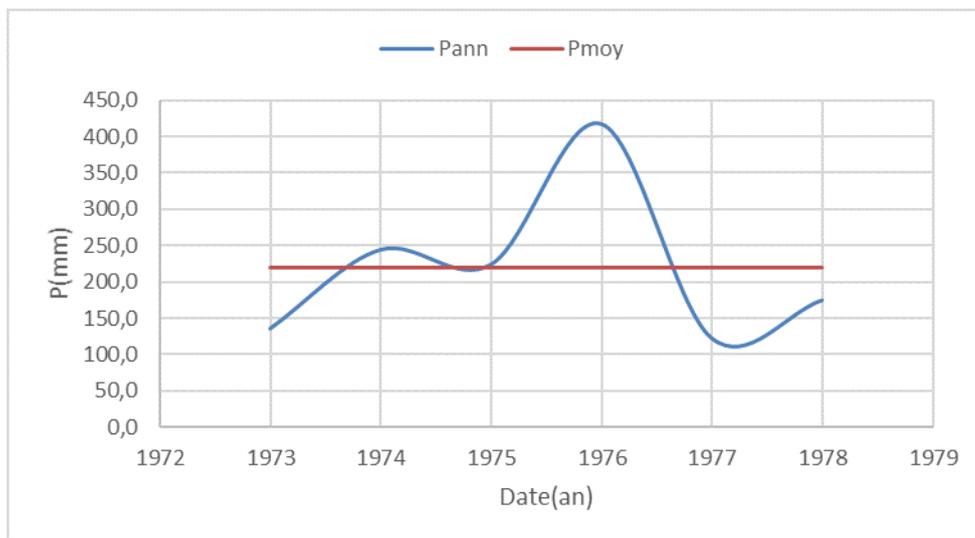


FIGURE 3.6 – Variations inter-annuelles des précipitations .Station de MANAA

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

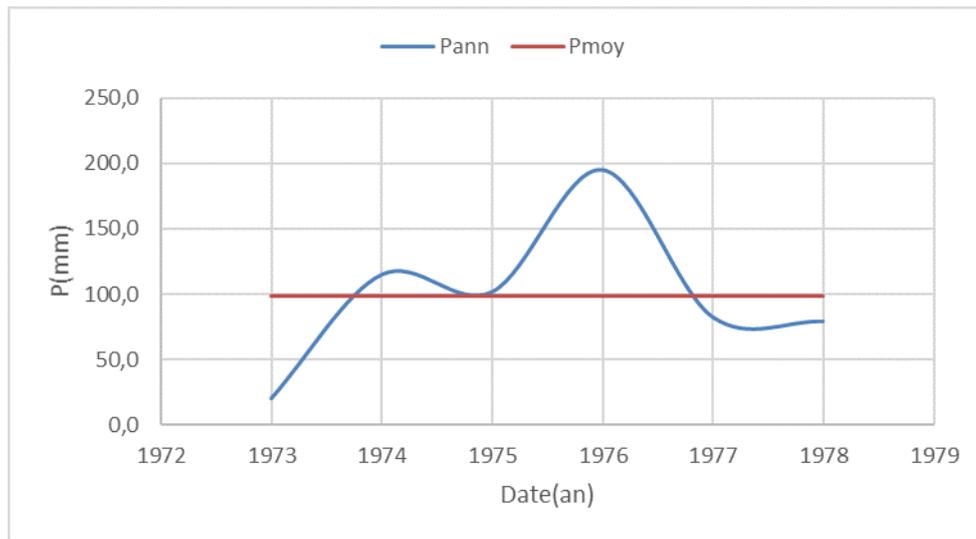


FIGURE 3.7 – Variations inter-annuelles des précipitations .Station de DJEMOURAH

Étude des précipitations moyennes mensuelles La Table 3.2 donne les valeurs moyennes mensuelles des précipitations ,mesurées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH, sur la période allant de 1973 à 1978.

L'évolution des précipitations moyennes mensuelles des stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH pour différentes périodes (Fig 3.8) montre que les valeurs des précipitations maximales sont marquées principalement, en mois de Septembre, alors que le mois le plus sec est celui d'Août.

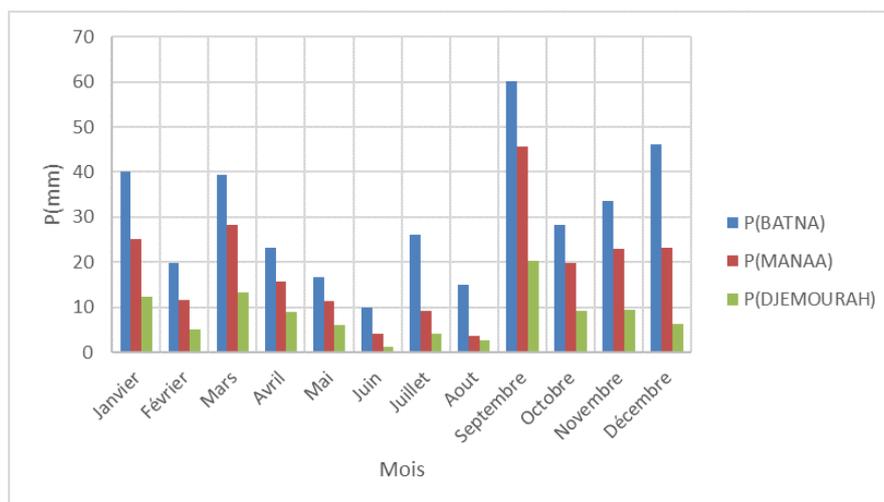


FIGURE 3.8 – Histogramme des précipitations moyennes mensuelles

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

TABLE 3.3 – Précipitations moyennes mensuelles (mm), relevées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH

Mois	P_{BATNA}	P_{MENAA}	$P_{DJEMOURAH}$
Janvier	40.1	25.2	12.3
Février	19.8	11.5	5
Mars	39.5	28.3	13.4
Avril	23.2	15.6	8.9
Mai	16.6	11.3	6.1
Juin	10	4.2	1.2
Juillet	26	8.9	4
Aout	14.9	3.5	2.6
Septembre	60.1	45.7	20.3
Octobre	28.3	19.7	9.2
Novembre	33.6	23	9.5
Décembre	46.1	23.1	6.3
Annuelle	358.2	220.0	98.8

Étude des précipitations saisonnières Les quatre saisons de l'année correspondent à :

- ✓ Hiver (Décembre, Janvier, Février).
- ✓ Printemps (Mars, Avril, Mai).
- ✓ Été (Juin, Juillet, Août).
- ✓ Automne (Septembre, Octobre, Novembre).

Et leurs précipitations équivalentes sont données par le tableau suivant :

TABLE 3.4 – Précipitations saisonnière (mm), relevées aux stations de BATNA, MENAA et DJEMOURAH

Saison	P_{BATNA}	P_{MENAA}	$P_{DJEMOURAH}$
Hiver	99.4	65	30.7
Printemps	49.8	30.9	16.2
Été	101	58.3	26.9
Automne	108	65.8	25

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

La distribution saisonnière des précipitations (Fig 3.9) montre que l'été correspond à la saison la plus sèche. L'Automne étant la saison la plus humide.

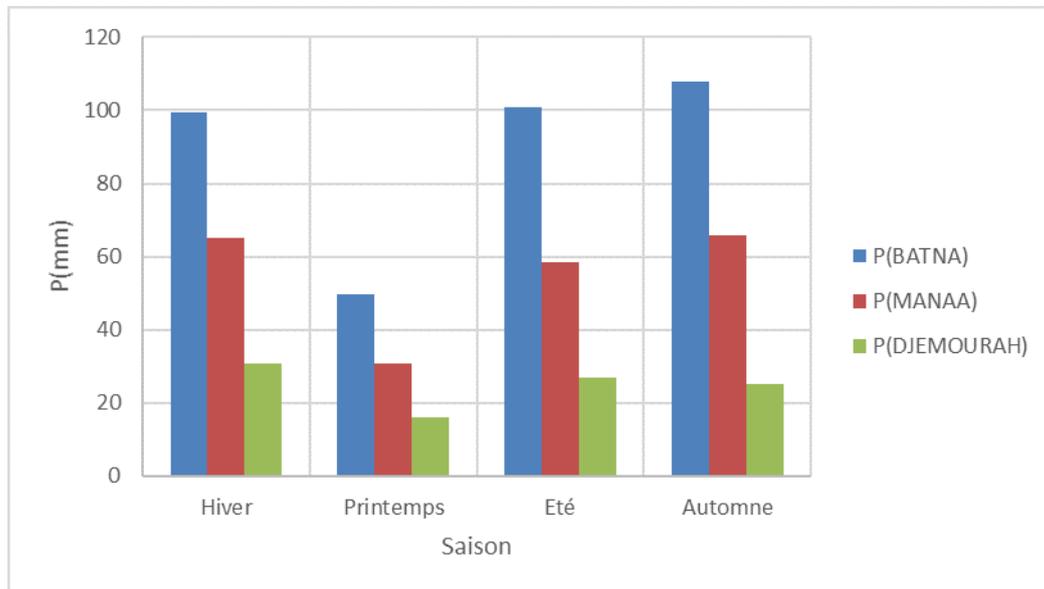


FIGURE 3.9 – Histogramme des précipitations moyennes saisonnières

Étude des Températures

La température est le second facteur, après la précipitation qui conditionne le climat d'une région [14]. Elle permet aussi d'estimer le déficit d'écoulement. La température moyenne annuelle est de 23.10°C. La Table 3.4 donne les températures moyennes mensuelles, pour une période de 6 ans (1973-1978).

TABLE 3.5 – Températures moyennes mensuelles (1973-1978)

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
$T^{\circ}\text{C}$	12.07	12.18	16.71	21.65	27.50	32.70	36.74
Mois	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne	
$T^{\circ}\text{C}$	34.77	28.97	24.50	17.39	11.98	23.10	

On note que la température moyenne mensuelle ,la plus élevée, est celle du mois de Juillet (36.71°C) alors que la température ,la plus basse est celle du mois de Décembre (11.98°C).

L'humidité relative

Ce paramètre est relativement faible dans la zone d'étude ; la moyenne est de 42.14%. Cette faible valeur s'explique par l'aridité du climat et la concentration

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

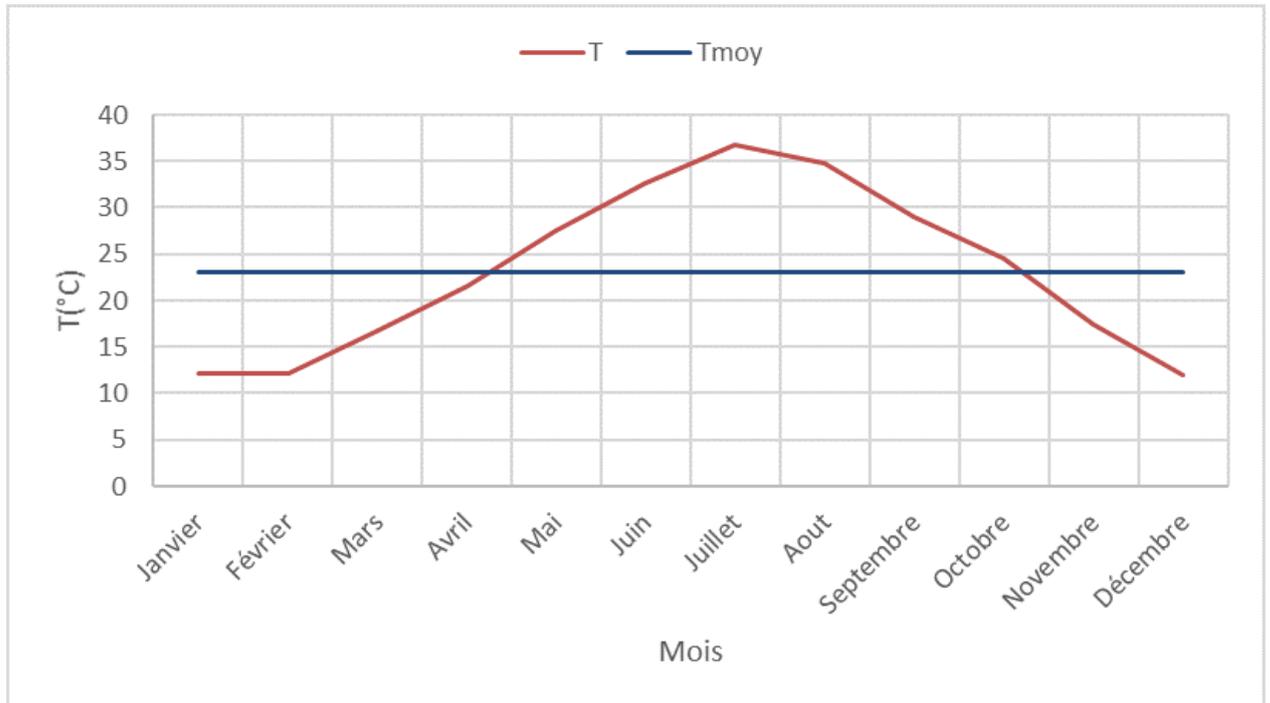


FIGURE 3.10 – Variation mensuelle des températures (1973-1978)

des masses d'air chaud du Sahara. Les valeurs moyennes mensuelles sont insérées dans la Table 3.6, ci-dessous :

TABLE 3.6 – Humidités relatives moyennes (1973-1978)

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Humidité relative %	58.13	49.47	42.33	38.87	33.80	28.20	25.73
Mois	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne	
Humidité relative %	28.73	39.93	46.67	54.40	59.40	42.14	

Indice d'Aridité [22]

L'aridité peut s'exprimer quantitativement par différents indices d'aridité conventionnels et empiriques. La plupart, sont est un simple rapport hydro-thermique, fondé principalement sur des grandeurs moyennes de précipitations et de températures, qui sont utilisées pour définir les degrés d'aridité .

Suivant l'ampleur du déficit hydrique déterminant, plusieurs degrés d'aridité peuvent être différenciés, se définir par des classes d'indices d 'aridité convenues et recevoir des qualifications particulières, applicables à des zonalités climatiques. Il est devenu classique de distinguer trois degrés dans l'aridité :

- ✓ Hyper-aride.
- ✓ Aride.
- ✓ Semi-aride.

Indice d'Aridité annuel de De.MARTONNE [22]

$$I = \frac{P}{10 + T} \quad (3.1)$$

P :Précipitation moyenne annuelle(mm)

T :Température moyenne annuelle.

Classification des climats ,en fonction des valeurs de l'indice de MARTONNE.

$I < 5$: climat hyper-aride.

$5 < I < 10$: climat aride.

$10 < I < 30$: climat semi-aride.

$I > 30$: climat humide.

Le tableau ci-dessous montre la température, la précipitation moyenne annuelle et le calcul de l'indice d-aridité dans l'ensemble du bassin versant de Biskra pendant la période 1973-1978.

TABLE 3.7 – Tableau d'indice d'aridité

$P(mm)$	$T(^{\circ}C)$	I
188.13	23.10	5.68

Remarque : D'après le résultat obtenu lors du calcul d'indice d'aridité , on constate que la région de Biskra dispose d'un climat aride avec un indice d'aridité de 5.68.

Indice d'aridité mensuelle de De.MARTONNE [22]

$$a = \frac{12P}{T + 10} \quad (3.2)$$

P : précipitations mensuelles moyennes (mm)

T : températures mensuelles moyennes ($^{\circ}C$)

les indices d'aridité mensuelle sont représentées dans le tableau ci-dessous.

TABLE 3.8 – Indices d'aridité mensuelle

Mois	$T(^{\circ}C)$	$P(mm)$	a
Janvier	12.07	20.98	11.41
Février	12.18	9.49	5.13
Mars	16.71	22.53	10.12
Avril	21.65	13.39	5.07
Mai	27.5	13.39	5.07
Juin	32.7	3.57	1.003
Juillet	36.74	9.015	2.31
Aout	34.77	4.76	1.27
Septembre	28.97	35.16	10.82
Octobre	24.5	18.74	5.47
Novembre	17.39	17.84	7.81
Décembre	11.89	18.15	9.94

Remarque : D'après les résultats obtenu on constate que la région de Biskra dispose d'un climat hyper-aride en mois de mai, juillet et aout, d'un climat semi-aride en mois de janvier ,mars et septembre, et d'un climat aride dans le reste des mois de l'année.

L'évapotranspiration potentielle [25]

Définition : L'ETP est un facteur déterminant dans l'évaluation du bilan hydrique d'une région. C'est un phénomène important du cycle hydrologique. Elle résulte de deux phénomènes, l'un physique ; l'évaporation et l'autre biologique ; la transpiration.

Formule de Thornthwaite :

$$ETP(mm) = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (3.3)$$

T : Température moyenne mensuelle (°C)

$$I = \sum(i) \quad (3.4)$$

$$i = (T/5)^{1.514} \quad (3.5)$$

$$a = 0.492 + 1.79 * 10^{-2}I - 7.71 * 10^{-5}I^{-2} + 6.75 * 10^{-7}I^3 \quad (3.6)$$

Méthode de Turc :

$$ETP = 0.4 \left(\frac{T}{T + 15} \right) (Rn + 50)K \quad (3.7)$$

T : Température moyenne mensuelle (°C).

Rn : Radiation solaire globale reçu au sol.

$K = 1$ si $hr > 50$

$K = 1 + (50 - hr)/70$ sinon

$$Rn = Rg(0.18 + 0.62h/H) \quad (3.8)$$

Rg : Rayonnement extra-terrestre en ($calcm^{-2}j^{-1}$).

h : Durée d'insolation effective ($h/mois$).

H : durée astronomique possible d'insolation ($h/mois$) .

Ces deux dernières méthodes sont utilisées pour calculer l'évapotranspiration potentielle mensuelle.

La formule d'Oudin : cette formule calcule l'évapotranspiration potentielle journalière à partir de la température et la latitude.

$$ETP = \max(0 ; Gr(T + 5)/28.5/100) \quad (3.9)$$

$$Gr = 446 * OM * \cos(PZ) * Eta \quad (3.10)$$

$$\cos(PZ) = \cos(GZ) + [\cos(L/57.3) \times \cos(teta) \times \frac{\sin(OM)}{(OM - 1)}] \quad (3.11)$$

$$Eta = 1 + \frac{\cos(n/58.1)}{30} \quad (3.12)$$

$$\cos(OM) = \max(-1 ; \min(1 - \frac{\cos(GZ)}{\cos(L/57.3)/\cos(teta)} ; 1)) \quad (3.13)$$

$$\cos(GZ) = \max(0.001 ; \cos(\frac{L}{57.3} - teta)) \quad (3.14)$$

$$teta = 0.4093 \sin(\frac{n}{58.3} - teta) \quad (3.15)$$

n : Le rang de la journée

Gr : Radiation globale

L : La latitude

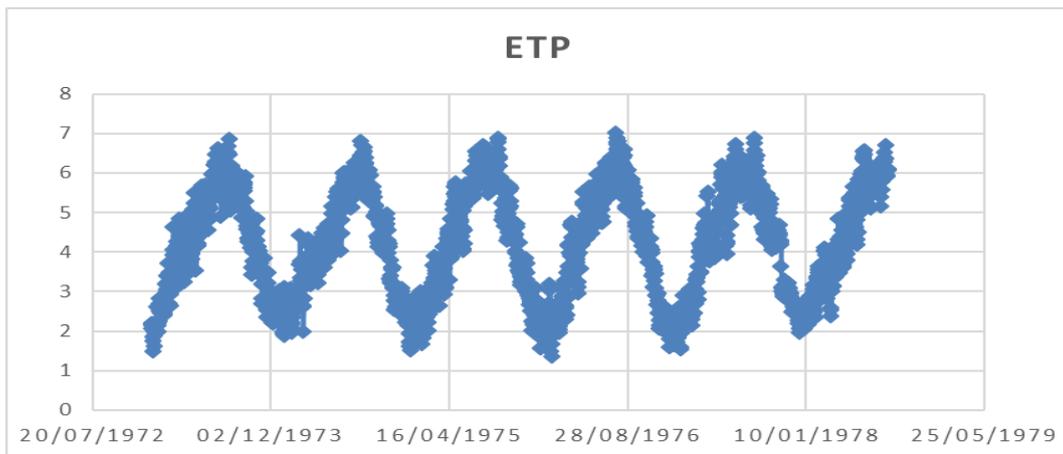


FIGURE 3.11 – Évolution de l'évapotranspiration journalière (Formule d'Oudin)

Remarque : D'après le graphe d'évolution de l'évapotranspiration on remarque que l'évapotranspiration est un phénomène cyclique dans le temps. les valeurs de d'évapotranspiration sont importantes durant les saisons sèches (été) contrairement à l'hiver ou les valeurs sont faibles .

Conclusion

La région étudiée est caractérisée par un climat aride. A l'échelle saisonnière, on constate qu'on a deux saisons : une relativement pluvieuse, de Septembre à Mai et une autre sèche, pour le reste de l'année.

Les méthodes estimant l'indice d'aridité et l'évapotranspiration s'accordent, en donnant un caractère aride au climat de la région.

L'évapotranspiration potentielle est de 1536,84 mm par an, ce qui provoque la consommation de la totalité des précipitations.

En résumé, tous les facteurs par lesquels se manifeste l'aridité à savoir ; les faibles moyennes annuelles de la pluviométrie avec une irrégularité dans l'espace et dans le temps ainsi que les fortes évaporations sont réunis dans le climat de cette région.

3.4.4 Collecte et Critique des données

Introduction

Toute étude climatique ou hydrologique est basée sur l'exploitation des séries de données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues continues ou discontinues.

Collecte des données

Les données recueillies sont relatives aux enregistrements suivants :

- ✓ Données pluviométriques (pluies moyennes et journalières maximales).
- ✓ Données hydrométriques (Débits moyens, apports liquides, débits de crues).

Il existe deux stations de mesure des débits sur le Bassin versant de l'oued Biskra, l'une sur l'oued El Hai nommée la station d'El Kantara portant le code (06 12 01) et l'autre sur l'oued Djemourah appelée station de Djemourah et désignée par le code (06 13 01).

La station de Djemourah dispose d'une série de 22 ans de 72-77 et de 79-94 et la station d'El Kantara, qui se trouve à quelques km à l'amont du barrage « Les fontaines des gazelles ».

Dans notre cas d'études on s'intéresse à la station de DJEMOURAH pour la disponibilité de la donnée dans cette station hydrométrique.

TABLE 3.9 – Stations hydrométriques du bassin versant d'Oued Biskra

Nom de la station	EL KANTARA	DJEMOURAH
Code de la station	06 12 01	06 13 01
Nom de l'oued	EL HAI	DJEMOURAH
Surface du bassin versant en(km^2)	1870	1035
Longuer de l'oued principal(km)	108,86	97,96
Coefficient de compacité(Kc)	2,58	2,47
Densité de drainage (km/km^2)	0,782	0,757
Altitude Max	2132	2294
Altitude Moy	961,039	1022,029
Altitude Min	193	164
Période d'observation	68-74 / 77-95	72-77 / 79-94

La zone du projet dispose d'un réseau pluviométrique suffisant, constitué par une dizaine de stations environ. Les analyses sont portées sur les enregistrements de huit (08) postes pluviométriques dont cinq (5) sont situés à l'intérieur du bassin

3.4. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

versant de l'oued Biskra et trois (3) postes à son voisinage proche.

Quelques stations de la zone du projet ne sont pas prises en compte en raison de leur courte période d'observation et de leurs nombreuses lacunes (station du barrage « Fontaines des gazelles »).

TABLE 3.10 – Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin de Biskra

Nom de la station	MENAA	BATNA	DJEMOURAH
Code de la station	061304	070316	061305
Latitude	801.2	814.7	782.35
Longitude	213,8	257,35	199,8
Altitude	1005	1040	400
Période d'observation	68/13	29/13	69/13
Années sans mesure	99/03	68, 69, 73, 75,13	69

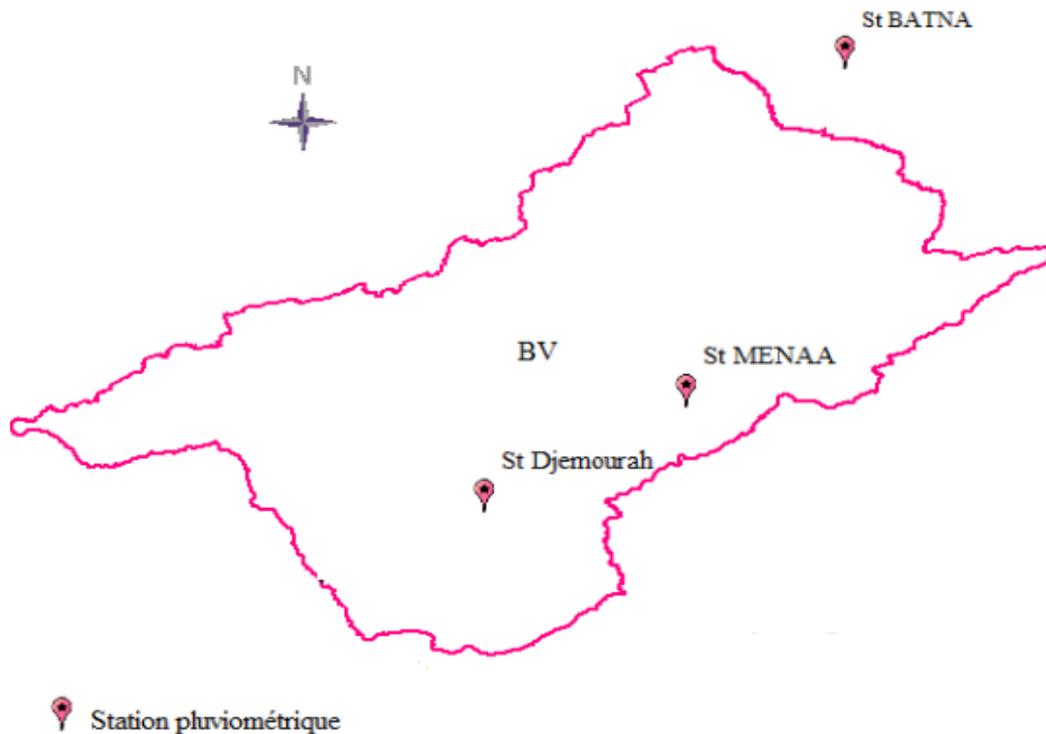


FIGURE 3.12 – Localisation des stations pluviométriques

le choix des stations pluviométriques

Le choix des stations s'est fait de telle sorte à ne prendre en compte que la pluviométrie qui contribue à la génération du débit à DJEMORAH et les stations qui ont plus de données pour nous permettre de bien reconstituer le phénomène.

Et pour cela on a choisi les trois stations pluviométriques déjà citées.

Afin de déterminer les pluies moyennes pour tout le bassin versant on a utilisé la méthode arithmétique.

$$P_{moy} = \frac{\sum_1^n (Pi)}{n} \quad (3.16)$$

P_{moy} : Pluie moyenne sur l'ensemble du bassin (mm).

Pi : Précipitation à la station i (mm).

n : Nombre de stations.

Critique des données

Test de Grubbs et Beck [26] Les tests de Grubbs (1950, 1969, 1972) ont été mis au point pour permettre de déterminer si la valeur la plus grande, la valeur la plus petite, la valeur la plus grande ou la plus petite, ou dans le cas du test de Grubbs double, si les deux valeurs les plus grandes, ou si les deux plus petites peuvent être considérées comme extrêmes (ou aberrantes). Ce test suppose que les données correspondent à un échantillon provenant d'une population qui suit une loi normale.

Les valeurs singulières appelées horsains, sont déduites en calculant les statistiques suivantes :

$$X_h = \exp(X^{moy} + Kn * S) \quad (3.17)$$

$$X_l = \exp(X^{moy} - Kn * S) \quad (3.18)$$

Avec :

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

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

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

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

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

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

Avec n la taille de l'échantillon.

Les valeurs de l'échantillon supérieures à X_h ou inférieures à X_l sont considérées comme valeurs singulières.

Le test de Grubbs et Beck est appliqué sur les séries des données hydrométriques.

Résultat du test de Grubbs et Becks le tableau ci-dessous résume les résultats du test

TABLE 3.11 – Résultat de Grubbs et Beck

	n	Kn	X_{moy}	Sx	Xh	Xl
P(Menna)	155	10.40	0.87	0.36	103.58	0.05
P(Djemourah)	77	10.17	0.68	0.37	90.72	0.04
P(Batna)	313	10.55	0.64	0.37	97.63	0.03
Debit(Q)	300	10.55	0.51	0.37	88.47	0.03

L'application de ce test est faite dans le but d'améliorer les résultats, et de détecter les valeurs singulières douteuses des séries utilisées.

Le test de Grubbs et Beck n'a pas détecté de valeurs singulières pour toutes les séries de données

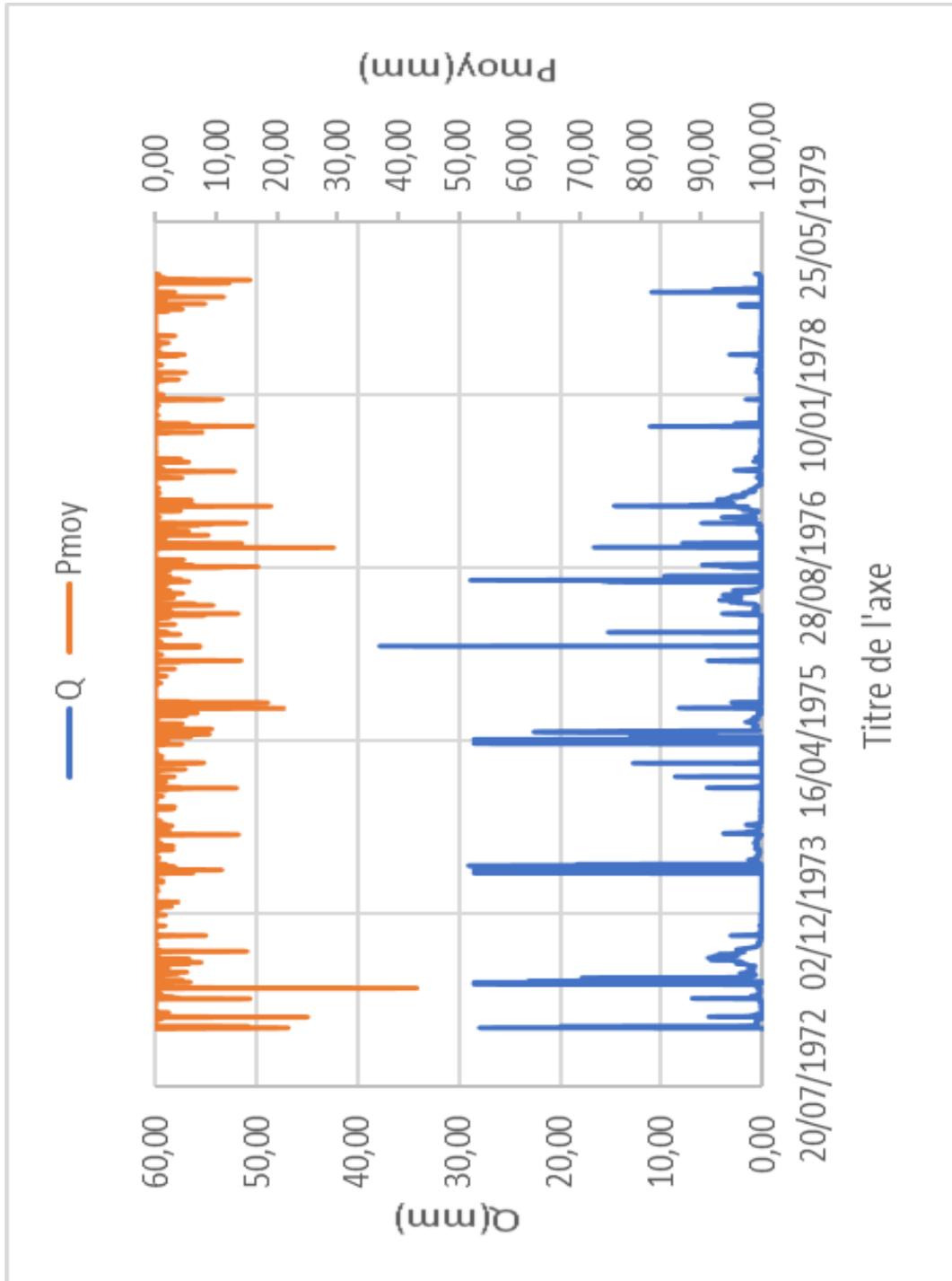


FIGURE 3.13 – Hydrogramme de la station de Djemourah

3.5 Conclusion

Les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'oued Biskra sont étroitement liées à sa position géographique et son relief, on relève de fortes variabilités spatiales et surtout temporelles des précipitations sous forme d'averses, des températures et l'influence élevée de l'évapotranspiration.

La combinaison de ces conditions physico-géographiques et climatiques est déterminant dans le comportement hydrologique des diverses unités du bassin.

On peut constater que le ruissellement dans le bassin versant d'oued Biskra est variable à cause de plusieurs paramètres (pente, l'intensité des pluies, température, couvert végétale ...).

Chapitre 4

Applications, Observations et Discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on procédera à la modélisation Pluie- débit par le Tank Model couplé avec le filtre de Kalman. L'initialisation des paramètres sera faite sans filtre de Kalman, ensuite on couple ce dernier au Tank Model pour voir son impact sur les résultats.

Les résultats obtenus, seront données sous forme de tableaux résumant les valeurs des critères d'évaluation, offrant ainsi une possibilité d'évaluation analytique. D'autre part, les résultats analytiques vont être accompagnés par des représentations graphiques permettant une comparaison directe des hydrogrammes simulés et ceux observés.

4.2 Tank Model(structure simple)

4.2.1 Application

Les paramètres initiaux du modèle sont calés à partir d'un jeu de données (Trial and Error) afin de déterminer les paramètres optimums.

Les paramètres initiaux sont donnés dans le tableau ci-dessous.

TABLE 4.1 – Paramètres initiaux du Tank Model

paramètre	a11	a12	a2	a3	a4
valeur	0.09	0.5	0.01	0.1	0.9
paramètre	b1	b2	b3	b4	
valeur	0.1	0.3	0.1	0.01	
paramètre	H11	H12	H2	H3	H4
valeur	10	12	6	5	0

Le vecteur d'état initial $X(0)$ est comme suit :

$$X(0) = [0.09 \ 0.5 \ 0.01 \ 0.1 \ 0.9 \ 0.1 \ 0.3 \ 0.1 \ 0.01 \ 10 \ 12 \ 6 \ 5 \ 0]^T$$

Les stockages initiaux des réservoirs sont donnés dans le tableau ci-dessous.

TABLE 4.2 – Capacités des stockages initiaux

réservoir	S1	S2	S3	S4
valeur	8	0	15	0

Les éléments de la diagonale de la matrice de covariance initiale $P(0|0)$:

$$[0.00001 \ 0.00001 \ 0.00001 \ 0.00001 \ 0.00001 \ 0.00001 \\ 0.0001 \ 0.0001 \ 0.0001 \ 0.0001 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]$$

On suppose que chaque élément de cette diagonale soit une variance :

$$P(i, i) = \sigma_i^2$$

Ensuite, on calcule les autres éléments :

$$P(i, j) = \sigma_i \times \sigma_j$$

La valeur initiale de la matrice de covariance de l'erreur $R(k)$ est de : 0.0001.

La matrice de covariance initiale d'erreur du système $M(0)$ est déterminé par Trial and Error avec une diagonale de 0.001, et 0 pour les autres éléments (Lee and Sing 1999).

4.2.2 Observations et Discussions

TABLE 4.3 – Critères d'évaluation par le Tank Model

	Calage	validation
$NASH$	0.2392	0.3865
R^2	0.2958	0.4772
$ PBIAS $	0.7704	0.6465
RSR	0.8722	0.7832

D'après les résultats obtenus aucun critère n'est satisfaisant, que ce soit en période de calage, ou de validation, cela se traduit graphiquement par une mauvaise reproduction de l'évolution des débits observés et simulés (Figure 4.1, Figure 4.2).

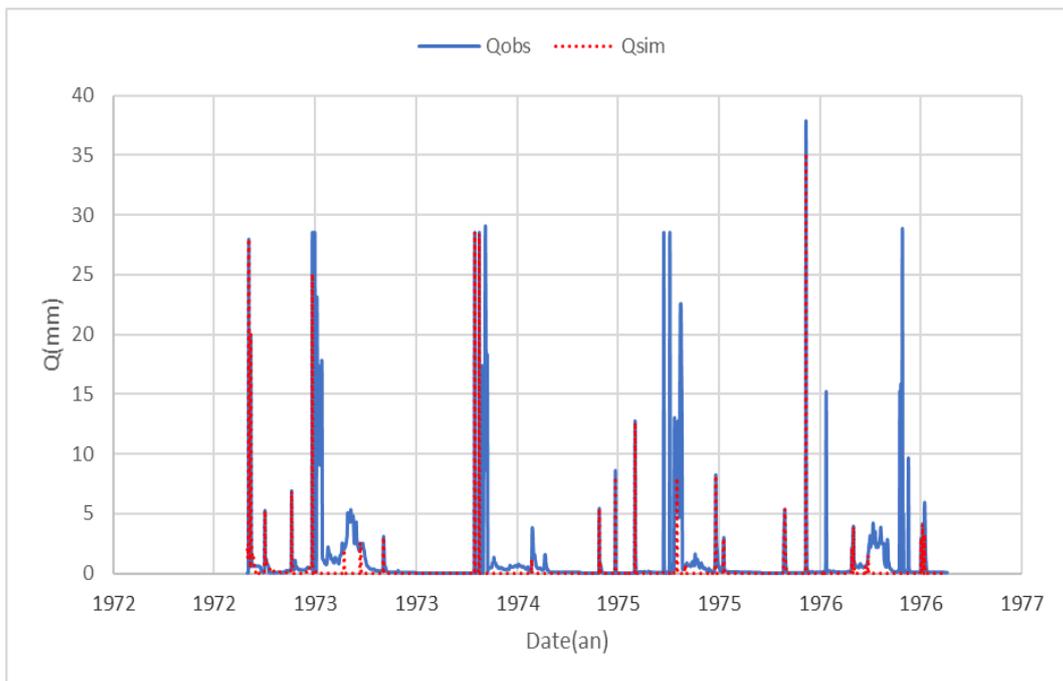


FIGURE 4.1 – Évolution du débit en phase de calage

4.2. TANK MODEL(STRUCTURE SIMPLE)

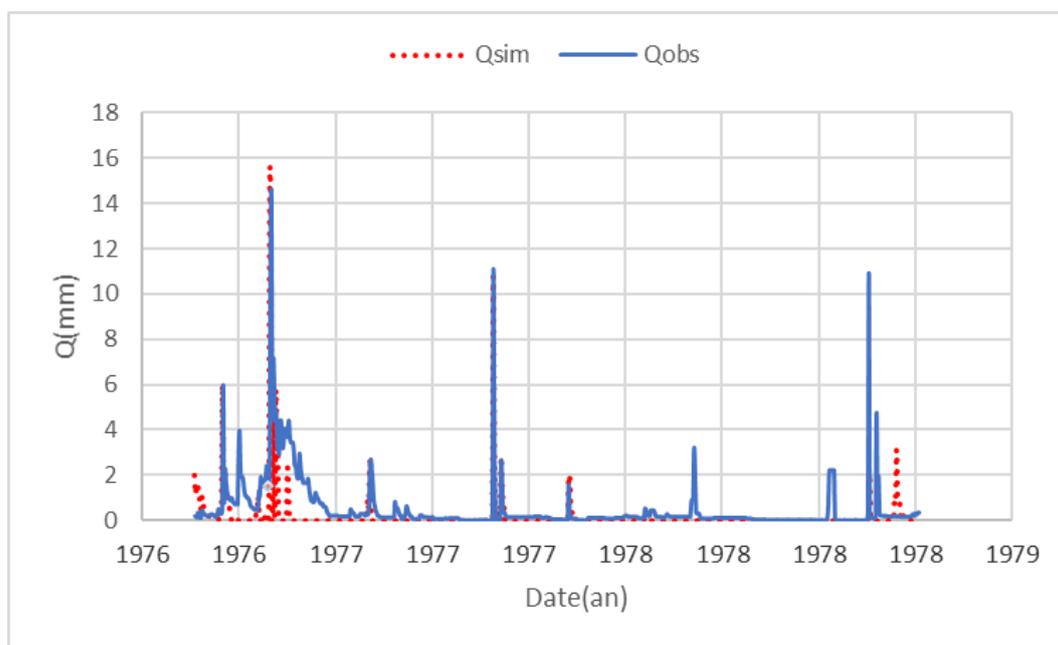
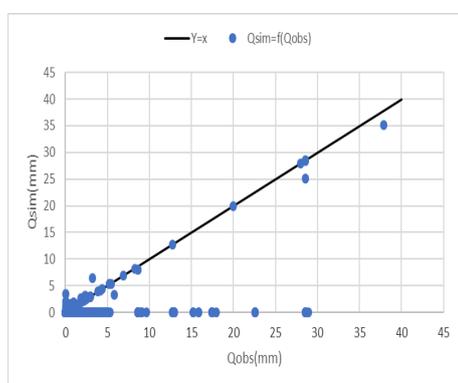
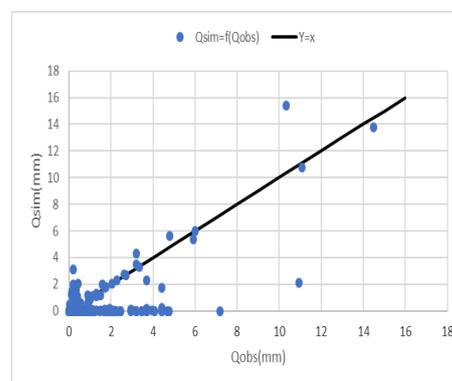


FIGURE 4.2 – Évolution du débit en phase de validation

Ces résultats sont confirmés aussi par les graphes de comparaison des débits simulés en fonction de ceux observés (Figure 4.3).



(a) débit simulé en fonction du débit observé en période de calibration



(b) débit simulé en fonction du débit observés en période de validation

FIGURE 4.3 – Comparaison des débits observés et simulés

D'après les résultats obtenus, on a été amené à rechercher d'autres structures du Tank Model afin d'améliorer les résultats.

4.3 Application du Multi-Tank Model pour le bassin versant de Biskra

La série de données est divisée en deux parties, la première s'étale du 01/01/1973 au 20/10/1976 pour le calage du modèle, et la deuxième du 21/10/1976 au 26/12/1978 pour le valider.

4.3.1 Initialisation du modèle

Les paramètres initiaux du modèle sont calés à partir d'un jeu de données (Trial and Error) afin de déterminer les paramètres optimums du Modèle.

Cette structure de modèle exige la division de la zone d'étude, et dans notre cas, la région d'étude a été divisée en 3 zones. Les valeurs des paramètres initiaux pour chaque zone sont données dans les Tableaux ci-dessous :

Zone 1 :

TABLE 4.4 – Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 1

paramètre	a11	a12	a13	a14	a15
valeur	0.05	0.16	0.01	0.7	0.01
paramètre	b11	b12	b13		
valeur	0.05	0.3	0.6		
paramètre	H11	H12	H13	H14	H15
valeur	10	8	5	2	1

Zone 2 :

TABLE 4.5 – Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 2

paramètre	a21	a22	a23	a24	a25
valeur	0.1	0.1	0.1	0.5	0.01
paramètre	b21	b22	b23		
valeur	0.01	0.4	0.07		
paramètre	H21	H22	H23	H24	H25
valeur	1	5	2	1	2

4.3. APPLICATION DU MULTI-TANK MODEL POUR LE BASSIN VERSANT DE BISKRA

Zone 3 :

TABLE 4.6 – Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 3

paramètre	a31	a32	a33	a34	a35
valeur	0.001	0.01	0.06	0.001	0.2
paramètre	b31	b32	b33		
valeur	1	0.8	0.6		
paramètre	H31	H32	H33	H34	H35
valeur	2	1	1	1	0

Les stockages initiaux des réservoirs sont donnés dans le tableau ci-dessous.

TABLE 4.7 – Capacités des stockages initiaux

Zone1	S11	S12	S13	S14
valeur	0	10	20	40
Zone2	S21	S22	S23	S24
valeur	1	20	15	0
Zone3	S31	S32	S33	S34
valeur	1	1	1	0

Le manque de données suffisantes pour déterminer la répartition des zones nous a amené à procéder par la méthode Trial and Error. Le résultat obtenu est donné dans le Tableau ci-dessous :

TABLE 4.8 – Les proportions des zones par Trial and Error.

Zone	1	2	3
Trial and error	0.7	0.2	0.1

Les paramètres déjà cités précédemment, sont calé à partir d'un jeu de 100 données (Trial and Error), en variant les paramètres jusqu'à avoir le meilleur NASH pour le Tank Model.

Résultats et Discussions

TABLE 4.9 – Critères d'évaluation lors de la phase d'initialisation

Critère	<i>NASH</i>	R^2
valeur	0.1785	0.1845

D'après le tableau ci-dessus on remarque que les critères numériques sont très faibles, et que le modèle n'arrive pas à reproduire les pics observés comme le montre la figure(4.1)

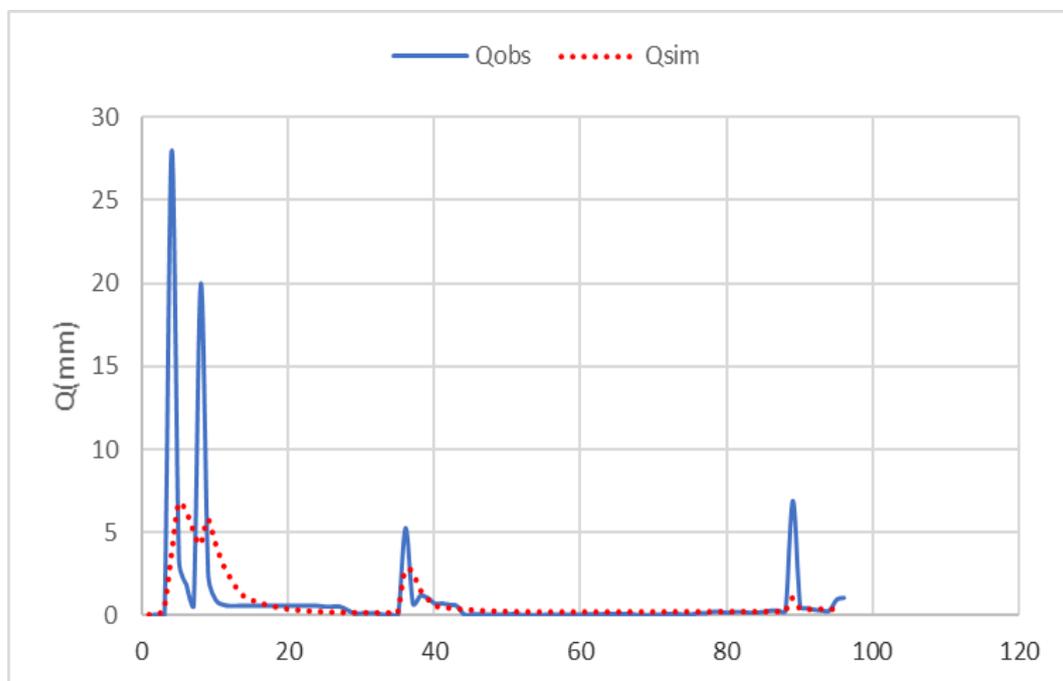


FIGURE 4.4 – Évolution du débit lors de l'initialisation

Conclusion

En appliquant le modèle pour la totalité des données, on aura un résultat beaucoup plus médiocre, c'est pour cela que par la suite le Tank Model sera couplé avec le filtre de Kalman pour essayer d'améliorer les résultats.

4.3.2 Couplage du Tank Model avec le filtre de Kalman

Initialisation

Le vecteur d'état initial $X(0)$ s'écrit comme suit :

$$X(0) = [Par(zone1) \quad Par(zone2) \quad Par(zone3)]^T$$

D'ou $X(0) = [0.05 \ 0.16 \ 0.01 \ 0.07 \ 0.01 \ 0.05 \ 0.3 \ 0.6 \ 10 \ 8 \ 5 \ 2 \ 1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.5 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.4 \ 0.07 \ 1 \ 5 \ 2 \ 1 \ 2 \ 0.001 \ 0.01 \ 0.06 \ 0.001 \ 0.2 \ 1 \ 0.8 \ 0.6 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$

La matrice de covariance initiale $P(0|0)$:

On fixe la diagonale, ensuite on calcule les autres éléments de la matrice.

Les éléments de la diagonale sont : $[0.06 \ 0.06 \ 0.06 \ 0.06 \ 0.06 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.6 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.00091 \ 0.00091 \ 0.00091 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5]$

On suppose que chaque élément de la diagonale soit une variance :

$$P(i, i) = \sigma_i^2$$

Ensuite, on calcule les autres éléments :

$$P(i, j) = \sigma_i \times \sigma_j$$

Pour la matrice de variance d'erreur de la mesure $R(k)$, la valeur initiale est de 0.0001.

Et pour la matrice de covariance d'erreur du système initiale $M(0)$, elle est déterminée par Trial and Error avec une diagonale de 0.001 pour chaque élément, et de 0 pour les autres éléments.

Résultats et Discussions

Les valeurs des critères numériques sont données dans le tableau ci-dessous.

TABLE 4.10 – Critère d'évaluation

	Calage	Validation
<i>NASH</i>	0.9655	0.9799
<i>R²</i>	0.9665	0.9817
<i>PBIAS</i>	0.0161	0.0132
<i>RSR</i>	0.1858	0.1419

Les résultats obtenus pour le NASH sont très bons avec une valeur de 96% en période de calage, avec une légère élévation de 1% en période de validation, cela se traduit graphiquement par une reproduction quasi parfaite des pics que ce soit en période de calage(Figure 4.5) ou en période de validation(Figure 4.6)

Le coefficient de détermination R^2 dépasse les 96% et donne une bonne indication en phase calage et de validation, ce qui indique une très bonne distribution entre les valeurs simulées et observées.

le *PBIAS* indique que la tendance de la prédiction suit la tendance des observations d'une façon quasi parfaite ($PBIAS < 10\%$), avec une sous estimation que se soit en phase calage, ou en celle de validation.

Le *RSR* indique une très bonne simulation que ce soit en calage, ou en validation ($RSR < 0.3$), avec une reproduction quasi parfaite des débits observés et simulés(Figure 4.5, Figure 4.6).

D'après le tableau des critères, on remarque qu'il y a une légère amélioration des résultats en validation pour tout les critères étudiés.

4.3. APPLICATION DU MULTI-TANK MODEL POUR LE BASSIN VERSANT DE BISKRA

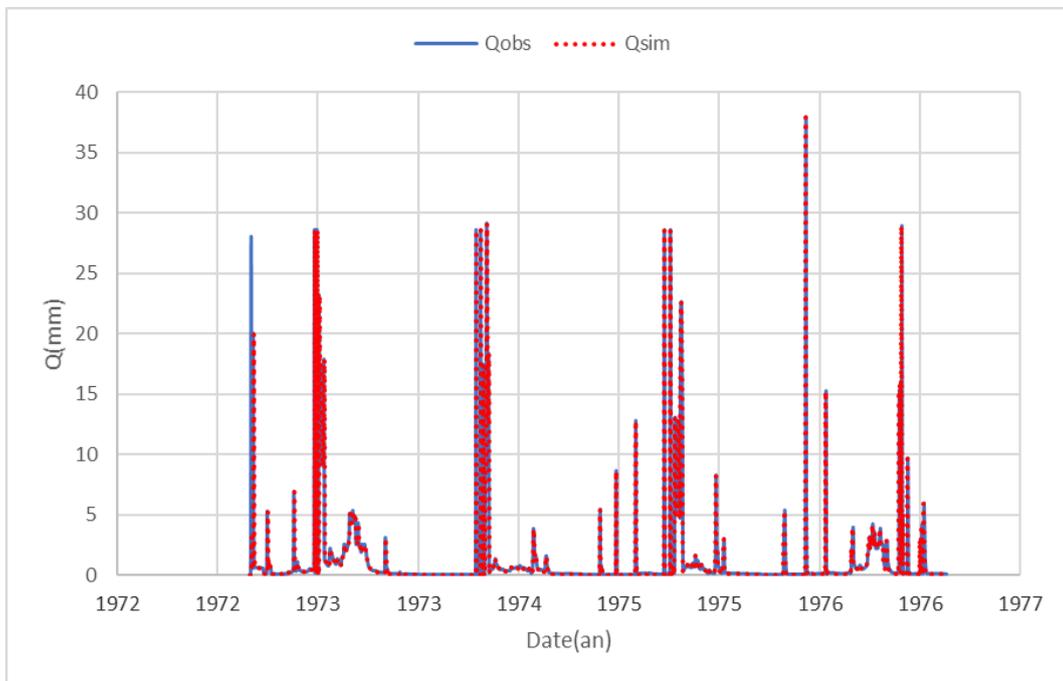


FIGURE 4.5 – Évolution du débit en phase de calage

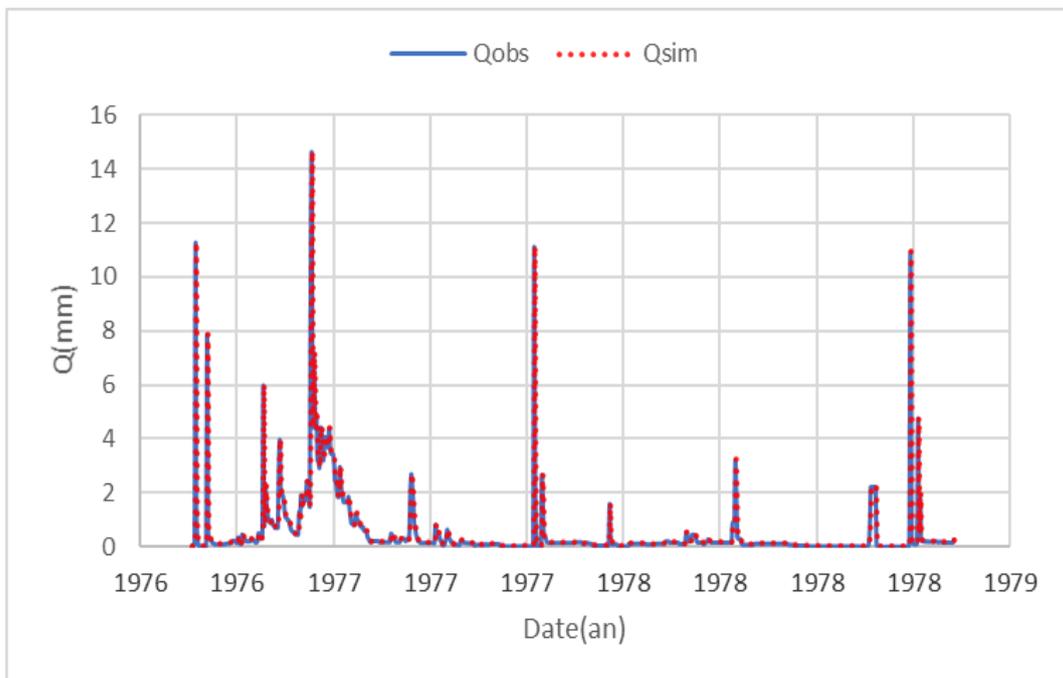
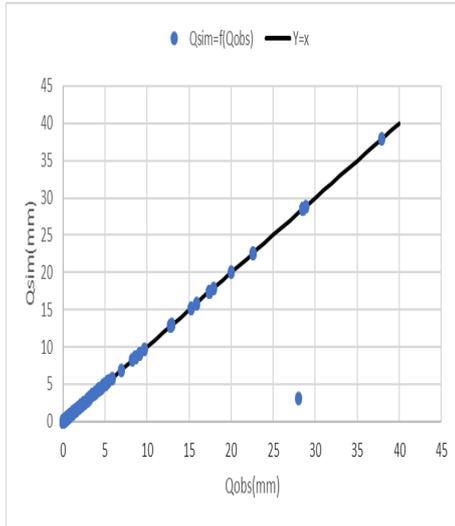


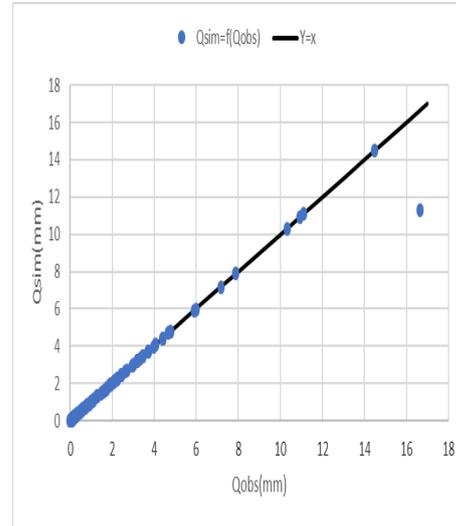
FIGURE 4.6 – Évolution du débit en phase de validation

4.3. APPLICATION DU MULTI-TANK MODEL POUR LE BASSIN VERSANT DE BISKRA

Les graphes représentant les débits observés en fonction des débits simulés, sont les suivants :



(a) débit simulé en fonction du débit observés en période de calibration



(b) débit simulé en fonction du débit observé en période de validation

FIGURE 4.7 – Comparaison entre les débits observés et simulés

D'après la médiocrité des résultats obtenu lors de la modélisation par la structure simple du Tank Model pour le bassin versant de Briska (région aride), et la simulation quasi-parfaite par la structure complexe de ce dernier pour la même région. Par curiosité on a été amené à testé le Multi-Tank pour le bassin versant de Boucheghouf (région humide) afin de savoir si cette structure peut être généralisée.

4.4 Application du Multi-Tank Model pour le bassin versant de Boucheghouf

La série de données est divisée en deux parties, la première pour calibrer le modèle du 01/06/1985 au 06/03/1989, et la deuxième pour le valider du 07/03/1989 au 04/05/1991.

4.4.1 Initialisation des paramètres

Les paramètres initiaux du modèle sont calés de la même façon que le bassin versant de Biskra. Leurs valeurs sont données dans les tableaux ci-dessous :

Zone 1 :

TABLE 4.11 – Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 1

paramètre	a11	a12	a13	a14	a15
valeur	0.001	0.001	0.6	0.01	0.01
paramètre	b11	b12	b13		
valeur	0.9	0.1	0.3		
paramètre	H11	H12	H13	H14	H15
valeur	10	5	5	5	10

Zone 2 :

TABLE 4.12 – Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 2

paramètre	a21	a22	a23	a24	a25
valeur	0.0001	0.001	0.01	0.01	0.01
paramètre	b21	b22	b23		
valeur	0.2	0.01	0.1		
paramètre	H21	H22	H23	H24	H25
valeur	2	7	2	5	7

4.4. APPLICATION DU MULTI-TANK MODEL POUR LE BASSIN VERSANT DE BOUCHEGHOUF

Zone 3 :

TABLE 4.13 – Valeurs des paramètres du Tank Model pour la zone 3

paramètre	a31	a32	a33	a34	a35
valeur	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
paramètre	b31	b32	b33		
valeur	0.5	0.2	0.2		
paramètre	H31	H32	H33	H34	H35
valeur	2	1	1	1	2

Les stockages initiaux des réservoirs sont présentés dans le tableau ci-dessous.

TABLE 4.14 – Capacités des stockages initiaux

Zone1	S11	S12	S13	S14
valeur	1	2	0	0
Zone2	S21	S22	S23	S24
valeur	0	15	0	1
Zone3	S31	S32	S33	S34
valeur	20	10	10	0

La répartition des zones sont données dans le tableau ci-dessous.

TABLE 4.15 – proportions des zones par Trial and Error.

Zone	1	2	3
Trial and error	0.5	0.4	0.1

Le modèle a été initialiser pour les 100 premières valeurs de la série de donnée pour déterminer les paramètres optimums déjà cités en haut, en variant les paramètres jusqu'à avoir les meilleurs critères pour le Tank Model sans filtre de Kalman.

4.4. APPLICATION DU MULTI-TANK MODEL POUR LE BASSIN VERSANT DE BOUCHEGHOUF

Observations et Discussions

Les résultats de ce test sont donnés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 4.16 – Critères d'évaluation lors de la phase d'initialisation

Critère	<i>NASH</i>	R^2
valeur	0.3605	0.4467

Comme il est remarqué sur le tableau des critères, le Tank Model a donné des résultats médiocres, se traduisant graphiquement par une mauvaise reproduction de l'évolution des débits observés et simulés. (Figure 4.8)

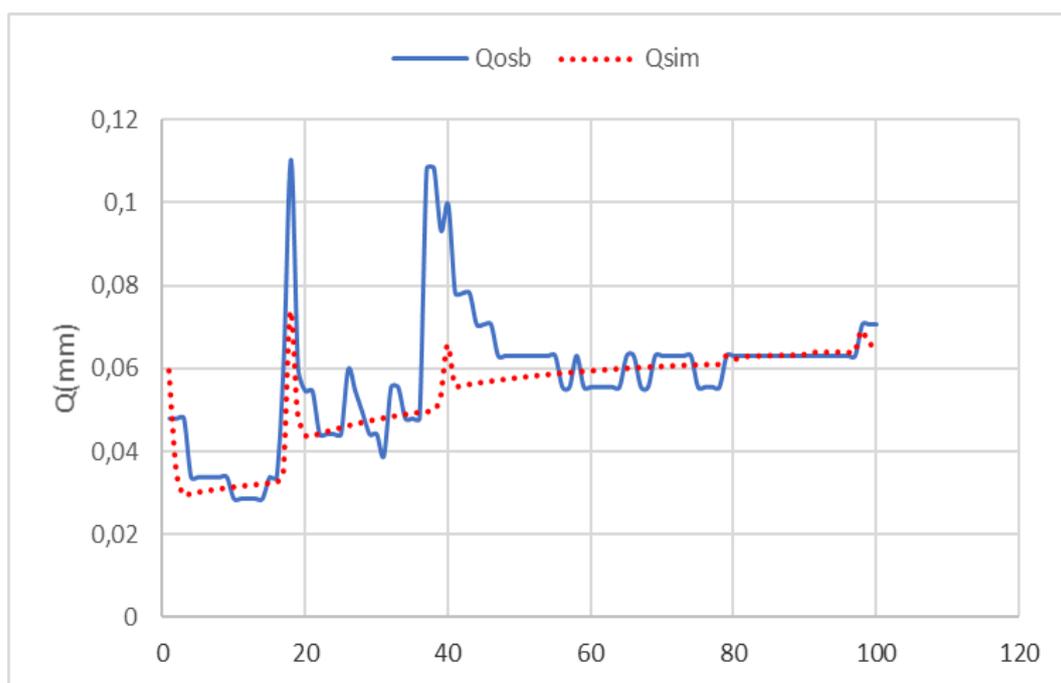


FIGURE 4.8 – Évolution du débit lors de l'initialisation

4.4.2 couplage avec le filtre de Kalman

Initialisation

Le vecteur d'état initial $X(0)$ s'écrit de la même façon que pour le bassin versant de Biskra :

$$X(0) = [Par(zone1) \quad Par(zone2) \quad Par(zone3)]^T$$

D'ou $X(0) = [0.001 \ 0.001 \ 0.6 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.9 \ 0.1 \ 0.3 \ 10 \ 5 \ 5 \ 5 \ 10 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.2 \ 0.01 \ 0.1 \ 2 \ 7 \ 2 \ 5 \ 7 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.5 \ 0.2 \ 0.2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2]^T$

La matrice de covariance $P(k|k)$: c'est la même matrice qu'on a utilisé pour bassin versant de Biskra .

Il est de même pour la matrice de covariance d'erreur de la mesure $R(k)$, et pour celle du système $M(k)$.

Résultats et Discussions

TABLE 4.17 – Critère d'évaluation

	Calage	Validation
<i>NASH</i>	0.9745	0.9342
R^2	0.9745	0.9342
$ PBIAS $	0.0195	0.0288
<i>RSR</i>	0.1597	0.2566

En période de calage le *NASH* et R^2 dépassent les 97% qui se traduit par des pics simulés similaire a ceux observés,et une reproduction quasi parfaite de tout les événements (Figure 4.9, Figure 4.10), avec une légère diminution de 3% en phase de validation mais la reproduction des débits reste toujours très bonne.

Le *PBIAS* indique une très bonne simulation en période de calage et en période de validation ($PBIAS < 10\%$) avec une sous-estimation que ce soit en calage ou en validation.

Le *RSR* donne des bons résultats ($RSR > 30\%$) ceci indique que les erreurs du modèles ne sont pas toute fois importante en période de calage ou en période de validation.

4.4. APPLICATION DU MULTI-TANK MODEL POUR LE BASSIN VERSANT DE BOUCHEGHOUF

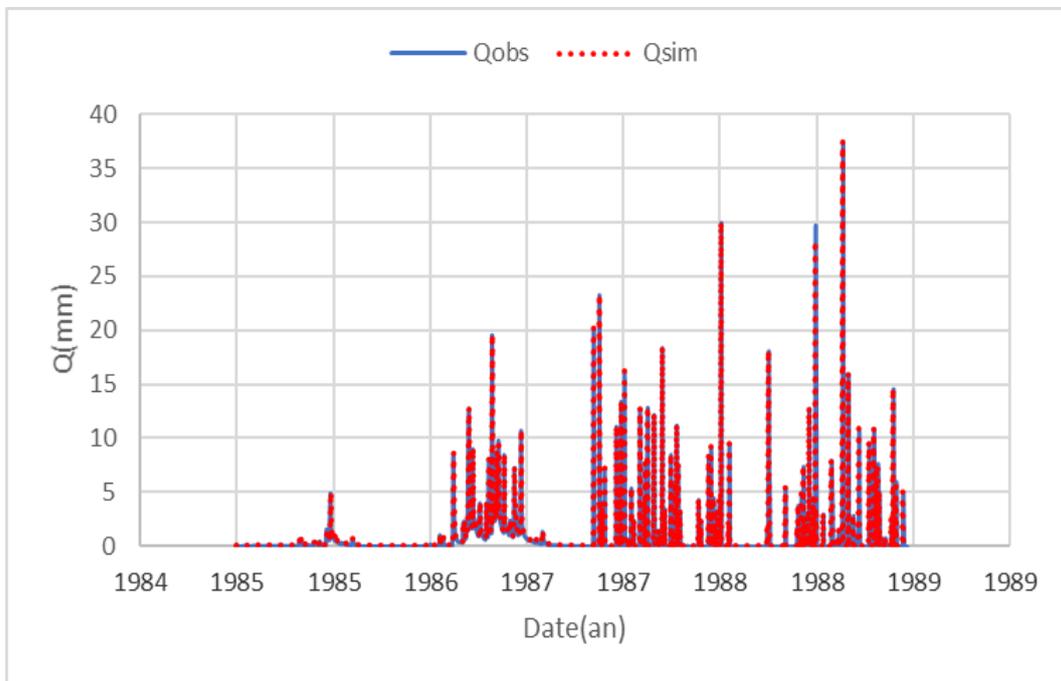


FIGURE 4.9 – Évolution du débit en phase de calage

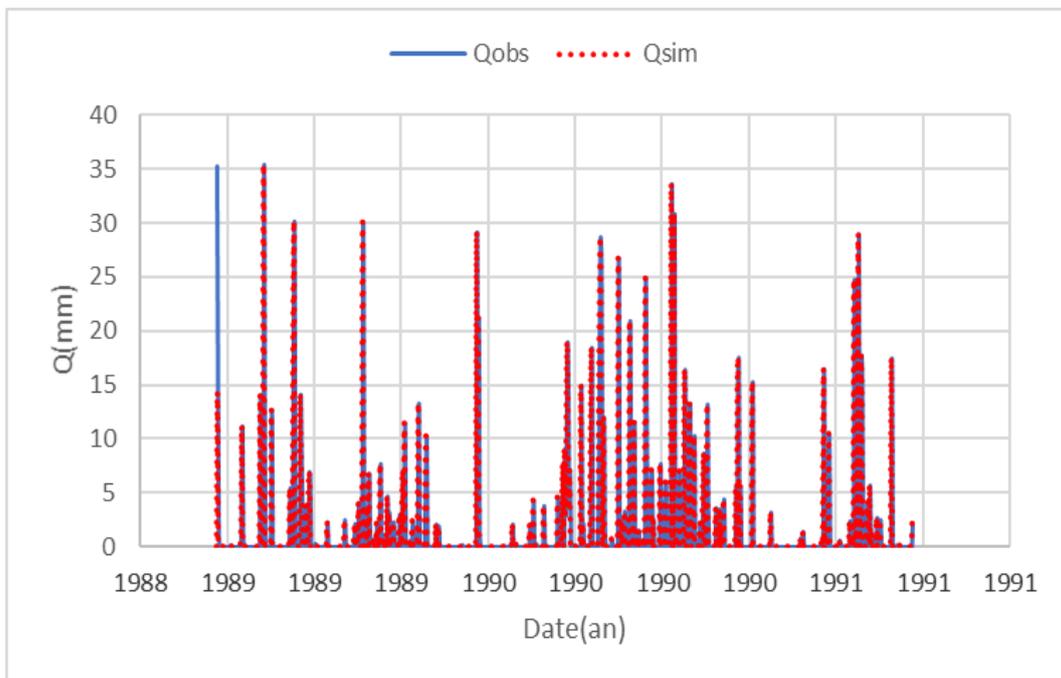
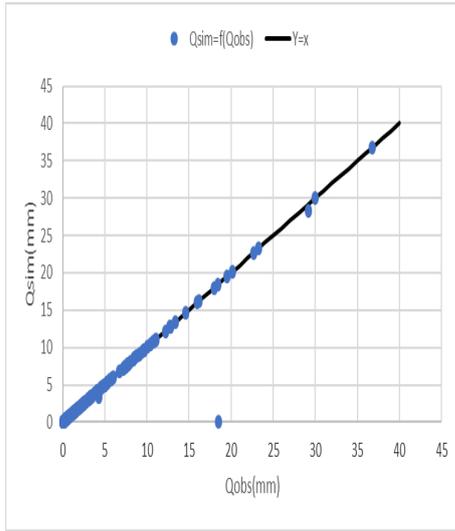
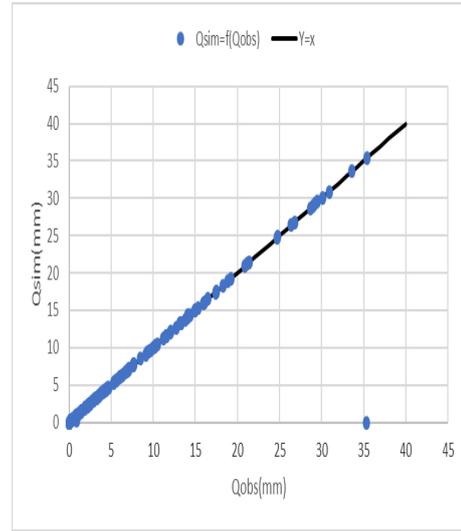


FIGURE 4.10 – Évolution du débit en phase de validation

4.5. CONCLUSION



(a) débit simulé en fonction du débit observé avec Tank Model couplé avec le fk en période de calibration



(b) débit simulé en fonction du débit observé avec Tank Model couplé avec le fk en période de validation

FIGURE 4.11 – Comparaison entre les débits observés et simulés

D'après les résultats obtenus de la modélisation pluie-débit par le Multi-Tank Model pour le bassin versant de Boucheghouf, on remarque que la structure complexe suggérée par Sugawara pour des régions arides donne de très bons résultats dans une région humide.

4.5 Conclusion

La modélisation pluie-débit par le Tank Model simple couplé avec le filtre de Kalman a présenté de très mauvais résultats pour le bassin versant de Biskra, malgré que ce modèle a été jugé performant pour quelques bassins versants Algériens (Chefia, Isser et Zardezas [27]). cela est due à l'aridité de la région d'étude.

Par contre le Multi-Tank Model, suggéré par Sugawara pour des régions arides, couplé avec le filtre de Kalman a présenté de très bons résultats, que ce soit pour le bassin versant de Biskra, ou celui de Boucheghouf, sachant que ce dernier est jugé humide.

Le Tank Model a présenté de très mauvais résultats pour la structure simple, ainsi que pour la structure complexe.

Conclusion générale

La relation pluie-débit représente un axe de recherche important en hydrologie du fait qu'elle permet de comprendre les mécanismes de génération de débits et d'anticiper les phénomènes hydrologiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations.

L'objectif essentiel de ce mémoire, était de répondre à la question concernant l'application du Tank Model développé par Sugawara, aux bassins versants Algériens et plus particulièrement au bassin versant de Biskra, zone aride à semi aride, caractérisée par une forte variabilité annuelle et inter-annuelle de pluies et de débits, et des cycles de sécheresses qui sévissent d'une période à l'autre pour explorer les voies d'amélioration possibles de ce modèle.

La recherche de modèles plus satisfaisants a en effet, des enjeux importants. Elle permet tout d'abord une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant. Elle garantit ensuite une meilleure fiabilité aux applications qui utilisent les simulations du modèle dans un contexte opérationnel.

Nous avons en premier lieu appliqué le Tank Model simple à la zone d'étude, on a abouti alors à de très mauvais résultats concernant les critères d'évaluations numériques d'une part, et une mauvaise reproduction de l'évolution des débits observés et simulés d'autre part.

Dans l'optique d'améliorer les résultats trouvés, nous avons couplé le Tank Model au filtre de Kalman, et malgré des résultats meilleurs que ceux trouvés précédemment, ce dernier n'a pas apporté une amélioration notable des résultats, ceci s'explique par le fait de l'aridité de notre région d'étude, confirmée par le calcul de l'indice d'aridité, tout en sachant que cette structure simple du Tank model a été suggéré pour des régions humides.

Dans le but d'améliorer nos résultats on a été amené à chercher d'autres structures du Tank Model qui peuvent mieux reproduire la réponse de notre bassin versant. Le Multi-Tank suggéré par Sugawara pour les régions arides et semi-arides malgré sa complexité et son grand nombre de paramètres nous a permis d'améliorer de façon très significative les critères numériques avec une reproduction quasi-parfaite de l'évolution des débits simulés et observés.

4.5. CONCLUSION

Enfin, cette structure complexe du Tank Model a été testé pour une région humide (Boucheouf) dans le but de généraliser cette dernière, et pour ne plus avoir à faire avec la structure simple qui a des limites d'application déjà confirmées en l'appliquant au bassin versant aride de Biskra, et la aussi on a obtenu de très bons résultats que ce soit pour les critères numériques ou graphiques.

En perspective, on suggère d'une part, de tester le modèle de la structure complexe, en enlevant l'évapotranspiration du deuxième réservoir si le premier est vide et du troisième si le deuxième est vide et ainsi de suite.

D'autre part, l'humidité du sol étant un paramètre non négligeable dans la modélisation pluie-débit, malgré qu'elle n'est pas assez simple à modéliser, mais elle suit parfaitement le fonctionnement physique du bassin versant, on suggère d'introduire l'humidité du sol dans la structure du Tank Model développée par Sugawara, qui prend en compte l'humidité primaire et secondaire.

Bibliographie

[1] Benoit Hingray, Cécile Picouet, André Musy <Hydrologie une science pour l'ingénieur>.

[2] Ytoui.Y <Modélisation de la relation pluie-débit aux pas de temps mensuel journalier par les modèles conceptuels et neuro-flous (Application au bassin versant de Isser)>Thèse d'Ingénieur à l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012.

[3] Perrin.C, <vers une amélioration d'un modèle globale pluie-débit au travers une approche comparative>, Thèse de doctorat, de l'INPG, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, Octobre2000.

[4] Michel, C. (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.

[5] Refsgaard, J.C. et Abbott, M.B. (1996). The role of distributed hydrological modelling in water resources management - Chapter 1. In : Distributed Hydrological modelling, M. B. Abbott et J. C. Refsgaard (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-16.

[6] Clarke, R.T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. Journal of Hydrology, 19, 1-20.

[7] Ambroise, B. (1998). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. *H*G*A* (Ed.), Bucarest, 200 p.

[8] Medane.K <Hydrologie et modélisation pluie-débit cas du bassin de l'Oued Boumessaoud> à l'université d'Aboubaker Belkaid Tlemcen, 2012.

[9] Charles Perrin, Claude Michel, Vazken Andreassian <résumé des modèles hydrologique de Génie Rural> (2007).

[10] Benkaci.T <Modélisation pluie-débit mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les systèmes Neuro-flous (Application aux bassins Algériens)> Thèse de doctorat à l'Institut National Agronomique d'Alger, 2005.

- [11] Sugawara (1961) : An analysis of runoff structure about several Japanese rivers.
- [12] NJ.SHRIMALI : Ph.D. THESIS(Chapter 14).
- [13] Livre de géoscience (Volume 23 science hydrologique), Kenji Satake.
- [14] RIM OUACHANI , ZOUBEIDA BARGAOUI et TAHA OUARDA (2007). Intégration d'un filtre de Kalman dans le modèle hydrologique HBV pour la prévision des débits, Hydrological Sciences Journal, 52 :2, 318-337.
- [15]Kalman, R. E. (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. J. Basic Engng.
- [16]Boudevillain, B. (2003) Contribution à la définition des caractéristiques d'un radar hydrologique urbain. Prévision de la pluie à très courte échéance. Thèse Doctorat, Blaise Pascal (UFR de Recherche Scientifique et Technique), Ecole Doctorale des Sciences Fondamentales, Paris, France.
- [17]Bàlint, G. (2002) State-of-the-art for flood forecasting modelling. In : HarmoniQuA—State-of-the-art Report on QA Guidelines 7, 1–11. Flood Forecasting Modelling Water Resour. Res. Centre, VITUKI, Hungary.
- [18]Georgakakos, K. P. et Smith, G. F. (1990) On improved operational hydrologic forecasting, Results from a WMO realtime forecasting experiment. J. Hydrol. 114,
- [19] Tank Model using Kalman filter by Y.H. Lee and P.V. Singh.
- [20]Hartnack, J. et Madsen, H. (2001) Data assimilation in river flow modelling. In : Proc. Fourth DHI Software Conf., (6–8 June 2001, Scanticon Conf. Centre, Helsingør, Denmark).
- [21]Troch, A., Paniconi C. et McLaughlin D. B. (2003) Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. Adv. Water Resour. 26
- [22] Abdelkader MEGUENNI-TANI.CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA NAPPE DU MIO-PLIO-QUATERNAIRE DE LA REGION SUD DE LA VILLE DE BISKRA, ALGERIE. L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN.

[23] Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau ; Volet 1 : Les ressources en eau superficielle (Tom 1 Hydrologie).

[24] Sediki.H<Détermination des zones inondables via HEC-RAS en vue de la protection de la ville de Biskra> à l'Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2016.

[25] Oudin.L<Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit>, Thèse de doctorat, de l'Ecole du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Octobre 2004.

[26] DJAOUI T<Optimisation de la consommation en énergie électrique de la STEP de Boumerdes>, Thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechniques, Juin 2016.

[27] Mohamed Amireche<comparative assessment between GR model and tank model using Kalman filter-application to Algerian bassins>.