

UNIVERSITE SAAD DAHLAB - BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement



MEMOIRE DE MASTER

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydraulique**

Thème :

**Modélisation pluie-débit par l'approche des réseaux de neurones
artificiels: « cas du bassin de Oued Allala »**

Présenté par

**MECHEHED Redhouane
SABER Billel Abdennaceur**

Devant le jury composé de :

Mme. S. TAIBI	M.C.A. U. de Blida	Présidente
M. A. HADDAD	M.C.B. U. de Blida	Examineur
Mme. S. BENKACI	M.A.A. U. de Blida	Examinatrice
Mme. K. BENZINEB	M.C.A. U. de Blida	Promotrice

Promotion 2018/2019

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mon frère, Zakaria, pour son appui et son encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mon ami et binôme SABER Billel Abdennaceur pour la bonne entente entre nous

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

MCHEHED Redhouane

A ma chère mère, qui n'a jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes chères sœurs, Ouarda et Lynda et mon frère Zaki.

A mon binôme, MECHEHED Redhouane pour sa entente et sa sympathie.

A mes chères ami(e)s de la promo master hydraulique 2018/2019.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

SABER Billel Abdennaceur

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est la vie, ce liquide est indispensable à la survie de tout être humain, animal ou végétal. Cette substance a un cycle bien connu du spécialiste du domaine tout comme n'importe quelle personne quelle conque, on parle bien sûr de l'évaporation, précipitation et ruissellement ; mais pour être plus précis, cela n'est pas tout, il y'a aussi l'infiltration, du coup la quantité d'eau précipité est divisée entre une partie qui s'infiltré, rejoignant ainsi les nappes souterraines et une autre partie qui ruisselle donnant naissance aux (oueds, rivières, fleuves, ect...) qui représenteront le chevelu hydrographique, acheminant toute cette eau vers la mer ou l'océan éventuellement.

Les études hydrologiques aide à quantifier, gérer et du coup à mieux préserver cette ressource grâce aux aménagements hydraulique.

La non-linéarité de la relation pluie-débit complique souvent la tâche des hydrologues dans leur souci de modéliser les débits à l'exutoire d'un cours d'eau. Aussi, l'identification de tous les processus intervenant sur un bassin versant et leur intégration dans un processus de modélisation abouti à des modèles complexes employant un nombre élevé de paramètres. Le recours à des modèles à faibles nombre de variables, capables de traiter la non-linéarité est donc indispensable.

Ces dernières années, avec l'apparition des algorithmes d'apprentissage par adaptation des poids et face à la non-linéarité de la relation pluie-débit, les recherches se sont approfondies vers de nouvelles approches non déterministes, comme l'illustrent les réseaux de neurones artificiels. Ils ont ouvert la voix à une catégorie de modèles pluie-débit à boîte noir basée sur l'intelligence artificielle (French et al, 1992; Minns et Hall, 1996).

Les travaux de plusieurs auteurs dans ce domaine montrent que ces modèles, inspirés du fonctionnement des neurones biologiques, sont très performants pour la simulation et la prévision des débits sur les bassins versants. Plusieurs études menées en Amérique : (Wenri et al, 2004), en Europe : (Johannet et al, 2006 ; Ayral, 2005), en Afrique (Koffi et al, 2011) et en Algérie : (Dechemi et al, 2003 ; Tarik et Dechemi, 2004) confirment les meilleurs résultats de simulation et de prévision avec les réseaux de neurones.

Notre travail de recherche s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit et de sa représentation à l'échelle de bassin versant. Notre objectif principal est de modéliser la relation pluie- débit au pas de temps mensuel du sou bassin de oued Allala à l'aide des réseaux de neurones artificiels afin d'évaluer sa capacité à simuler les débits liquides observés en comparant les résultats obtenue avec ceux observer pour voir la fiabilité et la précision du modèle développé a fin de voire si l'on peut se baser sur lui pour nos prévision future.

Ce travail se divise en quatre chapitres distincts :

- Dans le premier chapitre, nous entamons quelques notions de l'hydrologie et la modélisation hydrologique où nous présentons les modèles hydrologiques les plus utilisés et leur optimisation.
- Puis, nous présentons dans le deuxième chapitre les principales caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de oued Allala, qui a été choisi comme bassin d'application de notre travail.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse statistique et le traitement des données hydro-climatiques, où nous présentons les caractéristiques climatiques et hydrologiques du milieu récepteur.
- Dans le quatrième chapitre, nous détaillons les caractéristiques du réseaux de neurones utilisé dans ce travail : architecture, type d'apprentissage, critère d'évaluation du modèle, afin de vérifier les performances de ce modèle sur le bassin de oued Allala au pas de temps mensuel, nous avons utilisé deux modèles neuronaux, le premier à une seul entrée (la pluie) et le second à deux entrées (pluie et ETP).
- Enfin, nous terminons avec une conclusion générale, qui englobe les principales démarches effectuées et les résultats obtenus par cette étude.

Remerciement

On tient à exprimer toute notre reconnaissance à notre directrice de mémoire, Madame BENZINEB. On la remercie de nous avoir encadrés, orienté, aidé et conseillé.

On adresse nos sincères remerciements à tous les professeurs et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

On remercie nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. On remercie nos frères et sœurs, pour leurs encouragements.

Enfin, on remercie nos amis qui ont toujours été là pour nous. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, on présente nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

ملخص

الشبكات العصبية الاصطناعية هي نماذج تعليمية إحصائية تم استخدامها على نطاق واسع في علم المياه السطحية ، وذلك بفضل خصائصها التقريبية والعالمية. سوف يسمح هذا العمل البحثي من كفاءة الشبكات العصبية الرسمية في نمذجة التدفقات السائلة في حوض وادي علالة في الخطوة الزمنية الشهرية بدءًا من علاقة المطر التدفق الغير خطية. تم تحسين نموذجين للشبكات العصبية ومقارنتهما لتحقيق هذا الهدف ، النموذج الأول مع المطر كمدخل والثاني بالمطر والتبخر كمدخل. تم تحسين النماذج العصبية باستخدام خوارزمية ليفنبرغ ماركوارد (LM) .

يسمح لنا معيار ناش (%) ومعامل ارتباط بيرسون (R) بتقييم أداء هذه النماذج.

الكلمات المفتاحية: التحوير ، واد علالة ، الشبكة العصبية الاصطناعية ، خوارزمية ليفنبرغ ماركوارد

RESUME

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles d'apprentissage statistique qui ont été largement utilisés en hydrologie de surface, grâce à leurs propriétés de parcimonie et d'approximation universelle.

Ce travail de recherche permettra de vérifier l'efficacité des réseaux de neurones formels pour la modélisation des débits liquides du bassin de oued Allala au pas de temps mensuel à partir de la relation pluie-débit qui est non-linéaire. Deux modèles de réseaux de neurones ont été optimisés et comparés afin d'atteindre cet objectif, le premier modèle avec la pluie en entrée et le second avec la pluie et l'ETP en entrée.

Les modèles neuronaux ont été optimisés avec l'algorithme de Levenberg Marquardt (LM). Le critère de Nash (%) et le coefficient de corrélation de Pearson (R) ont permis d'apprécier les performances de ces modèles.

Mots Clés : Modélisation, Oued Allala, réseau de neurones artificiels, l'algorithme de Levenberg Marquardt

ABSTRACT

Artificial neural networks are statistical learning models that have been widely used in surface hydrology, thanks to their parsimony and universal approximation properties. This research work will verify the efficiency of the formal neural networks for the modeling of the liquid bits of the Wadi Allala basin at the monthly time step starting from the rain-rainfall relationship which is nonlinear. Two models of neural networks were optimized and compared to achieve this objective, the first model with rain as input and the second with rain and evapotranspiration as input. Neuronal models were optimized with the Levenberg Marquardt (LM) algorithm. The Nash criterion (%) and Pearson's correlation coefficient (R) allowed us to assess the performance of these models.

Keywords: Modulation, Wadi Allala, Artificial Neural Network, Levenberg Marquardt Algorithm

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Fig 1.1 : Cycle hydrologique (Maidment, 1992)	4
Fig 1.2 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique (Roche ,1963)	5
Fig I.3 : Les variables d'un modèle hydrologique (d'après Gaume ,2002)	8
Fig I.4 : Schématisation d'un modèle global pluie-débit (Oudin, 2004)	9
Fig I.5 : Schéma de la structure d'un modèle conceptuel GR4J (Perrin et al.2001)	12
Fig I.6 : Système neuronale (boite noire) (Harouna, 2009)	14

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Fig II.1 : Carte de situation du bassin d'oued Allala (LARIBI, 2013)	19
Fig II.2 : Représentation en 3D des rectangles équivalents des sous bassin (Remaoun 2007)	22
Fig II.3 : MNT du bassin versant de Oued Allala	23
Fig II.4 : La carte hypsométrique du bassin d'Oued Allala	24
Fig II.5 : Courbes hypsométriques du sous bassin de Oued Allala	25
Fig II.6 : Chevelu hydrographique du B.V de Oued Allala. (Source A.N.R.H Chlef)	29
Fig II.7: Profile en long de Oued Allala	30
Fig II.8 : Carte géologique du bassin versant de Oued Allala (ONM Chlef)	32
Fig II.9 : Carte lithologique du bassin versant de Oued Allala. (Mattaeur, 1985)	33
Fig II.10 : Carte de végétation du bassin versant de Oued Allala (ONM Chlef)	34

Liste des figures

Chapitre III : Critique des données hydro-climatique

Fig III.1: Double cumule de pluie annuelle entre TENES et ABOU EL HASSEN	38
Fig III.2: Les variations des précipitations annuelles des deux stations (1995-2016)	39
Fig III.3: Ajustement des précipitations annuelles de (a) ABOU EL HASSEN, (b) TENES	41
Fig III.4 : Histogramme des précipitations mensuelles (TENES & ABOU EL HASSEN)	42
Fig III.5 : Histogramme des températures moyennes, maximales et minimales	43
Fig III.6 : Les variations des débits annuelles dans la zone d'étude (1995-2016)	44
Fig III.7 : Ajustement des débits annuels de la zone d'étude par la loi normale	45
Fig III.8 : Diagramme ombro thermique de Bagnouls et Gaussen sur le bassin de Oued Allala (1995-2016)	46
Fig III.9: Climagramme d'emberger	48

Chapitre IV: Modélisation neuronale des débits liquides du bassin de Oued Allala

Fig IV.1: Schéma d'un neurone formel avec ses variables x , ses paramètres w , sa fonction d'activation f et sa sortie y	51
Fig IV.2: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel (Touzet, 1992)	51
Fig IV.3 : Réseau de neurones monocouche	52
Fig IV.4: Structure générale d'un réseau de neurones multicouches	53
Fig IV.5: Organigramme de conception d'un réseau de neurones (Benzineb, 2017)	55
Fig IV.6 : Architecture simplifier du modèle neuronal a une seule entrée ; (a) Station d'ABOU EL HASSEN, (b) Station de TENES	56
Fig IV.7: Architecture simplifier du modèle neuronal a deux entrées ; (a) Station d'ABOU EL HASSEN, (b) Station de TENES	57
Fig IV.8: Hydrogrammes issu des simulations réalisées en phase de calage, à l'aide des modèles	

Liste des figures

neuronaux à une seule entrée ; (a) station de TENES, (b) station d'ABOU EL HASSEN 60

Fig IV.9: Hydrogrammes issu des simulations réalisées en phase de calage, à l'aide des modèles
neuronaux à deux entrées ; (a) station de TENES, (b) station d'ABOU EL HASSEN 61

Liste des tableaux

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1 : Surfaces partielles du sous bassin Oued Allala par tranche d'altitude	25
Tableau II.2 : Classification de relief	27
Tableau II. 3 : Répartition de différentes formations géologiques du B.V de Oued Allalla	32
Tableau II.4: Synthèse des caractéristiques hydro-morphologiques du bassin versant de Oued Allala	35

Chapitre III : Critique des données hydro-climatique

Tableau III.1. Coordonnées des stations pluviométriques et hydrométriques	36
Tableau III.2: Données pluviométriques annuelles des deux stations d'étude	39
Tableau III.3 : Paramètres d'ajustement de la loi normal	40
Tableau III.4 : Précipitations annuelles fréquentielles	41
Tableau III.5: Variation des précipitations moyenne mensuelle (1995-2016)	42
Tableau III.6 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles en mm (1995-2016)	43
Tableau III.7 : Données hydrométriques annuelles de la zone d'étude	44
Tableau III.8 : Ajustement des débits à l'aide de la loi normale (GAUSS)	45
Tableau III.9: Paramètres bioclimatiques calculés selon Bagnouls et Gaussen	46

Chapitre IV : Modélisation neuronale des débits liquides du bassin de Oued Allala

Tableau IV.1: La meilleure architecture de réseaux de neurones retenue	55
Tableau IV.2: Performance des modèles neuronaux aux stations d'études	60

Table des Matière

Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Sommaire	
Introduction générale	1

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

I.1.Introduction	3
I.1.1.Cycle hydrologique	3
I.2. Notion de bassin versant	4
I.3. Régime hydrologique	6
I.3.1.Régimes à échelles temporelles	6
I.3.2.Régimes à échelles spatiales	6
I.4. Modélisation Hydrologique et modèles pluie-débit	7
I.4.1.Définition	7
I.4.2.Objectifs de la modélisation pluie débit	9
I.4.3.Etapes d'élaboration d'un modèle	10
I.4.4.Classification des modèles pluie-débit	11
I.4.4.1.Les modèles conceptuels	11
I.4.4.2.Les modèles à base physique	12
I.4.4.3.Les modèles « boîte noire » (réseaux neuronales)	14
I.5.Optimisation	15
I.5.1 Les méthodes locales	16
I.5.2 Les méthodes globales	17
I.6. Conclusion	17

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

II.1.Introduction.	19
II.2.Situation géographique	19
II.3. Etude géomorphologique.	20
II.3.1. Paramètres géométriques	20
II.3.1.1. Superficie	20
II.3.1.2.Périmètre	20
II.3.1.3. Paramètres de forme	20
II.3.2. Caractéristiques topographiques	22
II.3.2.1.Le relief	22
II.3.2.2.Hypsométrie	23
II.3.2.3.La courbe hypsométrique	24
II.3.2.4.Altitudes caractéristiques	25
II.3.2.5.Les indices de pentes	26
II.3.3. Etude de réseau hydrographique	28
II.3.3.1.Constitution du réseau hydrographique	28
II.3.3.2. Paramètres hydrographiques	29
II.3.4. Temps de concentration (T_c)	31
II.4. La géologie et la lithologie de la zone d'étude	.31
II.5. Végétation et occupation du sol	.33
II.6.Conclusion	35

Chapitre III

Critique des données

III.1.Introduction	36
III.2.Equipement du sous bassin	36
III.3. Traitement des données hydro-climatiques	37

III.3.1. Analyse de la pluviométrie du bassin de Oued Allala	37
III.3.1.1. Test d'homogénéité	37
III.3.1.2. Pluviométrie annuelle	38
III.3.1.3. Variation des pluies mensuelles et saisonnières	42
III.3.2. Températures	43
III.3.3. Evapotranspiration	43
III.3.4. Hydrométrie	44
III.3.5. Type de climat	45
III.3.5.1. Indice xérothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)	45
III.3.5.2. Indice annuel d'aridité de De Martonne (1926)	46
III.3.5.3. Le quotient pluvio thermique d'Emberger (1955)	47
III.4. Conclusion	48

Chapitre IV

Modélisation neuronale des débits liquides du bassin de Oued Allala

IV.1. Introduction	49
IV.2. Généralités sur les réseaux de neurones artificiels	49
IV.2.1. Historique	49
IV.2.2. Réseaux de neurones	50
IV.2.2.1. Le neurone formel (artificiel)	50
IV.2.2.2. Architecture des réseaux de neurones	51
IV.3. Etude de la relation pluie débit du bassin de Oued Allala par les RNA	53
IV.3.1. Mise en œuvre des réseaux de neurones	53
IV.3.2. Choix d'un réseau de neurones	54
IV.3.3. Choix du nombre d'unités cachées	54
IV.3.4. Critères de performance	57
IV.3.5. Résultats et discussion	59

IV.4. Conclusion	62
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	64
Annexes	68

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

L'hydrologie est la science de l'eau ; molécule, gaz, liquide ou solide, l'eau voit son étude ressortir à la physique et à la chimie. C'est à l'étude de l'eau dans la nature, où s'expriment évidemment ses propriétés physico-chimiques, qu'est consacrée l'hydrologie. L'eau apparaît dans la nature sous des formes et selon des rythmes extraordinairement diversifiés, mais toujours dans le cadre d'un milieu, souvent support d'un écosystème, où se déroulent de nombreux phénomènes physiques, chimiques et biologiques. L'eau est le constituant presque exclusif de certains de ces milieux (océans, glaciers, rivières, lacs...), alors qu'ailleurs (atmosphère, sols, nappes souterraines...) elle est mêlée ou juxtaposée à d'autres constituants. Dans tous les cas, la spécificité des milieux résulte de l'organisation et de la hiérarchie des phénomènes qui s'y déroulent. On sait aujourd'hui que ces milieux sont les phases d'un cycle de l'eau – structure de l'hydrosphère terrestre – animé par l'énergie du Soleil, qu'il contribue à redistribuer à la surface de la Terre. L'existence et le fonctionnement de ce cycle n'ont été clairement établis qu'au XIX^e siècle, en particulier grâce à la pratique du bilan hydrologique, avatar du principe universel de conservation de la matière.[1]

La modélisation hydrologique s'intéresse à la représentation des variations spatiales et temporelles des flux des eaux à l'échelle du bassin versant à l'aide de bilans de masse, de quantité de mouvements et d'énergie thermique. Les principaux processus physiques caractérisant ces bilans sont : la précipitation, l'évapotranspiration, la condensation, la fonte de neige (incluant la sublimation), l'infiltration, l'écoulement en milieux poreux, la recharge des eaux souterraines, et l'écoulement des eaux de surface. [J. P. Villeneuve et al, 1998]

I.1.1.Cycle hydrologique

Le cycle de l'eau global peut se résumer approximativement de la façon suivante selon Boe (2007) :

Grâce principalement à l'énergie fournie par le rayonnement solaire, l'eau s'évapore au dessus des surfaces océaniques et terrestres (si de l'eau y est disponible). Cette vapeur d'eau est advectée par les vents puis se condense, formant les nuages et produisant les précipitations. Les précipitations continentales peuvent être stockées provisoirement sous forme de neige et d'humidité dans les sols. Contrairement aux océans, il y a un excès de

précipitations par rapport à l'évaporation au dessus des terres : l'excès d'eau qui n'est pas évaporé ruisselle, formant rivières et fleuves et retourne vers les océans, bouclant ainsi le cycle. Ce cycle est illustré dans la figure I.1 (Maidment, 1992). Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains qui constituent les principaux chapitres de l'hydrologie. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique.

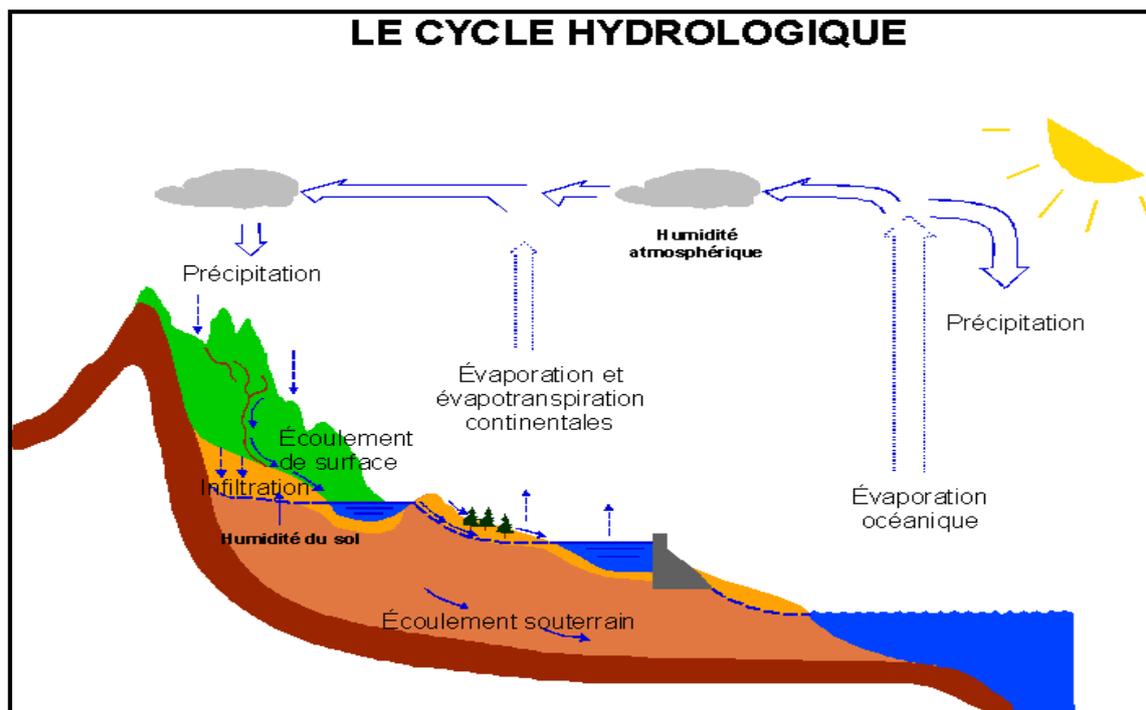


Figure.1.1 Cycle hydrologique (Maidment, 1992).

I.2. Notion de bassin versant

Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un " système " est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y

pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite.

Généralement, la ligne de partage des eaux correspond à la ligne de crête. On parle alors de bassin versant topographique.

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (voir Fig. I.2). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. Il est appelé dans ce cas **bassin versant réel**. [2]

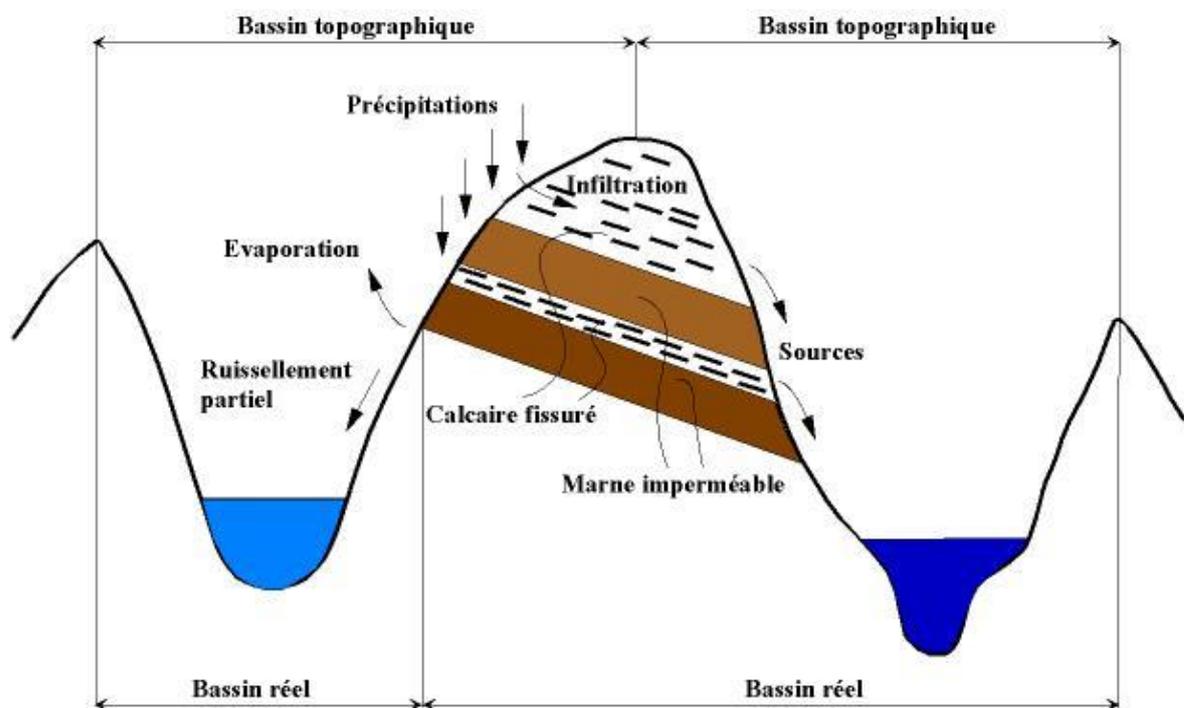


Figure.1.2 - Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique
(Roche ,1963).

I.3. Régime hydrologique

Le régime hydrologique est la variation du débit d'un fleuve. Les relevés de débit d'une rivière pendant une longue série d'années montrent des variations saisonnières systématiques (position des basses et hautes eaux) en fonction des principaux facteurs influençant l'écoulement: le régime de précipitation, la nature du bassin versant, sa situation géographique, infiltration, etc.

1.3.1. Régimes à échelles temporelles

A l'origine des variations des écoulements, se trouvent les phénomènes physiques qui les provoquent. Il s'agit des précipitations, de l'évapotranspiration ainsi que des phénomènes de stockage et de transfert dans les réservoirs superficiels et souterrains. La durée sur laquelle chacun de ces rythmes est observable, varie considérablement d'un phénomène physique à un autre. Ainsi selon les cas, ces durées peuvent être de l'ordre :

- De quelques heures à quelques jours pour des variations brutales du débit, lors des crues provoquées par de fortes pluies sur de petits bassins.
- Du mois pour des crues lentes provoquées par des précipitations sur de grands bassins ou bien dues à la fonte nivale.
- De la saison pour les variations liées aux évapotranspirations qui agissent sur les niveaux des nappes et indirectement sur les écoulements en rivière (réservoir sol...).
- De l'année ou d'avantage, lorsqu'il s'agit d'évolutions d'origine anthropique ou liées à des variations climatiques.

Par conséquent, la caractérisation du régime hydrologique passe nécessairement par une synthèse de la variabilité observée. Cette synthèse doit se faire en fonction de l'échelle temporelle des événements que l'on cherche à caractériser. On ne procède pas de la même façon si l'on désire étudier le régime des crues, des étiages ou encore celui des variations saisonnières du débit.

1.3.2. Régimes à échelles spatiales

Lorsqu'on travaille à grande échelle, le débit de pointe de la crue observée varie de l'amont à l'aval du cours d'eau sous l'effet des apports des différents affluents. La

répartition de la pluie sur le bassin versant peut parfois mener à observer une crue moins forte à l'aval qu'à l'amont.

Le plus souvent c'est la répartition spatiale de la pluie qui explique cette variabilité. Mais même avec une pluie répartie de façon homogène sur le bassin versant, on peut observer une variabilité spatiale de la fréquence. En effet, une pluie courte et intense va générer une crue forte à l'amont, mais pas forcément à l'aval. Et au contraire, une pluie peu intense mais assez longue ne donnera pas lieu à une crue importante à l'amont, mais qui peut être forte à l'aval (KREIS N 2004).

I.4. Modélisation Hydrologique et modèles pluie-débit

I.4.1. Définition

Pour comprendre la notion d'un modèle hydrologique, il est indispensable de connaître l'ensemble d'éléments qui le constituent. Comme il a été présenté par Bonn (2003), un modèle est une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir.

Cette représentation se fait grâce à l'ensemble d'équation mathématique qui est appelée à reproduire le système. On distingue quatre types de variables qui peuvent exister en totalité ou en partie au niveau de chaque modèle figure (I.3) :

- **Variables d'entrées** : le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et /ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques et hydrodynamique du milieu,...).
- **Variables de sortie** : le modèle répond par un ensemble de variables (débit, flux ou concentration en polluants,...).
- **Variables d'état** : Elles permettant de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols, pentes, ...).

- **Paramètre de calage** : En plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation,...) (Gaume, 2002).

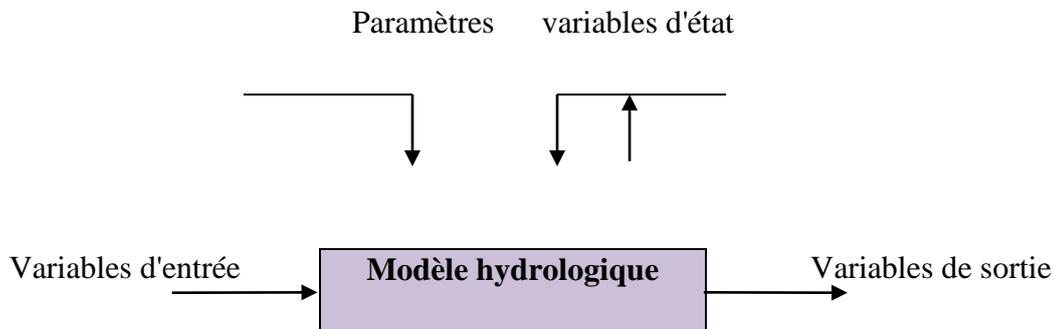


Figure.1.3 : Les variables d'un modèle hydrologique (d'après Gaume ,2002)

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil informatique qui représente la relation entre la pluie et le débit dans un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). [J. P. Bwira, master1. 2015]

Un modèle hydrologique est caractérisé par cinq éléments qui le constituent:

- la géométrie du bassin versant (le système).
- les entrées du système.
- les lois de formalisation des processus.
- l'état initial et les conditions aux limites du système.
- Les sorties du modèle.

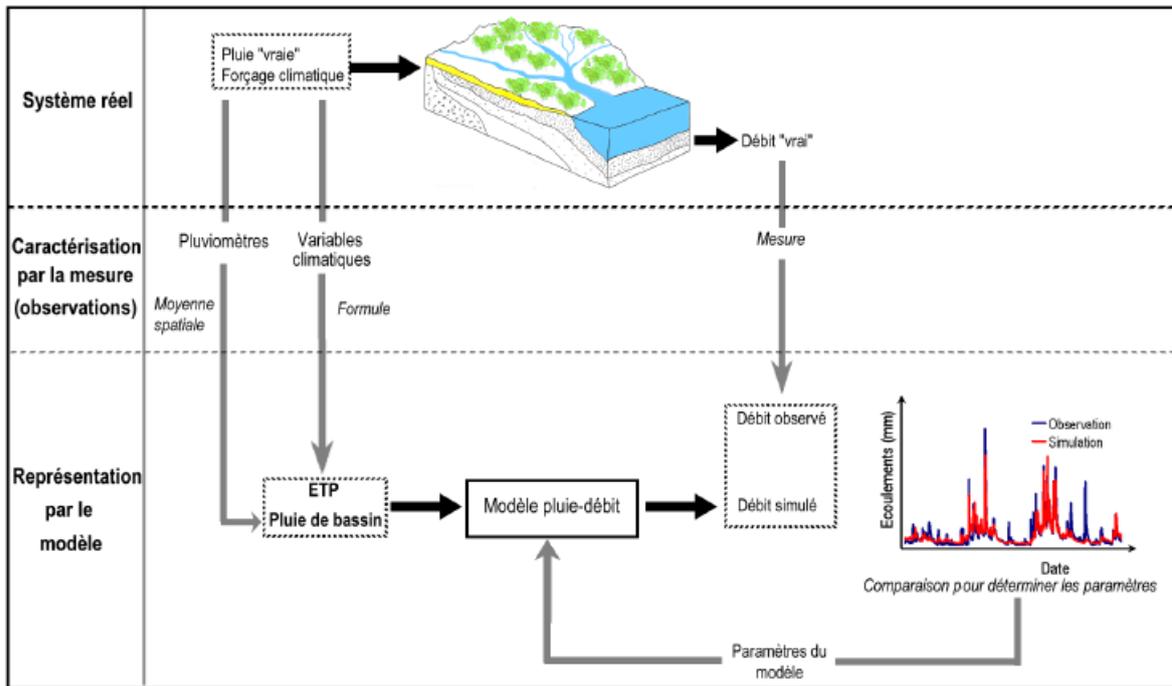


Figure.1.4 - Schématisation d'un modèle global pluie-débit (Oudin, 2004)

I.4.2. Objectifs de la modélisation pluie débit

La représentation d'un système physique par un modèle mathématique, est une démarche courante qui, en hydrologie, vise à répondre à l'un des objectifs suivants (Wery, 1990 ; InEulleuch, 1999):

- **la prévision :** Grâce à la mesure en temps réel des variables ou signaux d'entrée, il est possible d'évaluer les futurs débits à l'exutoire d'un bassin versant.
- **La simulation:** C'est l'analyse du comportement du système pour un signal particulier (par exemple pour une averse exceptionnelle). Dans ce cas, les mesures antérieures du débit ne sont pas disponibles et sont remplacées par des valeurs calculées. En hydrologie, la simulation est utilisée dans le but de compléter des données manquantes, de faire la prédétermination des crues (évaluation du débit de pointe) ou de générer des séries des données utiles à la gestion d'ouvrage de retenues.

- **Le contrôle:** Le contrôle, qui consiste à agir sur le signal d'entrée pour obtenir un signal de sortie ayant certaines caractéristiques, n'a trouvé que peu d'application en hydrologie. En plus de ces objectifs, la modélisation est souvent utilisée comme outil d'analyse ; la comparaison des résultats des modèles qui reposent sur des hypothèses différentes, peut servir à l'évaluation.

I.4.3. Etapes d'élaboration d'un modèle

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles :

- **Définir** le modèle et ses objectifs en termes de précision (Ambroise, 1999). Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes.
- **Identifier** le modèle (Roche, 1988b; Llamas, 1993; Young et al, 1997; In Cudennec, 2000), pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure; définir l'événement, les variables et les paramètres ; et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base .
- **Elaborer** l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification de logiciel lui-même (De Marsily, 1994 ; Ambroise ,1999).
- **Caler** le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon: la méthode passive (en prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations) et la méthode active (en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations). le calage peut être manuel ou automatique (cudennec, 2000).

- **Evaluer** le modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir des données différentes de celle utilisées pour le calage (Refsgaard et storm, 1995).
- **Définir le domaine de validité** du modèle élaboré (Ambroise, 1999). En fait la formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèse concernant les conditions initiales et aux limites.

I.4.4. Classification des modèles pluie-débit [J. P. Bwira, master1.2015]

Il existe plusieurs modèles hydrologiques qui sont choisis par rapport aux objectifs de modélisation, des paramètres du modèle et aux données d'entrée. On peut trouver plusieurs classifications de modèles hydrologiques dans la littérature en fonction des auteurs. Par exemple Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles hydrologiques en trois grandes catégories: les modèles conceptuels, les modèles à base physique et les modèles « boîte noire ». La notion de la classification des modèles est très complexe et en raison de l'ambiguïté de certains critères (notion de conceptuel ou physique) une certaine confusion règne encore sur l'appartenance de tel ou tel autre modèle à une catégorie donnée (Payraudeau, 2002). Nous avons énuméré dans cette partie quelques types de modèles sans pouvoir les classer forcément comme certains auteurs peuvent les faire dans plusieurs ouvrages. La liste de modèles cités ci-dessous n'est pas exhaustive.

I.4.4.1. Les modèles conceptuels

Les modèles conceptuels considèrent généralement le bassin versant comme étant un ensemble de réservoirs interconnectés, après quelques simplifications du cycle de l'eau. Un modèle hydrologique conceptuel tente de reproduire la réponse hydrologique d'un bassin versant en remplaçant la réalité de l'écoulement par une idéalisation simplifiée de la situation réelle tant de la géométrie du bassin versant que de l'écoulement lui-même. Les données hydrologiques et météorologiques servent alors à faire des estimations seulement des paramètres. Les modèles hydrologiques conceptuels sont basés sur un aspect perceptuel du comportement de l'eau dans le bassin versant et sont par conséquent des modèles déductifs.

Parmi le modèle à réservoir, on a le modèle d'hydrogramme unitaire instantané de Nash (1957). Dans ce modèle, les réservoirs représentent l'évolution du ruissellement de surface due à la circulation de l'eau dans le bassin versant, tant le long des pentes que dans le réseau hydrographique. Le modèle de Nash permet de simuler les crues de beaucoup des bassins versants avec succès. La validation des résultats des simulations est conditionnée par les hypothèses de l'hydrogramme unitaire qui doivent être vérifiées de toute évidence quel que soit le modèle utilisé. Le modèle de réservoir a été développé par plusieurs chercheurs avec différentes approches tels que des modèles GR3J (Michel et Edijatno, 1988), les modèles GR4J [Figure I.5] (Edjatino et Michel, 1994), (Perrin et al. 2003), les modèles GR2M (Kabouya, 1990 et Michel, 1994) également. La figure ci-dessous donne la structure générale du modèle GR4J.

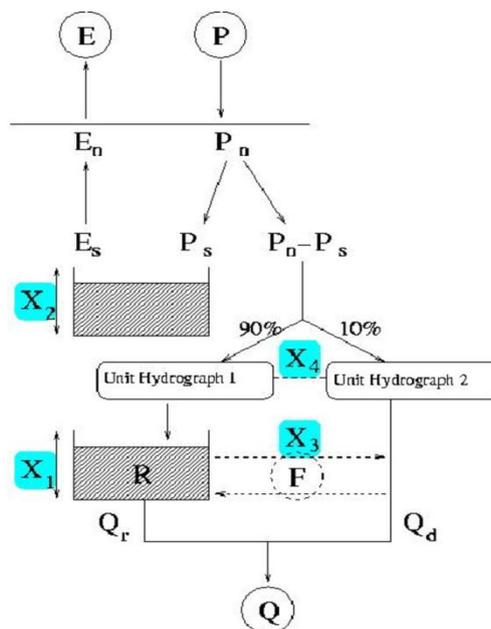


Figure.1.5 - Schéma de la structure d'un modèle conceptuel GR4J (Perrin et al.2001)

I.4.4.2. Les modèles à base physique

Les modèles à base physique reposent sur la résolution d'un grand nombre d'équation de continuité et de quantité de mouvement liée soit au processus de transport d'eau ou des substances soit d'énergie. Ces équations doivent décrire les différents phénomènes dans d'un bassin versant. On a par exemple le système d'équation de Barré de Saint Venant qui

ressoude les écoulements en surface libre et celui de Darcy qui résout les écoulements souterrains. En matière d'écoulement, le modèle à base physique qui serait le plus complet est celui qui pourra résoudre l'équation de Barré de Saint Venant en deux dimensions pour les écoulements en surface libre et celui de Darcy à trois dimensions pour les écoulements souterrains.

Ce type de modèle a besoin de trois éléments complexes :

- Etablir la description du bassin versant plus en détail par un maillage fin à trois dimensions.
- Des schémas numériques robustes.
- Des valeurs de paramètres pour chaque maille et dans chaque direction.

Ces trois éléments présentent une difficulté pour l'application de ce type de modèle et explique leur nombre restreint dans la modulation hydrologique. Le SHE ((Schéma Hydrologique Européen) est un modèle développé vers les années 1980 (Abbot et *al.* 1986)) est le modèle le plus utilisé parmi le modèle à base physique en hydrologie.

Le SHE résout le bilan hydrique sur le bassin versant en se basant sur des équations physiques et des paramètres spatialisés.

La plus grande difficulté dans ce type de modèle est la détermination des paramètres. Les paramètres ayant un sens physique comme la conductivité hydraulique, les paramètres de friction devraient être mesurable in situ mais en pratique, on constate que la mesure de ces paramètres et la détermination de leur répartition spatiale induit le plus souvent à des difficultés d'utilisation rigoureuse des modèles à base physique tel que le SHE. Les distorsions des modèles même pour les plus détaillés sont inévitables. Pour calculer un débit à l'exutoire d'un bassin versant, les paramètres du modèle doivent endosser les incertitudes liées aux simplifications. Ces simplifications sont inévitables et elles impliquent que certains processus ne sont pas très bien simulés.

Après de test de simulation, on constate le plus souvent que les valeurs des paramètres ne correspondent plus à leurs valeurs mesurées même si elles pourraient être exactes. A partir de ce constat on peut alors affirmer que le modèle à base physique qui donne une réponse très proche des observations n'a pas des paramètres physiques ; et donc un modèle à base physique qui utilise les paramètres mesurés devraient normalement donner une réponse inexacte. Ce modèle est plus adapté dans la recherche sur des bassins

test ou pour simuler des expériences en laboratoire mais difficile à appliquer dans le cas pratique.

I.4.4.3. Les modèles « boîte noire » (réseaux neuronaux)

Dans les modèles boîte noire, le bassin est considéré comme étant une entité unique. Ces modèles utilisent des relations empiriques qui relient les entrées et les sorties du modèle sans pour autant chercher à se rapprocher d'une loi physique. En 1972, Chow a subdivisé les modèles boîte noire en deux classes: les modèles déterministes et non déterministe. Les modèles non déterministes regardent les variables d'entrées et de sorties du système hydrologique comme des variables aléatoires et essaie de trouver une relation mathématique soit statistique entre ces variables. L'hydrogramme unitaire peut être pris comme un exemple type du modèle déterministe.

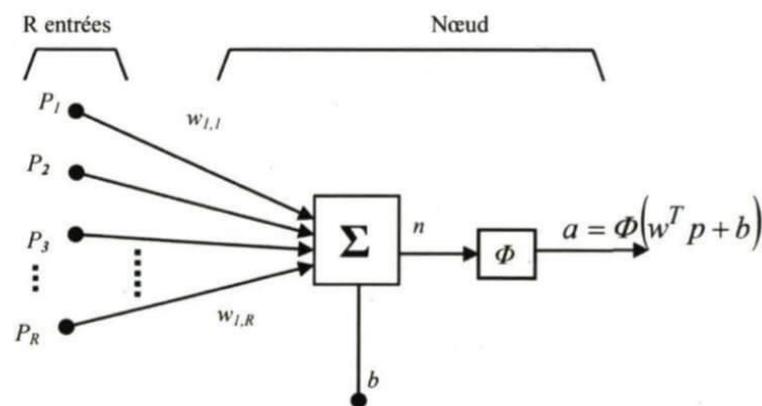


Figure.I.6 - système neuronale (boîte noire)

[Harouna YUNABA, 2009]

Depuis une dizaine d'années, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) s'est développée dans de nombreuses disciplines (sciences économiques, écologie et environnement, biologie et médecine...). Ils sont notamment appliqués pour résoudre des problèmes de classification, de prédiction, de catégorisation, d'optimisation, de reconnaissance des formes et de mémoire associative (Drew et Monson, 2000). Dans le cadre du traitement des données, les RNA constituent une méthode d'approximation de systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes statistiques classiques. Les RNA sont également applicables dans

toutes les situations où il existe une relation non linéaire entre une variable prédictive et une variable prédite. Par leur nature et leur fonctionnement, les RNA peuvent détecter les interactions multiples non linéaires parmi une série de variables d'entrée, ils peuvent donc gérer des relations complexes entre les variables indépendantes et les variables dépendantes.

Avec les méthodes statistiques traditionnelles, il faut d'abord penser à un modèle, le tester, penser à un autre modèle jusqu'à ce qu'on obtienne un modèle suffisamment précis. Un réseau est entraîné sur des données grâce à un mécanisme d'apprentissage qui agit sur les constituants du réseau pour réaliser au mieux la tâche souhaitée. La famille de RNA la plus utilisée ces dernières années comme outil d'aide à la décision est le perceptron multi-couches (PMC).

Qu'est-ce qu'un réseau de neurone artificiel ?

Les réseaux de neurones fonctionnent en répartissant les valeurs des variables dans des automates (les neurones). Ces unités sont chargées de combiner entre elles leurs informations pour déterminer la valeur du paramètre de discrimination. C'est de la connexion de ces unités entre elles qu'émerge la capacité de discrimination du RNA. Chaque neurone reçoit des informations numériques en provenance de neurones voisins; à chacune de ces valeurs est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque neurone effectue localement un calcul dont le résultat est transmis ensuite aux neurones avals.

La famille de réseau majoritairement employé est le perceptron multi-couches (PMC). À lui seul ce type de réseau recouvre plus de 95 % des applications scientifiques et industrielles. Il comporte quelques dizaines à quelques centaines de neurones dans les cas usuels, voir plusieurs milliers pour les applications graphiques. [3]

I.5.Optimisation

Le calage d'un modèle pluie-débit consiste à estimer les paramètres du modèle, dans ce cas on doit minimiser l'erreur entre les données simulées et observées. Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que des séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage.

On doit définir une méthode d'optimisation (ou minimisation) par une fonction critère. [HOUMOURA LAKHDAR,2012].

En se basant sur la synthèse présentée par Sorooshian et Gupta (1995), nous exposons dans les paragraphes suivants une classification et un aperçu des méthodes d'optimisation applicables aujourd'hui en hydrologie, pour mieux comprendre les différences de stratégies entre ces méthodes.

I.5.1 Les méthodes locales

Les méthodes locales adoptent une stratégie itérative dans laquelle, partant d'un point de l'espace des paramètres, on se déplace dans une direction qui améliore continûment la valeur de la fonction critère, jusqu'à ne plus pouvoir générer d'amélioration. Le jeu de paramètres trouvé correspond alors à l'optimum de la fonction (Perrin, 2000). Au sein des méthodes locales, on peut distinguer deux sous-groupes, les méthodes directes et les méthodes de gradient.

- Les méthodes directes utilisent comme information au cours de l'optimisation la seule valeur de la fonction critère aux différents points testés de l'espace des paramètres. De nombreuses méthodes existent. Nous citerons à titre d'exemple la méthode de Rosenbrock (1960), la méthode du Pattern Search ou PS (Hooke et Jeeves, 1961) ou encore la méthode du Simplex (Nelder et Mead, 1965) qui est l'une des plus efficaces et des plus utilisées et la méthode 'pas-à-pas' (Michel, 1989; Nascimento, 1995).
- Les méthodes de gradient utilisent comme information à la fois la valeur de la fonction critère et celle du gradient de la fonction pour décider de la stratégie d'évolution dans l'espace des paramètres. Dans le cas où ces méthodes utilisent le

Hessien de la fonction, c'est-à-dire la matrice des dérivées partielles du second ordre de la fonction par rapport aux paramètres, ce sont alors des méthodes dites de Newton. La difficulté d'évaluer le Hessien incite parfois à en utiliser des approximations à partir de dérivées du premier ordre. Les méthodes sont alors dites de quasi-Newton. On peut citer notamment l'algorithme de Davidon-Fletcher-Powell (Fletcher et Powell, 1963) ou encore la méthode utilisée dans cette étude par les réseaux de neurones artificiels; la méthode de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963), version modifiée de celle de Gauss-Newton.

I.5.2 Les méthodes globales

Les méthodes globales explorent une partie plus importante de l'espace des paramètres en adoptant diverses stratégies d'exploration, elles peuvent être déterministes ou probabilistes, dans ce cas la convergence de l'algorithme ne se fait plus au sens de distance mathématique mais de distance probabiliste (Duan et al, 1992).

Les méthodes déterministes ne font pas d'hypothèse a priori sur la localisation de l'extremum pour la fonction critère. Elles consistent en une exploration intégrale de l'espace des paramètres suivant une discrétisation régulière de l'espace des paramètres.

Avec une méthode stochastique, les valeurs des paramètres testées sont tirées dans une loi de probabilité prédéfinie. Dans le cas le plus simple, la distribution est supposée uniforme: chaque zone de l'espace a la même probabilité de contenir l'extremum.

L'avantage de ces méthodes globales est qu'elles permettent d'identifier les maxima globaux et locaux. Elles évitent ainsi le piège d'identifier un extremum local de la fonction critère. Leur principal inconvénient est qu'elles nécessitent des temps de calcul beaucoup plus importants que les méthodes locales. On peut citer la méthode SCE-UA (Shuffled Complex Evolution) (Duan et al, 1992).

I.6. Conclusion

L'un des meilleurs moyens pour avoir une description assez complète d'un bassin versant et des phénomènes qui s'y passent, que cela soit un phénomène hydrologique ou bien climatique est la modélisation pluie-débit. Il existe plusieurs catégories de modèles pluie-débit, pour pouvoir prédire le débit à l'exutoire du bassin grâce aux observations obtenue.

La modélisation se trouve en face de certains problèmes, tel que la collecte d'information permettant l'identification du meilleur modèle à suivre.

Dans cette étude, on cherchera à analyser les performances d'un modèle à boîte noire (les réseaux de neurones artificiels) afin de modéliser les débits liquides de bassin de oued Allala.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

limité à l'est par le bassin de l'oued Bouchara ; à l'ouest par le bassin oued Ras ; au nord par la méditerrané ; au sud par le bassin de Oued Ouahren.

II.3. Etude géomorphologique

II.3.1. Paramètres géométriques

II.3.1.1. Superficie

L'une des caractéristiques les plus importantes d'un bassin versant est la superficie. Elle s'obtient par planimétrie sur une carte topographique après avoir tracer les limites topographiques et éventuellement hydrogéologiques ou bien par la technique de la digitalisation à l'aide de MapInfo, l'Arc Map, etc..., La surface « A » d'un bassin s'exprime généralement en km².

$$A = 287.15 \text{ km}^2$$

II.3.1.2. Périmètre

Le périmètre est la longueur, de la ligne de contour du bassin, il « P » s'exprime généralement en km, sa mesure est fait à l'aide d'un curvimètre ou mieux automatiquement par le logiciel tel que le MapInfo, Arc Map, etc...

$$P = 98 \text{ km}$$

II.3.1.3. Paramètres de forme

- **Indice de compacité de Horton**

Il exprime le rapport de la longueur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principale.

Il se calcule par la relation :

$$KH = A/L \cdot 1/L = A/L^2 \quad (2.1)$$

Avec :

KH : Indice de compacité de Horton

A : aire du bassin versant (km²)

L : Longueur du cours d'eau principal (km)

$$KH=0.21$$

- **Indice de compacité de Gravelius**

Un bassin versant est défini en premier lieu par son contour qui a une certaine forme et renferme une certaine superficie «A». Il est évident que cette forme va avoir une influence sur l'écoulement global. Un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassé. Cette forme est déterminée par l'Indice de Compacité dit aussi l'Indice de Gravelius. Ce dernier est obtenu en comparant le périmètre d'un bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface (Roche, 1963) :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.2)$$

Avec :

K_c : Indice de Gravelius

P : Périmètre du bassin en (km)

A : Supérficie du bassin en (km²)

$$K_c = 1.74$$

$K_c = 1 \rightarrow$ bassin (circulaire), le modèle choisi étant un cercle.

$1 < K_c < 1.4 \rightarrow$ bassin compact.

$K_c > 1.4 \rightarrow$ bassin allongé.

A l'aide de ces information et de ces calcule, on constate donc que notre bassin st allongé

- **Rectangle équivalent**

Dans le but pour avoir une comparaison sur le comportement hydrologique de deux bassins, on utilise la notion du rectangle équivalent. Il s'agit d'une transformation purement géométrique pour laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même

périmètre et la même superficie. De cette façon, les courbes de niveau seront des droites parallèles au petit côté. Soit L_r et l , respectivement la longueur et la largeur du rectangle, de superficie A et de périmètre P .

$$P = 2(L_r + l) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0.28} \quad (2.3)$$

Avec : $L_r l = A$

$$\text{La solution du système est : } L_{r1} = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (2.4)$$

Pour que cette représentation soit possible, il faut que : $K_c > 1.12$, ce qui est le cas pour les sous bassins versants étudiés. Les rectangles équivalents combinés à la répartition des surfaces en fonction de leurs altitudes relatives permettent une meilleure représentation graphique des sous bassins.

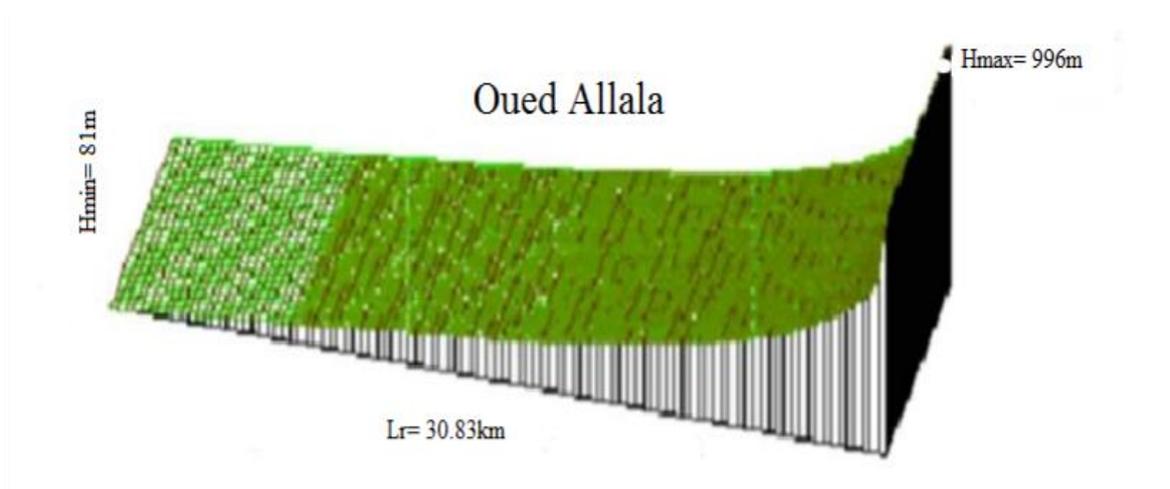


Figure.2.2 : Représentation en 3D des rectangles équivalents des sous bassin
(Remaoun 2007)

II.3.2. Caractéristiques topographiques

II.3.2.1. Le relief

Le sommet du bassin de Oued Allala se trouve à 996 m, tant dis que son exutoire se trouve à 81 m, avec une altitude moyenne de 508 m. L'étréoussse du bassin à l'amont s'élargit progressivement tout en allant vers l'aval (fig.II.3). Ce qui permet la constatation de la topographie du bassin versant de Oued Allala qui est très contrasté.

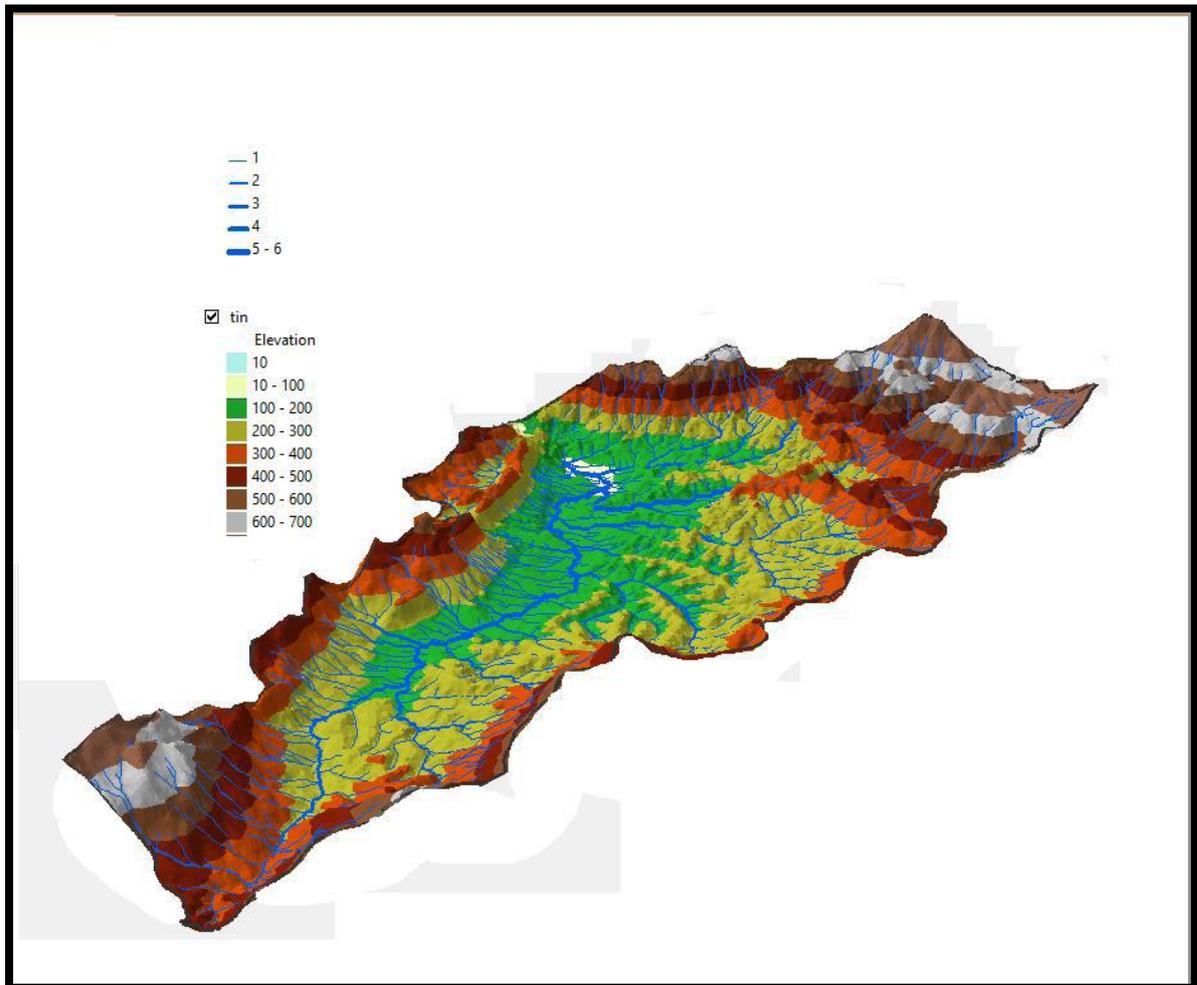


Figure.2.3 : 3D x, y, z, du bassin versant de Oued Allala (A.N.R.H)

II.3.2.2.Hypsométrie

Pour comprendre la variation d'altitude dans le bassin versant de Oued Allala, on applique une méthode statistique qui grâce à un histogramme et une courbe hypsométrique permet de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude et permet en outre de déterminer les altitudes caractéristiques.

La méthode statistique consiste à calculer les pourcentages des surfaces en fonction des altitudes, puis le calcul des pourcentages au-dessus du cumulées. L'hypsométrie de fréquence des altitudes est un graphique sur lequel les valeurs des altitudes sont réparties sur l'axe des abscisses. La surface, en % de la surface totale comprise entre deux altitudes successives, est reportée sur l'axe des ordonnées.

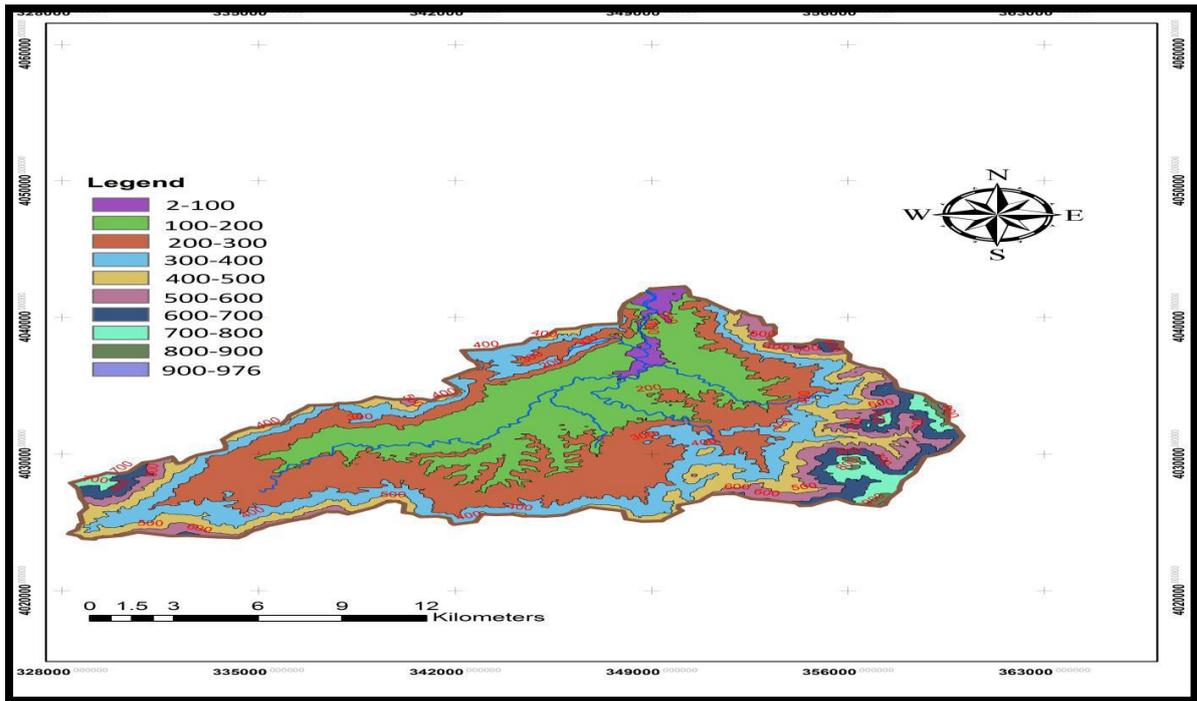


Figure.2.4 : La carte hypsométrique du bassin de Oued Allala

II.3.2.3. La courbe hypsométrique

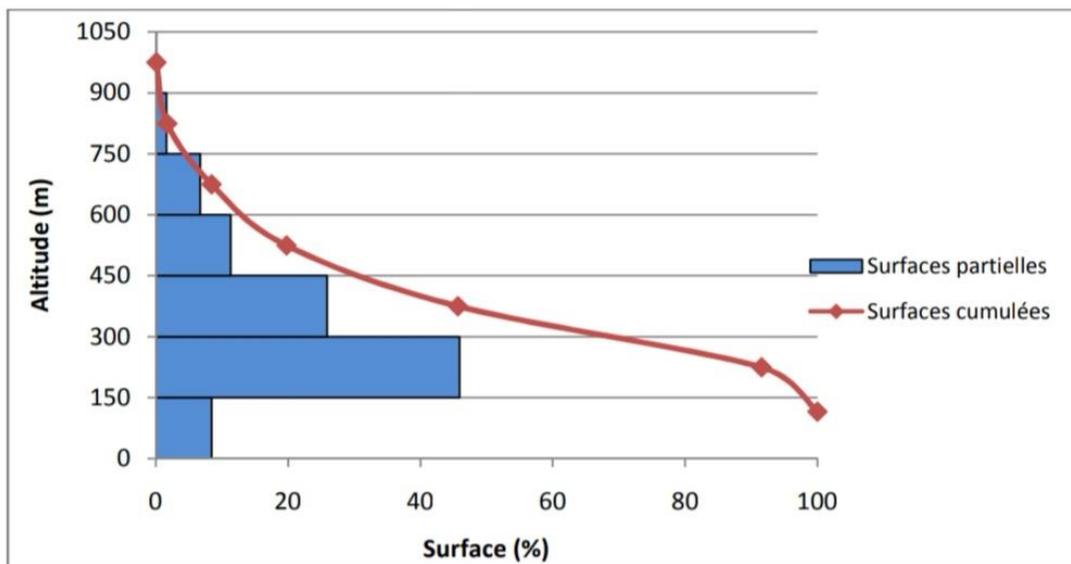
Le relief du bassin versant est souvent caractérisé par la courbe hypsométrique. Celle-ci est établit en portant sur un graphique l'aire du bassin, ou encore le pourcentage de l'aire au dessus ou au dessous d'une altitude donnée, en fonction de cette altitude.

Si sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que les surfaces supérieure ou inférieure, soit égale a 5% de la surface A, on a les altitudes H5 et H95 (entre les quelles s'inscrivent 90% de l'aire du bassin) et la dénivelée.

$$D = H5 - H95 \tag{2.5}$$

Tableau.2.1: Surfaces partielles du sous bassin de Oued Allala par tranche d'altitude

Altitude (H)	Altitude Moyenne	Surfaces partielles	Surfaces partielles	Surfaces cumulées
(m)	(m)	(km ²)	%	%
1050-900	975	0,26	0,1	0,1
900-750	825	4,04	1,63	1,73
750-600	675	16,66	6,7	8,43
600-450	525	28,16	11,32	19,75
450-300	375	64,38	25,89	45,64
300-150	225	114,17	45,91	91,55
150-81	115,5	21,03	8,45	100

**Figure.2.5 :** Courbes hypsométriques et hypsomètre du sous bassin de Oued Allala

II.3.2.4. Altitudes caractéristiques

- **Altitude maximale et minimale :** elles sont obtenues directement des cartes topographiques, l'altitude minimale se situe généralement à l'exutoire.

Altitude minimale (m) = 81

Altitude maximale (m) = 996

- **Altitude moyenne** : sur la courbe hypsométrique, l'altitude moyenne correspond du rapport de l'aire au-dessus de la courbe, on utilisant comme altitude de départ l'élévation minimum de la courbe hypsométrique à la surface du bassin. Elle peut de plus s'obtenir à partir de la relation

$$E = \frac{\sum [a \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)]}{A} \quad (2.6)$$

Avec:

E : Altitude moyenne (m) ;

a : aire comprise entre deux courbes de niveau consécutives (km²) ;

h₁ et h₂: Altitudes des courbes de niveau (m) ;

A : aire totale du bassin versant $\sum a$ (km²).

- **Altitude médiane** : L'altitude médiane correspond du point d'abscisse 50% de la courbe hypsométrique.

II.3.2.5. Les indices de pentes

- **Indice de pente globale (I_g)**

Cet indice représente la pente moyenne de 90% de la superficie du bassin ; il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique ; on prend la dénivelée (D) entre les altitudes H_{5%} – H_{95%}.

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} \quad (2.7)$$

Avec :

D : dénivelée entre H_{5%} et H_{95%} (m)

L : longueur du rectangle équivalent (km)

I_g = 0.015

Tableau.2.2: Classification de relief

R1	Relief très faible	$I_g < 0,002$
R2	Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
R3	Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
R4	Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
R5	Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
R6	Relief fort	$0,05 < I_g < 0,1$
R7	Relief très fort	$0,1 < I_g$

- **Indice de pente de Roche (I_p)**

L'indice de pente I_p de M. Roche sert à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant.

I_p est donné par la formule :

$$I_p = \sqrt{L_r} \sum_{i=1}^n (a_i d_i)^{1/2} \quad (2.8)$$

Avec :

I_p : Indice de pente moyenne

L_r : Longueur du rectangle équivalent (km)

a_i : La fraction en pourcentage de la surface (A_i) comprise entre deux courbes de niveaux de distance (d_i)

- **Moyenne pondérée des pentes de surfaces élémentaires**

$$S = 1/A \sum (S_i \cdot d_i \cdot A_i) \quad (2.9)$$

Avec :

S : pente moyenne (m/km) ;

S_i : plus grande pente de l'aire élémentaire $d_i \cdot A_i$ (m/km)

D'après HORTON S se calcule de :

$$S = D/A \sum L \quad (2.10)$$

Avec :

D : différence d'altitude constante entre deux courbes de niveau (m) ;

A : aire du bassin versant (km²) ;

$\sum L$: Longueur totale des courbes de niveau (km)

- **Détermination à partir de la courbe hypsométrique**

$$S = 2E/l \quad (2.11)$$

Avec :

E : altitude moyenne (m) ;

L : longueur du cours d'eau principale (km)

S=27.68%

II.3.3. Etude de réseau hydrographique

II.3.3.1. Constitution du réseau hydrographique

Les cours d'eau principal d'un fleuve est alimenté par des affluents les plus importants qui sont eux même alimentés par des affluents de second ordre ainsi de suite jusqu'aux ruisselets et petit cours d'eau de tête du bassin forment ce que les cartographes appellent le chevelu hydrographique des bassins versants.

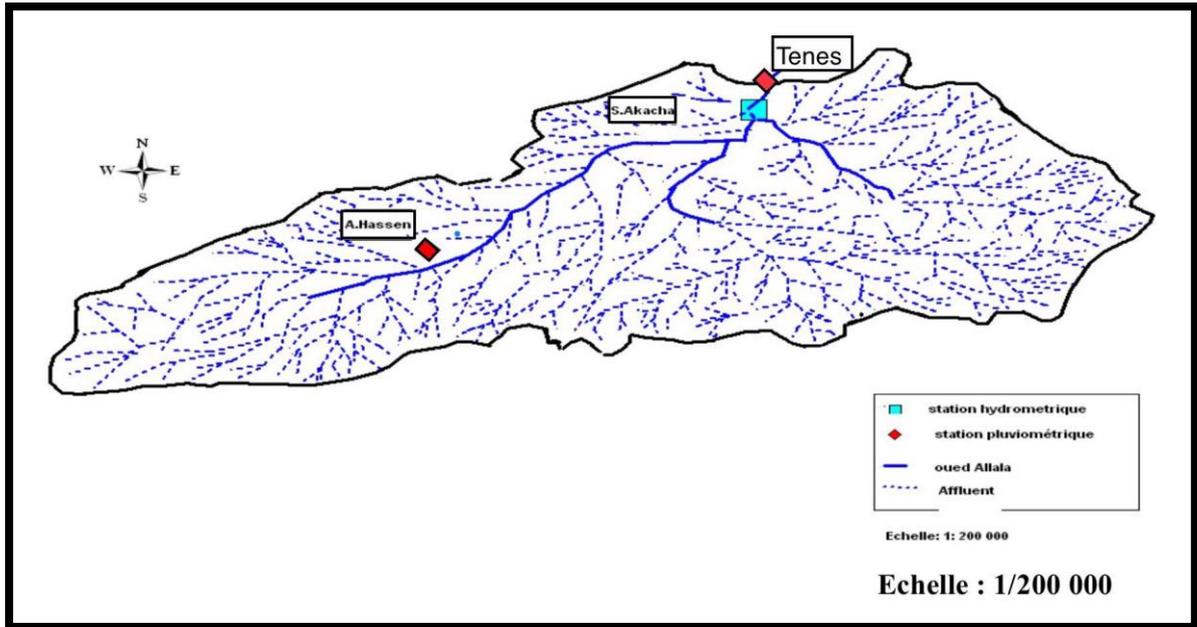


Figure.2.6: Chevelu hydrographique du B.V de Oued Allala. (Source A.N.R.H Chlef)

II.3.3.2. Paramètres hydrographiques

- **Densité de drainage**

La densité de drainage est définie comme le rapport de la longueur totale des cours d'eau de tout ordre a la surface du bassin.

$$D_d = \frac{\sum Li}{A} \tag{2.12}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage (km/km²).

$\sum Li$: Longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : Superficie du bassin en km².

$$D_d = \frac{\sum Li_p}{A} \qquad D_d = \frac{\sum Li_t}{A} \tag{2.13}$$

Li_p : Longueurs des oueds permanents.

Li_t : Longueurs des oueds temporaires.

- Profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau permet d'estimer sa pente moyenne nécessaire dans l'estimation du temps de concentration des eaux dans le bassin.

L'étude des profils en long permettent d'apporter des éléments complémentaires de la densité de drainage en vue du rôle déterminant des pentes et des thalwegs sur le ruissèlement superficiel.

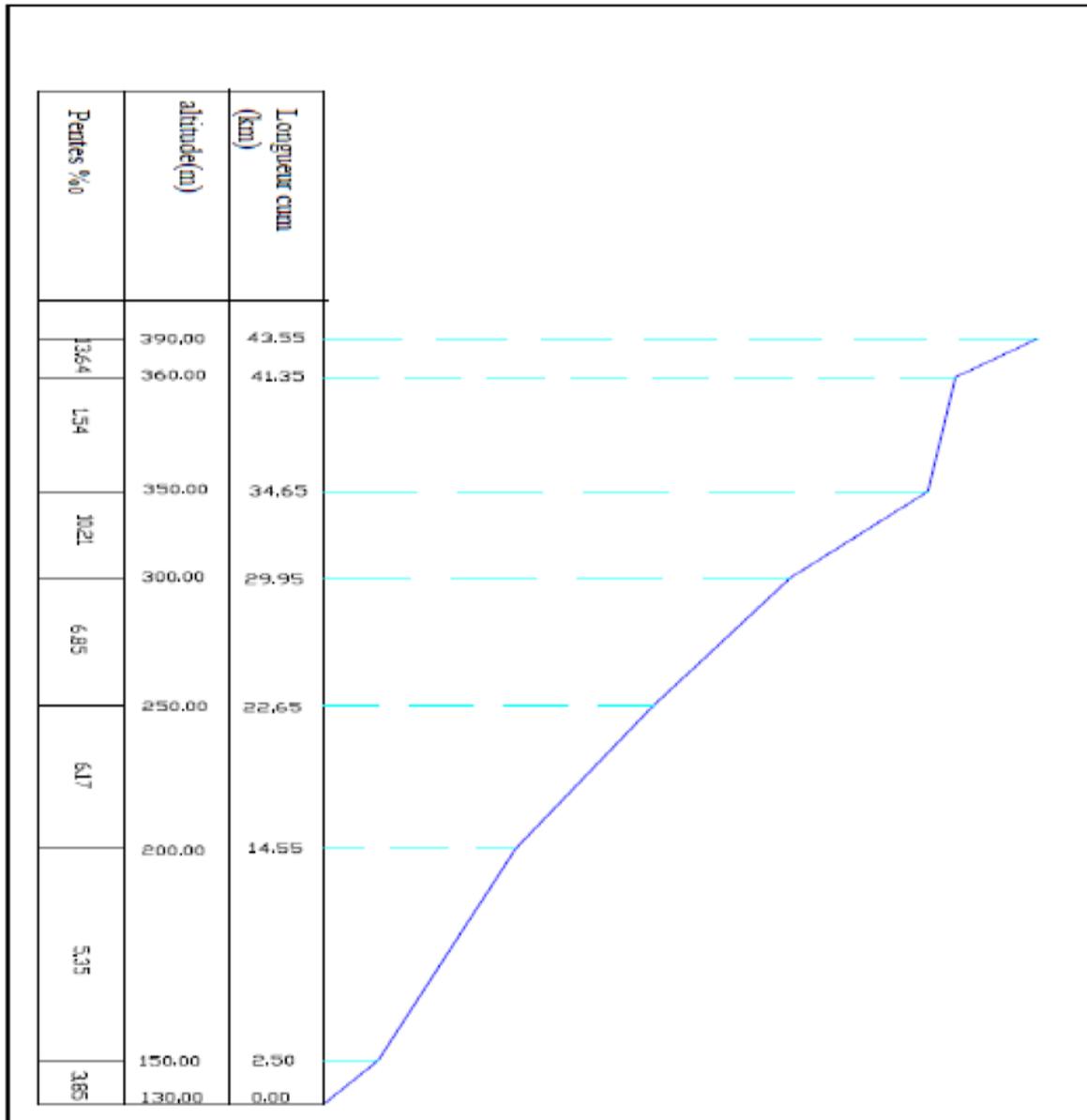


Figure.2.7: Profile en long de Oued Allala

II.3.4. Temps de concentration (T_c)

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Les méthodes et les formules utilisées reflètent un caractère régional, traduit par des paramètres propres à la région dans laquelle sont développées ces formules. Normalement on donne la priorité à celle qui nous semble applicable et élaborées dans les conditions physico-géographiques analogues à celles de la partie Nord de l'Algérie. L'estimation du temps de concentration est obtenue grâce à plusieurs formules empiriques.

- **Formule de GIANDOTTI (1937)**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (2.14)$$

Avec :

S : Surface du bassin versant (km²).

L : Longueur du cours d'eau principal (km).

T_c : Temps de concentration exprimé en heure.

H_{moy} : altitude moyenne en (m).

H_{min} : altitude minimale.

$$T_c = 6h$$

Nous avons utilisé la formule de GIANDOTTI car elle est la plus utilisée en nord Algérien.

II.4. La géologie et la lithologie de la zone d'étude

D'après la carte géologique nous pouvons dire que : Le bassin de Oued Allala est formé par des formations autochtones et allochtones. Dans la partie côtière de la région, les nappes géologiques sont chevauchées sur les formations en sédiments en position autochtonnelle. Dans la partie Est une nappe de Flysch et dans la partie Ouest une nappe numidienne. Nous pouvons également constater que la région centrale du bassin versant est couverte par les formations post-miocènes. (sables, graviers, argiles, ...)

Tableau.2. 3 : Répartition de différentes formations géologiques du B.V de Oued Allalla

Couche	superficie (km ²)	superficie (%)	perméabilité des formations
alluvions	30,97	10,44	perméable
conglomérats et sable rouge	4,124	1,39	perméabilité moyenne
gypse	0,44	0,154	très perméable
grés	46,78	15,77	perméabilité moyenne
calcaire	38,71	13,05	très perméable
argile	72,3	24,37	impermeable
marne	61,98	20,84	impermeable
grés et carténnien	12,04	4,18	perméabilité moyenne
marnes et schiste	8,25	2,78	impermeable
argile et grés	20,65	6,96	perméabilité faible

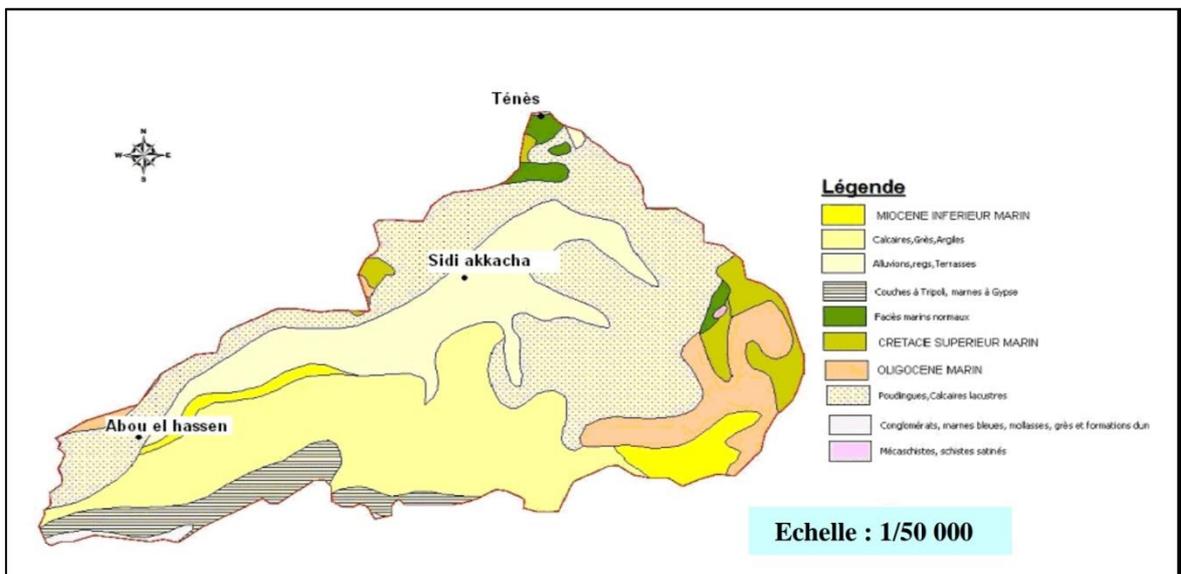


Figure.2.8 : Carte géologique du bassin versant de Oued Allala (ONM Chlef)

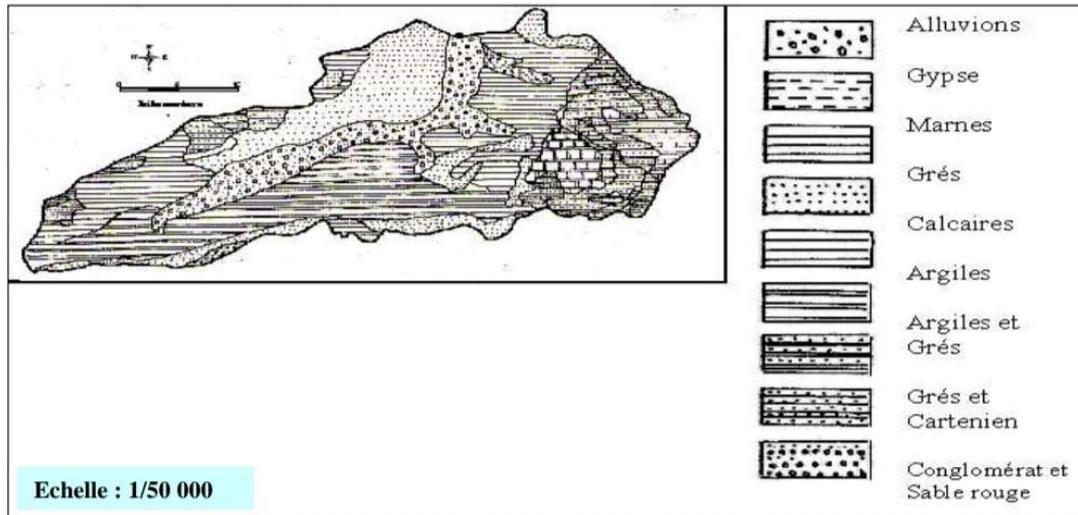


Figure.2.9 : Carte lithologique du bassin versant de Oued Allala. (Remaoun, 2007)

II.5. Végétation et occupation du sol

Le rôle de la végétation dans la protection des sols et le bilan hydrique ont fait l'objet d'études aussi nombreuses et variées. En hydrologie, l'influence de la végétation sur l'évapotranspiration et le ruissellement est très importante.

Les parties nord et est du bassin de Oued Allala sont couvertes par une forêt à base de Pin d'Alep *Pinus halepensis* comme essence principale en mélange avec le thuya articulé *Tetraclinis articulata*. Le sous bois est dense en particulier sur les versants incendiés à exposition nord. Les terrains nus représentent plus de 70 % de la surface totale du bassin.

Le relevé floristique révèle essentiellement les espèces suivantes :

1. *Cistus salvifolius*
2. *Cistus monspeliensis*
3. *Erica arborea*
4. *Myrtus communis*
5. *Pistacia lentiscus*
6. *Arbutus unedo*
7. *Lavendula dentata*
8. *Urginea maritima*

La partie sud du bassin c'est la plaine de Sidi Akkacha est couverte par des cultures annuelles tels que les céréales ; avec quelques parcelles de cultures maraîchères.

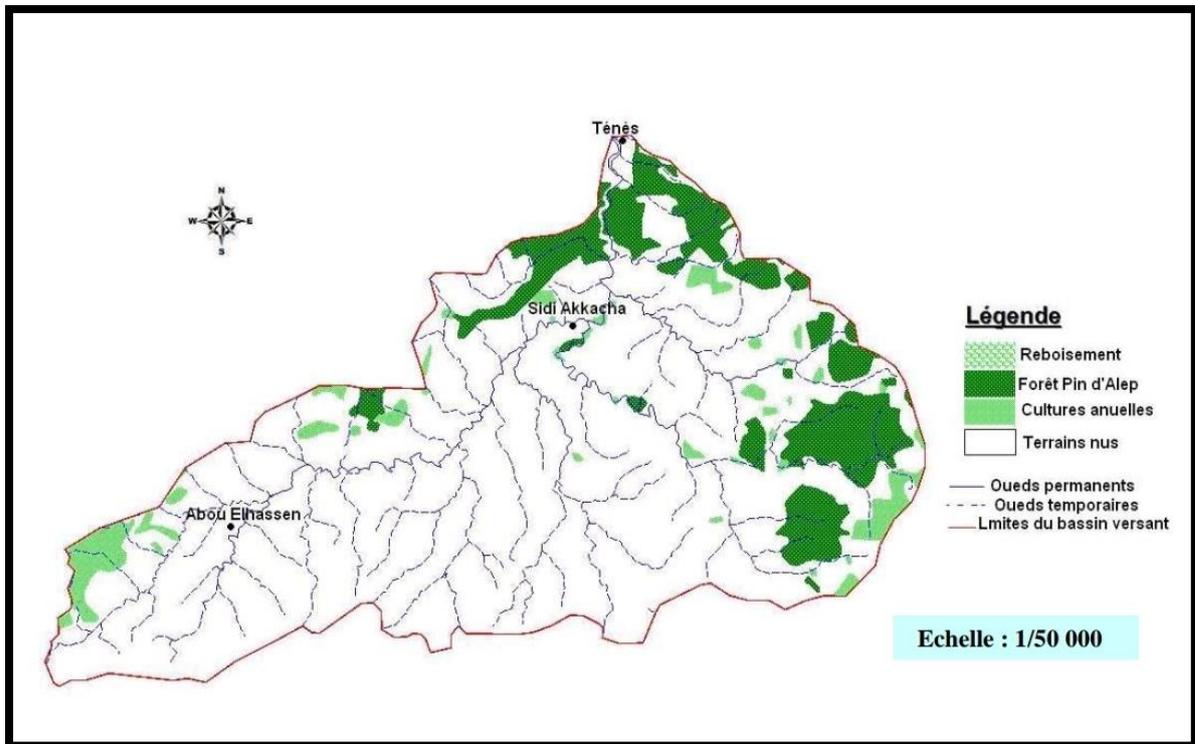


Figure.2.10 : Carte de végétation du bassin versant de Oued Allala. (ONM Chlef)

II.6. Conclusion

L'analyse des paramètres géométriques et physiques nous permet de mieux comprendre les différentes variations qui arrivent au niveau du régime hydrologique de notre bassin versant et donc leur contribution aux crues. L'interaction de ces différents paramètres aide à déterminer la variation des phénomènes hydrologiques.

Tableau.2.4. Synthèse des caractéristiques hydro-morphologiques du bassin versant de Oued Allala.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	A	Km ²	287.15
Périmètre	P	Km	98
Indice de compacité de GRAVELIUS	K _c	/	1.74
Longueur du cours d'eau principale		Km	10
Longueur de rectangle équivalent	L _r	Km	43.75
Largeur de rectangle équivalent	l _r	Km	10.02
Indice de pente de roche	I _p	%	4.4
Indice de pente globale	I _g	%	0.012
Altitude moyenne	H _{moy}	m	508
Altitude maximale	H _{max}	m	996
Altitude minimale	H _{min}	m	81
Coefficient de torrencialité C _f	C _f	/	44.9
Temps de concentration	T _c	h	6
Densité de drainage D _d	D _d	Km/km ²	4.7

Chapitre III

Critique des données

III.1. Introduction :

L'étude d'un phénomène complexe, dont les lois physiques sont aléatoires ou difficilement prévisibles dans leurs ensembles, l'analyse des données disponible (précipitation, débit, température ...) est le premier pas à franchir. En fait, pour comprendre le comportement d'un phénomène hydrologique (sécheresse, inondation ...), les données hydrologiques constituent, la plus part du temps le seul outil sur le quel on peut se baser. Connaître les techniques appropriées pour obtenir le maximum d'informations sur les séries des échantillons est du coup très important.

Dans le cadre de ce chapitre, on aura comme objectif l'étude des paramètres hydro-climatiques pour une série d'observation requise de 21 ans (1995/1996-2015/2016).

Les données hydro-climatiques du bassin versant de Oued Allala ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (A.N.R.H) de Blida et l'ONM de Chlef.

III.2. Equipement du sous bassin

L'ensemble des données pluviométriques de base est mis à notre disposition par l'ANRH de Blida. Les fichiers de ces données donnent les valeurs mesurées des pluies moyennes journalières des diverses stations pluviométriques de la région d'étude sur de longues périodes d'enregistrement.

Le bassin versant de Oued Allala est contrôlé par trois postes pluviométriques et une station de jaugeage (tableau-III.1).

Tableau.3.1: Coordonnées des stations pluviométriques et hydrométriques

Stations	Coordonnées Lambert			Code
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Station pluviométrique ABOU EL HASSEN	366.231	347.763	220	020201
Station pluviométrique DAMOUS	411.2	361.35	40	020203
Station pluviométrique TENES	376.8	359	5	020205
Station hydrométrique SIDI AKKACHA	375.750	354.300	115	020207

(Source : A.N.R.H Blida)

III.3. Traitement des données hydro-climatiques

Pour assurer une bonne représentation de notre région ; le réseau de mesures comporte trois stations pluviométriques et une station hydrométrique qui couvrent presque tout le secteur d'étude.

Les précipitations constituent le facteur essentiel intervenant par hauteurs totales annuelles ; leurs répartition mensuelle influence directement les régimes hydrologiques et leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

III.3.1. Analyse de la pluviométrie du bassin de Oued Allala

Les données pluviométriques ; sont obtenues au niveau de l'ANRH de Blida ; elles sont disponibles sur support informatique sous forme de pluies moyennes mensuelles durant une période allant de 1995-2016.

Notre choix se justifier par la disponibilité des données pluviométriques et hydrométriques. Pour assurer une bonne représentation de notre région, nous avons travaillé sur deux stations pluviométriques (TENES et ABOU EL HASSEN) ayant des périodes aussi longues que possibles être partie d'une façon plus ou moins uniforme sur toute la zone.

III.3.1.1. Test d'homogénéité

Le test d'homogénéité est un processus de détection et de correction des ruptures d'origine non climatique. Les principales modifications qui peuvent affecter l'homogénéité des séries sont :

- Le déplacement d'une station ;
- Le remplacement d'un instrument de mesure ;
- Les changements des heures d'observations ;
- Le changement d'observateur.

Plusieurs méthodes sont employées pour tester l'homogénéité des données climatiques. Parmi ces méthodes on cite : test de la régression linéaire et test des doubles cumuls.

a. Double cumule

Le principe de la méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations. L'une des stations (station Ténès) est la station de base ou station de référence, supposée correcte. L'autre station est la station à contrôler. Un effet de lissage est obtenu en comparant, au pas de temps choisi, non pas les valeurs observées, mais leur cumul. La méthode est d'un concept extrêmement simple, puisqu'il suffit de tracer un graphe des quantités :

$$X(t) = \sum_{i=0}^t x(i) \quad \text{et} \quad Y(t) = \sum_{i=0}^t y(i) \quad (3.1)$$

A partir de ce test, on observe une corrélation entre les stations de TENES et ABOU EL HASSEN (III.1) ce qui montre une homogénéité des données et donc nous pouvons les utiliser dans l'étude climatologique du bassin versant de Oued Allala.

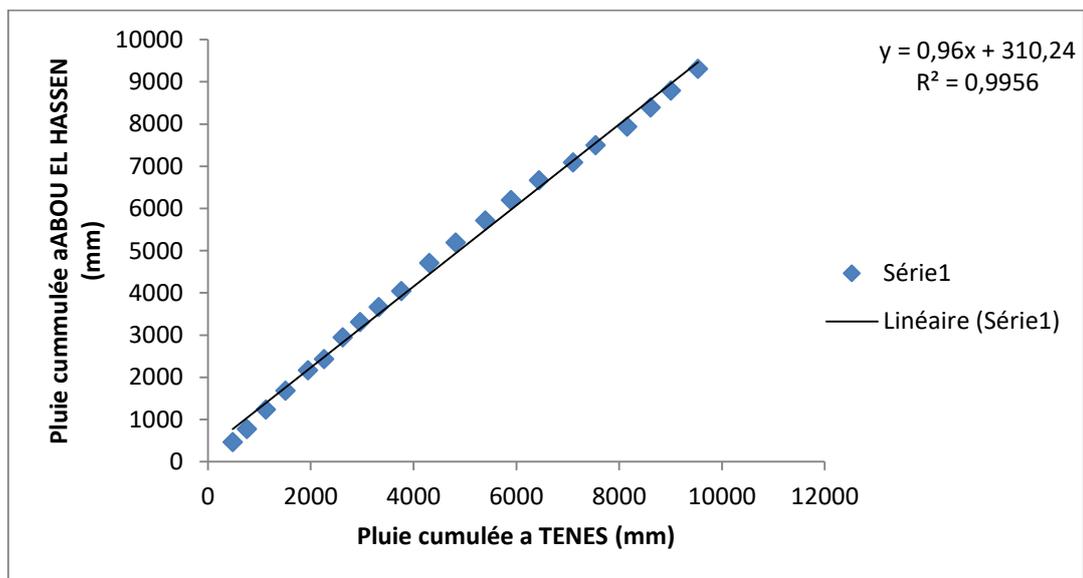


Figure.3.1 : Double cumule de pluie annuelle entre TENEZ et ABOU EL HASSEN

III.3.1.2.Pluviométrie annuelle

Tableau.3.2: Données pluviométriques annuelles des deux stations d'étude

Année	Précipitations annuelles (mm)			
	ABOU EL HASSEN	Précipitation cumulée	TENES	Précipitation cumulée
1995-1996	461,3	461,3	483	483
1996-1997	309,8	771,1	276,1	759,1
1997-1998	463,1	1234,2	368	1127,1
1998-1999	445,8	1680	379,3	1506,4
1999-2000	483,4	2163,4	442,1	1948,5
2000-2001	265,2	2428,6	309,8	2258,3
2001-2002	517,6	2946,2	364	2622,3
2002-2003	362,6	3308,8	335,7	2958
2003-2004	351,5	3660,3	368,4	3326,4
2004-2005	381,8	4042,1	436,2	3762,6
2005-2006	663,8	4705,9	542,6	4305,2
2006-2007	482	5187,9	515,5	4820,7
2007-2008	528,3	5716,2	576,8	5397,5
2008-2009	481	6197,2	499,1	5896,6
2009-2010	469	6666,2	545,5	6442,1
2010-2011	426,3	7092,5	661,6	7103,7
2011-2012	408	7500,5	437,1	7540,8
2012-2013	434,8	7935,3	615,5	8156,3
2013-2014	458	393,30	458,7	8615
2014-2015	395	788,32	395,6	9010,6
2015-2016	520,24	308,56	521	9531,6

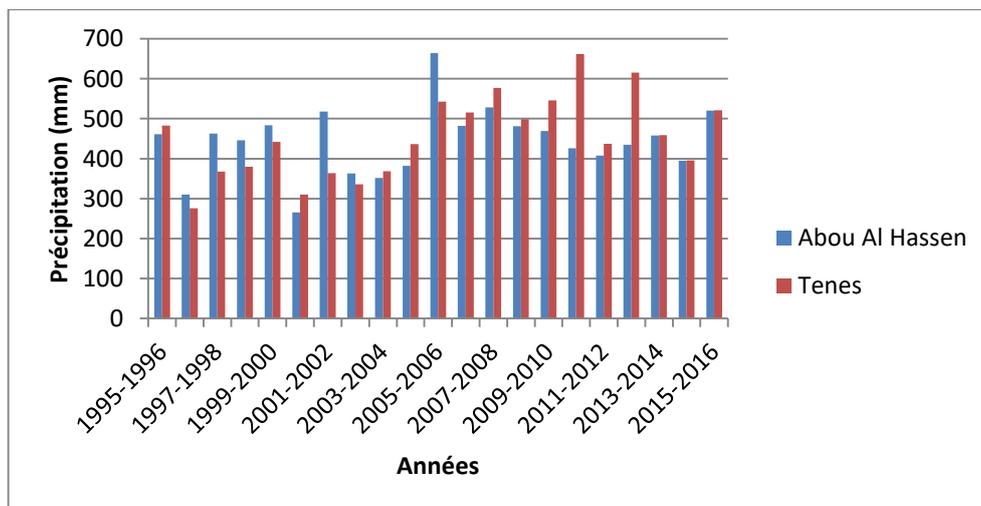


Figure.3.2: Les variations des précipitations annuelles des deux stations (1995-2016)

L'analyse des précipitations annuelles montre que les années les plus humides pour l'ensemble des deux stations sont 2005-2006 et 2010-2011 alors que 1996-1997 et 2000-2001 représentent les années les plus sèches (Figure 3.2, Tableau 3.2).

Pour comprendre au mieux le mode de répartition des précipitations et effectuer des études prévisionnelles, on effectue les études statistiques pour déterminer les lois de répartition à utiliser.

Le phénomène de variabilité inter annuelle des modules pluviométriques est bien exprimé par le coefficient de variation (CV) traduisant la dispersion relative des pluies. Les valeurs du coefficient de variation relatives à la période (1995-1996/2015-2016) pour les deux stations, allons de 0.19 a 0.23, ce qui implique une variabilité faible dans l'ensemble.

La pluie annuelle est une variable aléatoire qui doit subir une analyse statistique par le biais d'une loi de distribution appropriée pour en réduire les caractéristiques.

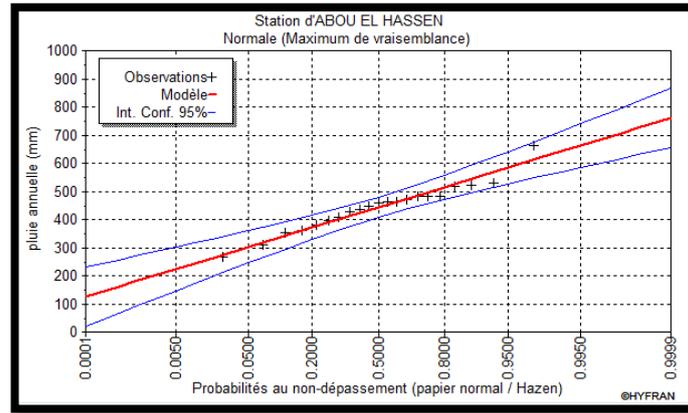
On a effectué l'ajustement de la série des pluies annuelles à la loi de GAUSS (normale), GALTON (lognormale) et GUMBEL (double exponentielle) à l'aide du logiciel Hyfran ainsi que les tests d'adéquation.

L'ajustement est fait pour les trois lois, afin de choisir la loi la plus adéquate, celle qui a le χ^2 le plus faible. D'après l'examen visuel, la loi Normal présente l'avantage d'être un modèle simple pour les deux stations (figure III.3). (Voir annexe 1)

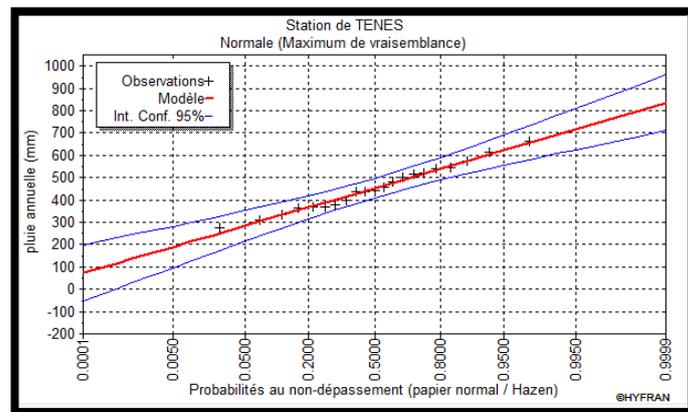
- **Ajustement par la loi normale de Gauss**

Tableau.3.3 : Paramètres d'ajustement de la loi normal.

Paramètres	Formules	Valeurs	
		TENES	ABOU EL HASSEN
Moyenne	$P^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$	453.88	443.26
Ecart-type	$\sigma_P = \sqrt{(S^2)}$	102.62	85.33
Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma_P}{P}$	0.23	0.19



(a)



(b)

Figure.3.3: Ajustement des précipitations annuelles de ; (a) ABOU EL HASSEN, (b) TENES

Tableau.3.4: Précipitations annuelles fréquentielles

Station	F	T (ans)	U	P (mm)
TENES	0.99	100	2.32	691.96
	0.98	50	2.05	664.25
	0.9	10	1.28	585.23
	0.5	2	0.00	453.88
ABOU EL HASSEN	0.99	100	2.32	661.20
	0.98	50	2.05	618.16
	0.9	10	1.28	552.47
	0.5	2	0.00	443.26

III.3.1.3. Variation des pluies mensuelles et saisonnières

La meilleure méthode pour étudier la variation des précipitations saisonnières est la méthode des rapports entre la moyenne des précipitations mensuelles et la moyenne annuelle.

Cette méthode permet de mieux apprécier le régime et l'enchaînement des saisons humides (tableau 3.5).

Tableau.3.5: Variation des précipitations moyenne mensuelle (1995-2016)

Station de TENES												
	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Pmoy (mm)	22,7	34,5	86,7	67,6	46,8	61,4	42,2	47,3	34,3	4,4	1,3	2,5
Pmoy/Pan (%)	5,01	7,63	19,2	15	10,4	13,6	9,34	10,5	7,6	1	0,3	0,6
Station d'ABOU EL HASSEN												
	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Pmoy (mm)	18,6	33,3	101	77,6	56,1	73,3	49,1	48,1	36,5	3,6	1,4	1,2
Pmoy/Pan (%)	3,72	6,67	20,2	15,5	11,2	14,7	9,82	9,63	7,3	0,7	0,3	0,2

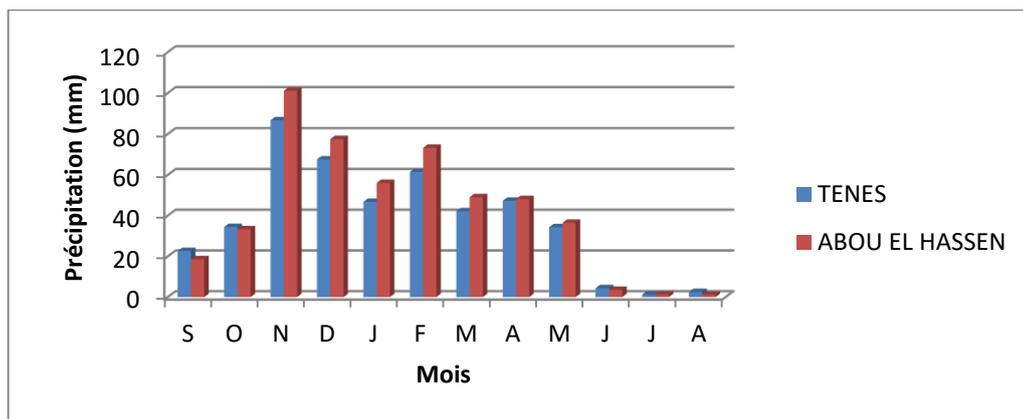


Figure.3.4 : Histogramme des précipitations mensuelles (TENES & ABOU EL HASSEN)

D’après l’histogramme des précipitations mensuelles nous pouvons constater que :

- La période pluvieuse va du mois de novembre au mois de février en général

- La période sèche correspond aux mois de juin, juillet et aout avec un minimum de pluviosité enregistrée en juillet.

III.3.2. Températures

L'ensemble des données de températures montre que l'hiver est très froid et l'été très chaud. Les températures moyenne diminuent pendant les trois mois d'hiver, (décembre, janvier et février) d'un minimum de (2.5°C) et elles augmentent pendant les trois mois d'été (juin, juillet, aout) d'un maximum de (32°C), l'écart entre ces deux extrêmes donne une amplitude thermique de (30°C)

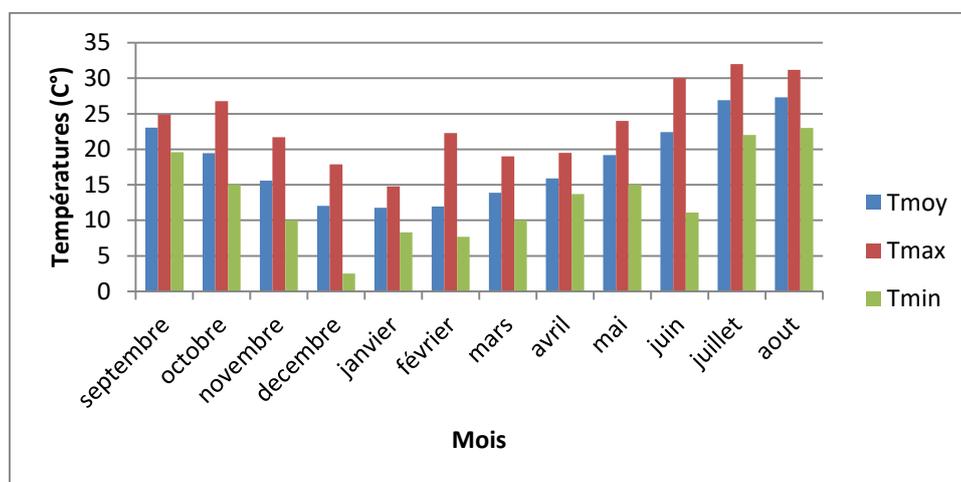


Figure.3.5 : Histogramme des températures moyennes, maximales et minimales

III.3.3. Evapotranspiration

La semi aridité du climat et l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations du bassin de Oued Allala font que l'évapotranspiration est très fluctuante dans l'année, elle passe de 24.17 mm au mois de janvier à 165.95 mm au mois de juillet.

Tableau.3.6: Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles en mm (1995-2016)

Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
103,06	71,18	41,38	25,25	24,27	25,60	39,34	53,85	85,74	118,90	167,95	160,92

L'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle à été évalué à 917.44 mm, Ce chiffre montre notamment à quel points la région est soumise au climat semi aride. La

répartition mensuelle donne plus de 40% de perte d'eau par évaporation sur les trois mois plus sec de l'année (juin, juillet et aout).

III.3.4. Hydrométrie

L'écoulement moyen annuel ou l'abondance annuelle est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m^3/s . Nous disposons de séries de données hydrométriques représentant 21 ans d'observation (1995-2016).

Les séries de débits mises à notre disposition présentent des lacunes qui ont été comblées avec la méthode de la proportionnalité analogue. Cette méthode a consisté à faire le rapport des débits et des superficies des sous bassins et à les équaler. Une règle de trois permet ensuite de donner la valeur du débit inconnu dans chaque relation.

Tableau.3.7: Données hydrométriques annuelles de la zone d'étude

Année	Q (m ³ /s)	Année	Q (m ³ /s)
1995-1996	9,15	2006-2007	10,22
1996-1997	4,37	2007-2008	5,74
1997-1998	5,11	2008-2009	10,2
1998-1999	8,61	2009-2010	9,34
1999-2000	9,77	2010-2011	5,86
2000-2001	4,26	2011-2012	15,77
2001-2002	13,15	2012-2013	8,31
2002-2003	3,15	2013-2014	0,9
2003-2004	1,82	2014-2015	1
2004-2005	4,76	2015-2016	0,91
2005-2006	13,72		

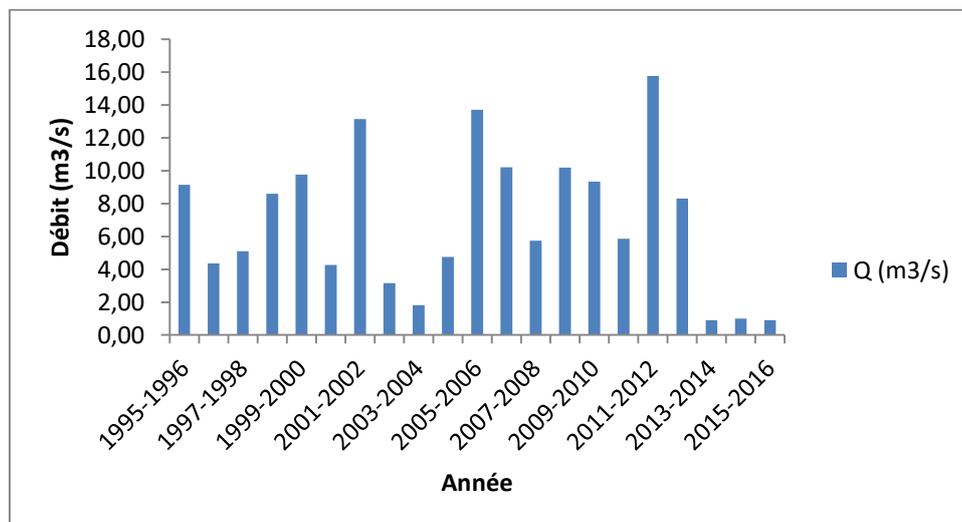


Figure.3.6: Les variations des débits annuelles dans la zone d'étude (1995-2016)

On a effectué l’ajustement de la série des débits annuelles a la loi de GAUSS (normale) , GALTON (lognormale) et GUMBEL (double exponentielle) a laide du logiciel Hyfran ainsi que les tests d’adéquation.

L’ajustement est fait pour les trois lois, afin de choisir la loi la plus adéquate, celle qui a le χ^2 le plus faible. D'après l'examen visuel, la loi Normal présente l'avantage d’être un modèle simple (Voir annexe 1)

- **Ajustement par la loi normale de Gauss**

Tableau.3.8: Ajustement des débits à l’aide de la loi normale (GAUSS)

Station	F	T (ans)	U	XT
SIDI AKKACHA	0.9900	100.0	3.54	22.3
	0.9800	50.0	3.07	19.5
	0.9000	10.0	2.00	13.1
	0.5000	2.0	0.993	5.74

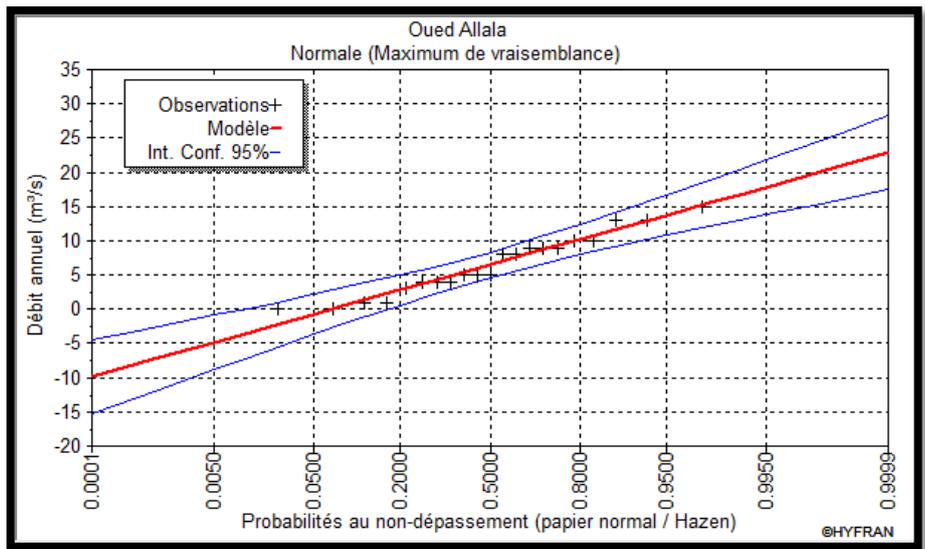


Figure.3.7 : Ajustement des débits annuels de la zone d’étude par la loi normale

III.3.5.Type de climat

III.3.5.1. Indice xérothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)

L’indice I_x , est calculé en retranchant du nombre de jours de la période sèche (suite de mois secs) le nombre de jours pluvieux ou supposés humides (degré hygrométrique élevé). Les valeurs obtenues représentent le nombre de jours secs au cours de cette période

sèche. Cet indice complète le diagramme ombrothermique qui montre l'importance de la période sèche (figure-III.8).

Dans ce diagramme, les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations: un mois est considéré comme sec si le total des précipitations est égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T$).

Tableau.3.9 : Paramètres bioclimatiques calculés selon Bagnouls et Gaussen

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT
P (mm)	20,63	33,9	93,95	72,57	51,44	67,35	45,63	47,73	35,42	3,98	1,31	1,85
2T (C°)	46,08	38,94	31,22	24,06	23,54	23,9	27,8	31,78	38,38	44,86	53,8	54,62

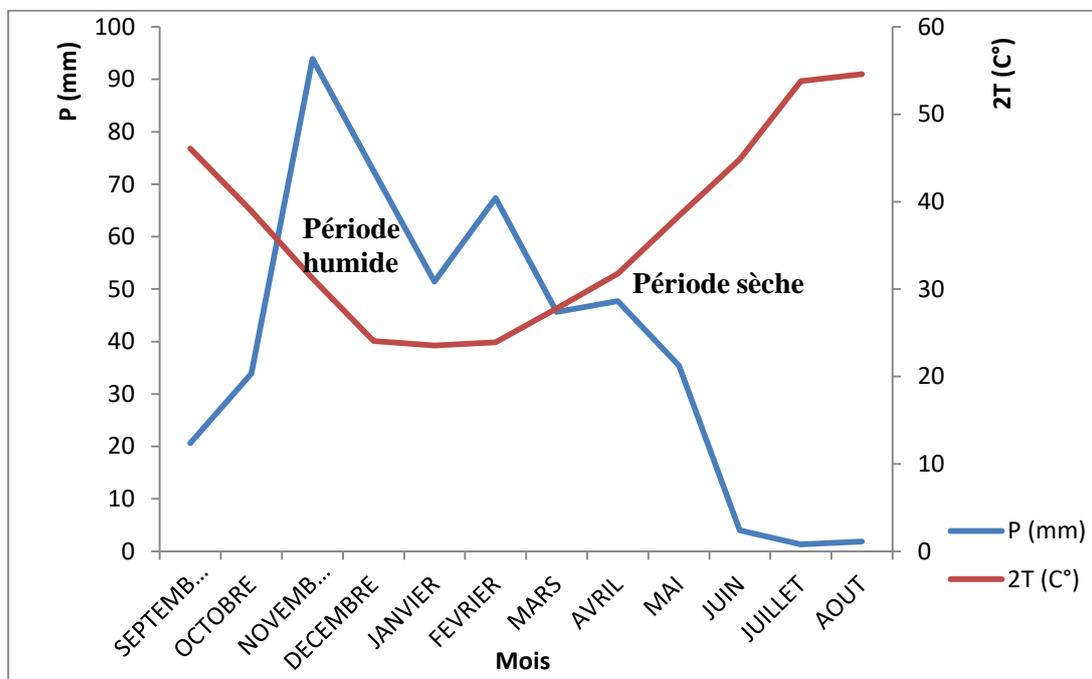


Figure.3.8 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen sur le bassin de Oued Allala (1995 -2016)

III.3.5.2.Indice annuel d'aridité de De Martonne (1926)

Cet indice proposé par De Martonne en 1926, noté I_a est fondé sur le régime des précipitations et les températures et permet de trouver le type de climat qui règne dans la région, la formule utilisée est la suivante :

$$I_a = \frac{P}{T+10} \tag{3.2}$$

Avec :

P = Précipitation annuelle (mm)

T = température annuelle moyenne en °C

- $I < 10$ Climat aride, écoulement temporaire.
- 10 - 20 Climat semi-aride, écoulement temporaire.
- 20 - 30 zone tempérée drainage extérieure.
- 30 - 40 écoulements exoréiques.

Selon la classification des climats adoptée par De Martonne, le bassin d'étude est classé en régime semi aride avec écoulement temporaire ($I_a = 11.71$).

III.3.5.3. Le quotient pluvio thermique d'Emberger (1955)

Noté Q_2 . Cet auteur fonde son indice sur les limites occupées par les différentes associations végétales. Il se calcule selon l'expression suivante :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{M+m}{2}(M-m)} \times 1000 \quad (3.3)$$

Avec :

Q_2 : Le quotient pluvio-thermique d'Emberger

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

M : moyenne des maximales du mois le plus chaud en degré absolu (°K).

m : moyenne des minimales du mois le plus froid en degré absolu (°K).

Pour le bassin de Oued Allala le Q_2 est égal à 66.65.

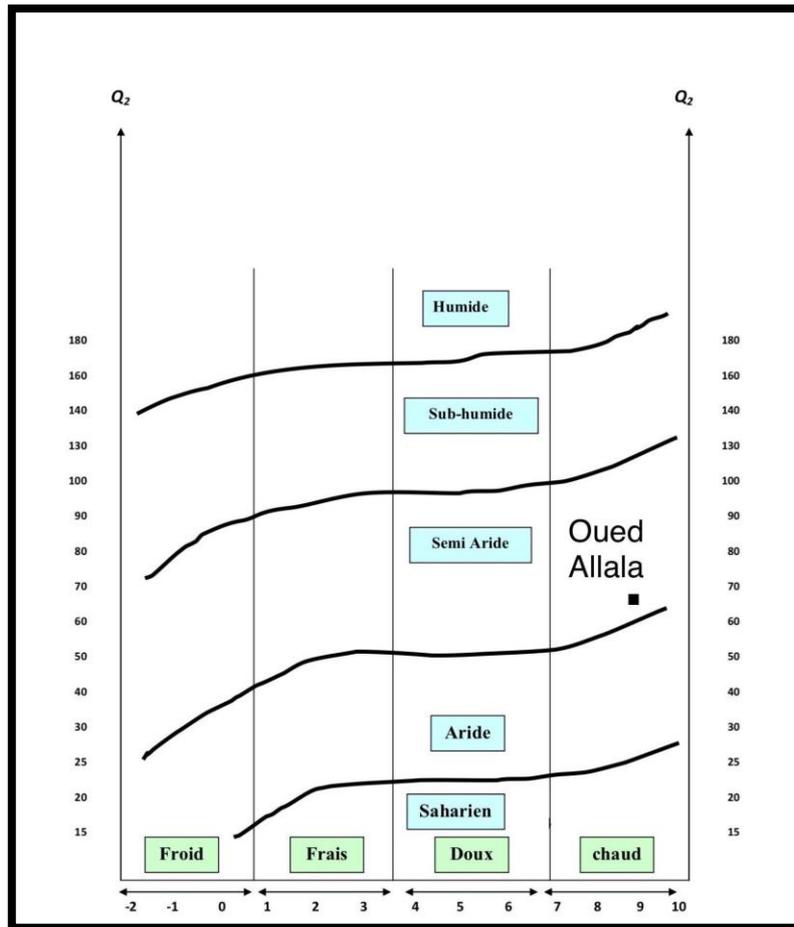


Figure.3.9: Climagramme d’emberger

Selon le climagramme d’Emberger, notre bassin se trouve dans une zone semi aride

III.4.Conclusion

Les études faite au niveau du chapitre trois nous permet d’obtenir quelque particularité du bassin de Oued Allala.

Le régime pluviométrique et thermique divise l’année en deux saisons distinctes, une saison humide et froide avec une pluviométrie qui dépasse les 150 mm par fois et une saison chaude et sèche avec une évapotranspiration qui dépasse les 160 mm due aux températures élevées qui sont a leurs maximums au mois de juillet.

Grace à l’indice annuel d’aridité de De Martonne et le quotient pluvio thermique d’Emberger, on a déduit que notre zone d’étude se trouve dans une zone semi aride.

Chapitre IV

Modélisation neuronale des débits liquides du bassin de Oued Allala

IV.1.Introduction

Les réseaux de neurones artificiels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et divers services, des techniques d'analyse en provenance de l'apprentissage automatique (intelligence artificielle) et des bases de données.

L'avantage de l'utilisation des réseaux de neurones dans la modélisation en hydrologie est perçu par leur capacité à tenir compte de la non linéarité de la relation pluie-débit. Plusieurs environnements sont disponibles pour le développement des réseaux de neurones mais dans cette étude, c'est le compilateur "Matlab" a été utilisé. Plusieurs travaux témoignent de la capacité des réseaux de neurones à modéliser les débits sur les bassins versants (Wenri et al, 2004; Johannet, 2006; Dechemi et al, 2003).

Notre approche vise à trouver un modèle simple et objectif qui peut simuler des débits liquides au pas de temps mensuels proches de ceux observés sur le bassin de Oued Allala.

Dans ce chapitre, on va vérifier l'efficacité des réseaux de neurones formels pour la modélisation des débits liquides du bassin d'étude. Deux modèles de réseaux de neurones ont été optimisés afin d'atteindre cet objectif. Une base de données composée du débit, de la pluie, de l'Evapotranspiration Potentiel (ETP) au pas de temps mensuels à été utilisée comme entrée de ces modèles.

Les modèles neuronaux ont été optimisés avec l'algorithme de Levenberg Marquardt (LM). Le critère de Nash (%) et le coefficient de corrélation de Pearson (R) ont permis d'apprécier les performances de ces modèles.

IV.2.Généralités sur les réseaux de neurones artificiels

IV.2.1.Historique

De façon générale, on situe le début des réseaux de neurones artificiels en 1943, avec les travaux de « McCulloch et Pitts » qui montrent qu'un réseau de neurones discret, sans contrainte de topologie, peut représenter n'importe quelle fonction booléenne et donc émuler un ordinateur.

En 1958, « Rosenblatt » propose le premier algorithme d'apprentissage, qui permet d'ajuster les paramètres d'un neurone. En 1969, Minsky et Papert publient le livre

‘Perceptrons’, dans lequel ils utilisent une solide argumentation mathématique pour démontrer les limitations des réseaux de neurones à une seule couche.

En 1982, « Hopfield » propose des réseaux de neurones associatifs et l’intérêt pour les réseaux de neurones renaît chez les scientifiques.

En 1986, « Rumelhart, Hinton et Williams » publient l’algorithme de la ‘rétropropagation de l’erreur’ qui permet d’optimiser les paramètres d’un réseau de neurones à plusieurs couches.

En effet, depuis 1997, plusieurs centaines d’articles ont été publiés sur l’application des réseaux de neurones à la gestion des ressources en eau. La moitié des applications en hydrologie de ces modèles concernent la relation pluie-débit avec les travaux des auteurs [Dimopououlos et al, 1996 ; Abrahart et See, 2000 ; Schumann et al, 2000 ; Dechemi et al, 2003].

IV.2.2.Réseaux de neurones

IV.2.2.1. Le neurone formel (artificiel)

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") (Figure 4.1) est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids (Dreyfus, 1998). C’est est un opérateur mathématique non linéaire qui est caractérisé par des paramètres, généralement appelés poids ou coefficients synaptiques, et par une fonction dite d’activation. Un neurone peut avoir une ou plusieurs variables et une ou plusieurs sorties.

Nous noterons :

- $x = \{x_j, 0 \leq j \leq n\}$ le vecteur des variables
- y la sortie scalaire
- $w = \{w_j, 0 \leq j \leq n\}$ le vecteur des paramètres
- F la fonction d’activation

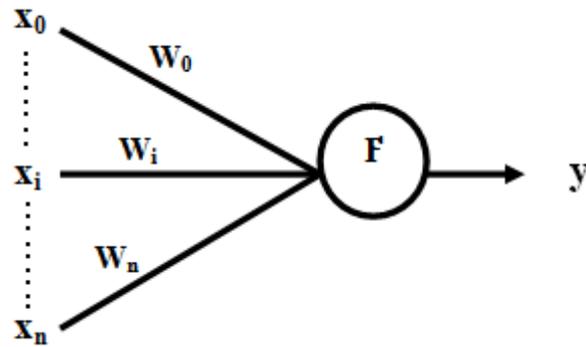


Figure 4.1: Schéma d'un neurone formel avec ses variables x , ses paramètres w , sa fonction d'activation f et sa sortie y

Le réseau de neurone est défini comme un assemblage d'éléments de structure identique appelés cellules (ou neurones) interconnectées à l'instar des cellules du système nerveux des vertébrés (Coulibaly et al, 1999). Des neurones biologiques, les auteurs comme Werbos (1981) se sont inspirés pour mettre au point les neurones formels ou artificiels. Des similitudes ont donc été établies entre les éléments des neurones biologiques et les composants des Neurones Formels ou Artificiels (figure 4.2).

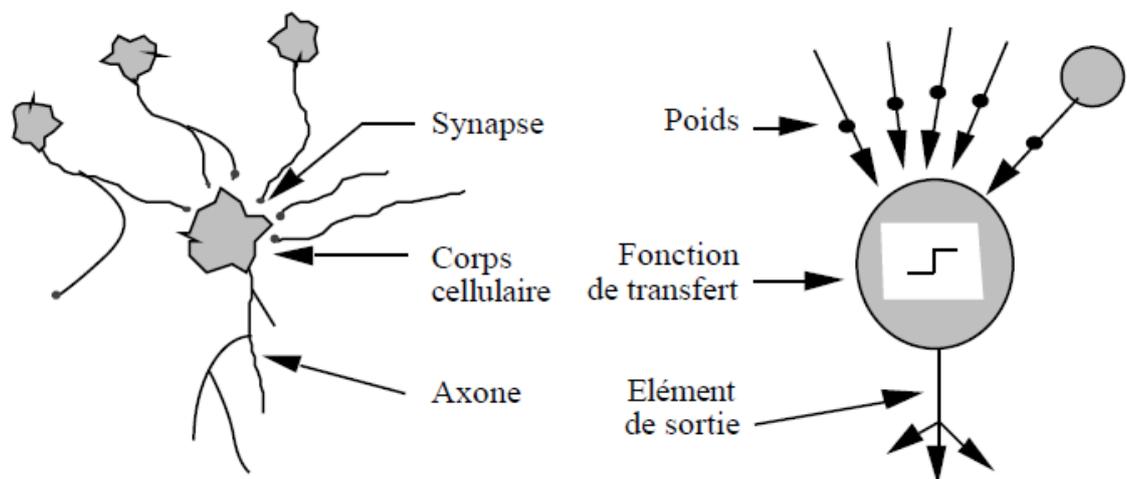


Figure 4.2: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel (Touzet, 1992).

IV.2.2.2. Architecture des réseaux de neurones

Chaque type de problèmes à traiter par le RNA nécessite un choix approprié de l'architecture et de l'algorithme d'apprentissage. Parmi les architectures les plus connues, on trouve :

- Les réseaux de neurones statiques.
- Les réseaux de neurones dynamiques.

a. Réseau monocouche

La structure d'un réseau monocouche est telle que les neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids.

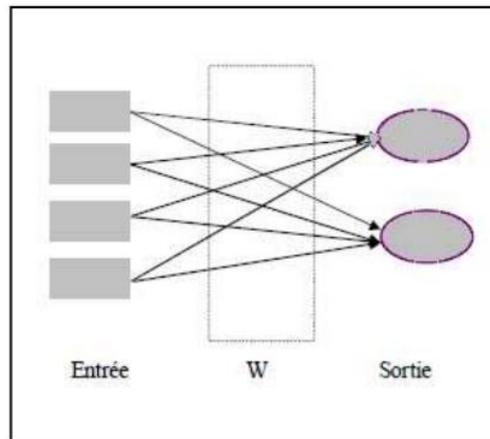


Figure.4.3: Réseau de neurones monocouche

b. Réseaux multicouches

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées.

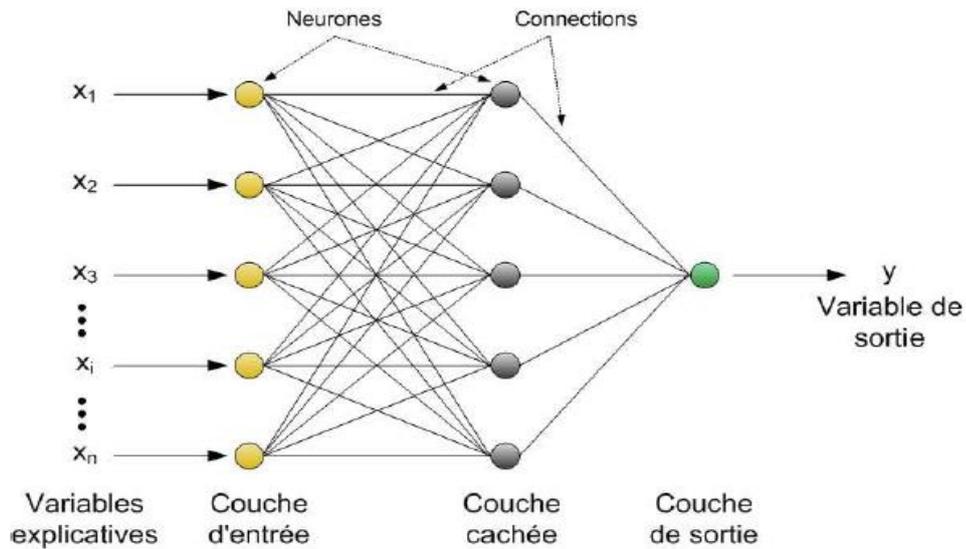


Figure 4.4: Structure générale d'un réseau de neurones multicouche.

IV.3. Etude de la relation pluie débit du bassin de Oued Allala par les RNA

IV.3.1. Mise en œuvre des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leur mise en œuvre nécessite :

- La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- La détermination du nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- La réalisation de l'apprentissage
- L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

IV.3.2.Choix d'un réseau de neurones

Plusieurs architectures de réseaux de neurones existent (Touzet, 1992). Mais, le Perceptron Multicouches, qui est une extension du Perceptron Monocouche, avec une ou plusieurs couches cachées entre l'entrée et la sortie est utilisé dans cette étude (figure 4.4).

Dans le contexte de ce travail, seul l'apprentissage supervisé nous intéresse avec l'utilisation de l'algorithme de Levenberg-Marquadt. Cet apprentissage s'effectue grâce à la minimisation d'une fonction, appelée fonction de coût (fonction d'Erreur), calculée à partir des exemples de la base d'apprentissage et de la sortie du réseau de neurones ; cette fonction détermine l'objectif à atteindre.

La fonction d'activation généralement non linéaire classique est la fonction sigmoïde. Elle présente l'avantage d'être régulière, monotone, continûment dérivable, et bornée entre 0 et 1 :

$$F(\alpha) = \frac{1}{(1 + e^{-\alpha})} \quad (4.1)$$

IV.3.3.Choix du nombre d'unités cachées

Le choix du nombre de couches ainsi que du nombre de neurones a été décidé après avoir effectué différentes combinaisons.

Dans ce travail, l'utilisation d'une seule couche cachée est suffisante pour le modèle de RNA (Cybenko, 1989 ;Hornik et al, 1989). Le nombre optimal de neurone dans la couche cachée a été identifié suivant un procédé d'essai et d'erreur en variant le nombre de neurones sur la couche caché (Lohani, et al, 2010),dans ce cas, nous partons d'une architecture à 1 neurone dans la couche cachée, et on augmente constamment ce nombre jusqu'à 30, puis on retient l'architecture qui donne le minimum de l'erreur sur la base de test (figure 4.5). L'architecture proposée est le résultat de plusieurs phases d'optimisation ayant permis de sélectionner le meilleure modèle.

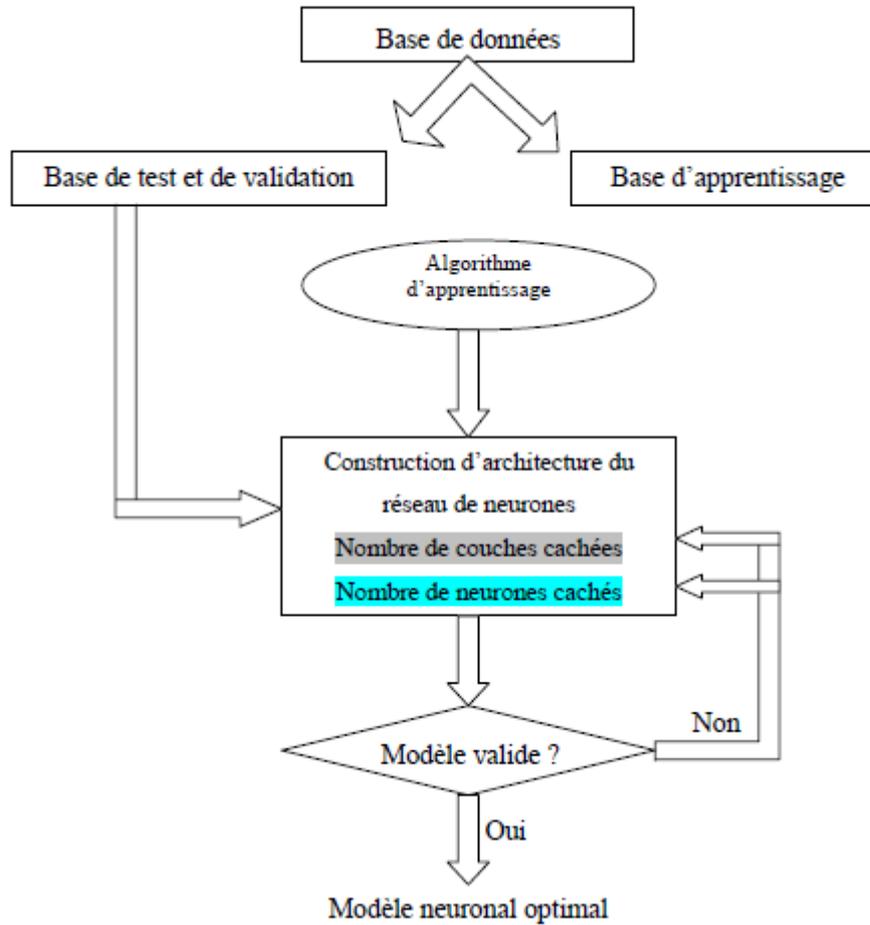
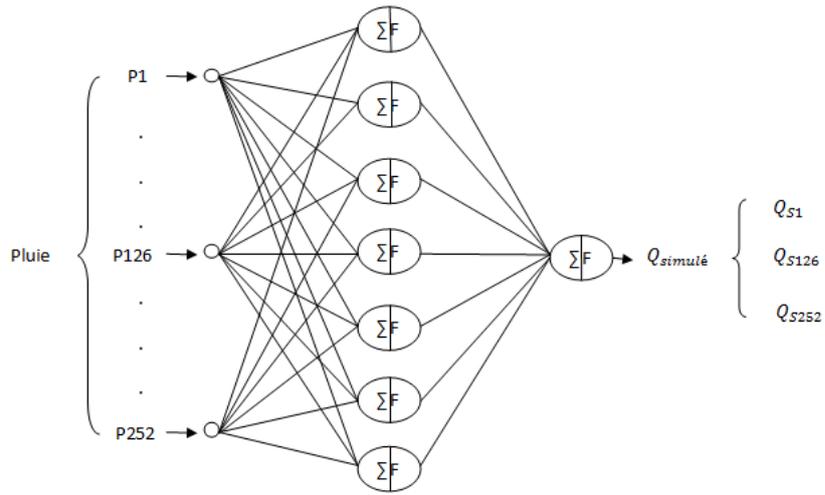


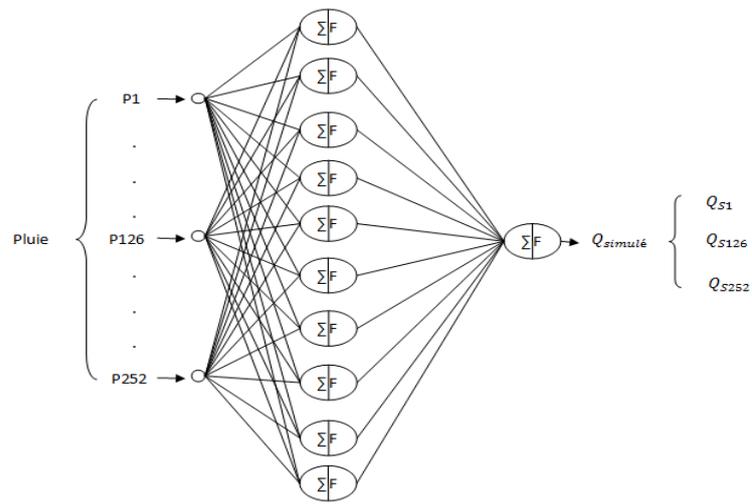
Figure 4.5: Organigramme de conception d'un réseau de neurones (Benzineb, 2017).

Tableau 4.1: La meilleure architecture de réseaux de neurones retenue

Station	Variables	Nombre de neurones sur la Couche cachée	Architecture
TENES	Pluie	10	1 10 1
	Pluie-ETP	8	2 8 1
ABOU EL HASSEN	Pluie	7	1 7 1
	Pluie-ETP	5	2 5 1

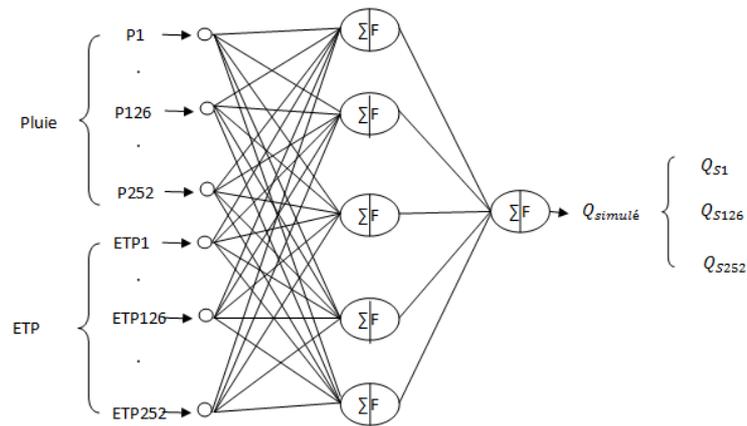


(a)

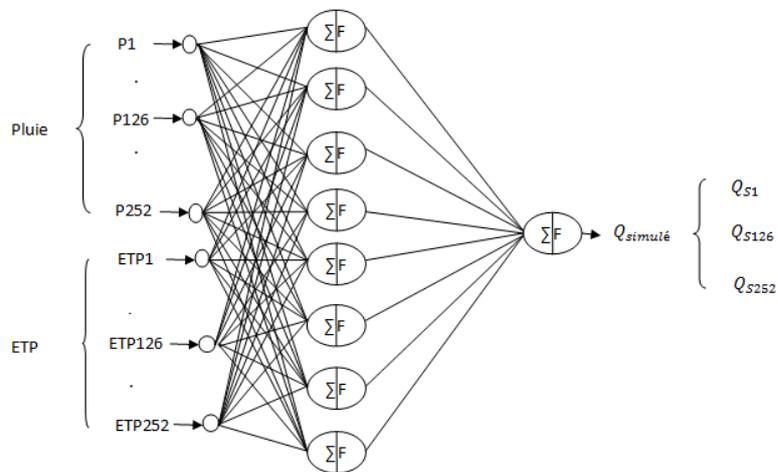


(b)

Figure 4.6: Architecture simplifier du modèle neuronal a une seule entrée ; (a) Station d'ABOU EL HASSEN, (b) Station de TENES.



(a)



(b)

Figure 4.7: Architecture simplifier du modèle neuronal a deux entrées ; (a) Station d'ABOU EL HASSEN, (b) Station de TENES.

IV.3.4. Critères de performance

Les critères de performance d'un modèle hydrologique peuvent être simples (rapport des volumes d'eau simulés et observés), ou faire l'objet de calculs en général inspirés par des méthodes statistiques visant à normaliser la comparaison entre le résultat de la simulation ou de la prévision et les observations. On peut trouver des descriptions détaillées de ces critères dans les travaux de Nash et Sutcliffe (1970), Beven et Binley (1992), Franchini et al, (1996) et Siebert, (1999). Pour quantifier les performances des modèles, il n'y a pas de critère universel d'évaluation. Le principe général est de comparer les débits calculés aux débits observés. On peut interpréter les critères en termes de qualité

(ajustement du modèle à la réalité), de robustesse (conservation des performances d'un modèle de la phase de calage à la phase de contrôle), et de fiabilité (conservation des performances d'un modèle d'un bassin à un autre), Miossec (2004). De nombreux critères sont utilisés en hydrologie pour évaluer la sensibilité des modèles, notamment :

- Le Critère de Nash ;
 - Le coefficient de corrélation R ;
 - Le coefficient de détermination R^2 ;
 - L'erreur quadratique moyenne (Mean Square Error) (MSE) ;
 - La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (Mean Square Error) (RMSE)
- Les paragraphes développés ci-dessous essaieront de décrire ces critères afin de faciliter leur utilisation dans la suite de ce mémoire de Thèse. (KOFFI.Y.B.2007).

Dans notre étude, on prend en compte le critère de Nash et le coefficient de corrélation de Pearson. Le critère de Nash Introduit par Nash et Sutcliffe (1970) est défini par :

$$Nash = (100) \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \right) \quad (4.2)$$

Avec:

T_i et P_i respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les $i = 1, \dots, N$,

Le critère de Nash peut être interprété comme étant la proportion de la variance du débit observé expliqué par le modèle. Si $Nash = 100 \%$, l'ajustement est parfait, par contre si $Nash < 0$, le débit calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit moyen.

En ce qui concerne le coefficient de corrélation de Pearson, il est habituellement utilisé pour évaluer la performance des modèles hydrogéologiques et hydrologiques (Legates et McCabe, 1999) Il est obtenu en calculant la régression linéaire entre les valeurs (débits) calculées et les valeurs (débits) observées ou mesurées. Sa formulation est donnée par l'équation 4. 3.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N t_i P_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N t_i^2\right) \left(\sum_{i=1}^N P_i^2\right)}} \quad (4.3)$$

avec :

T_i et P_i respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les $i = 1, \dots, N$, \bar{T} et \bar{P} sont les moyennes respectives des débits observés et calculés. N , le nombre d'entrées ; $t_i = T_i - \bar{T}$, $p_i = P_i - \bar{P}$, La corrélation entre les débits observés et les débits calculés (Legates et McCabe, 1999) est :

- parfaite si $R = 1$
- très forte si $R > 0,8$
- forte si R se situe entre 0,5 et 0,8
- d'intensité moyenne si R se situe entre 0,2 et 0,5
- faible si R se situe entre 0 et 0,2
- nulle si $R = 0$

IV.3.5. Résultats et discussion

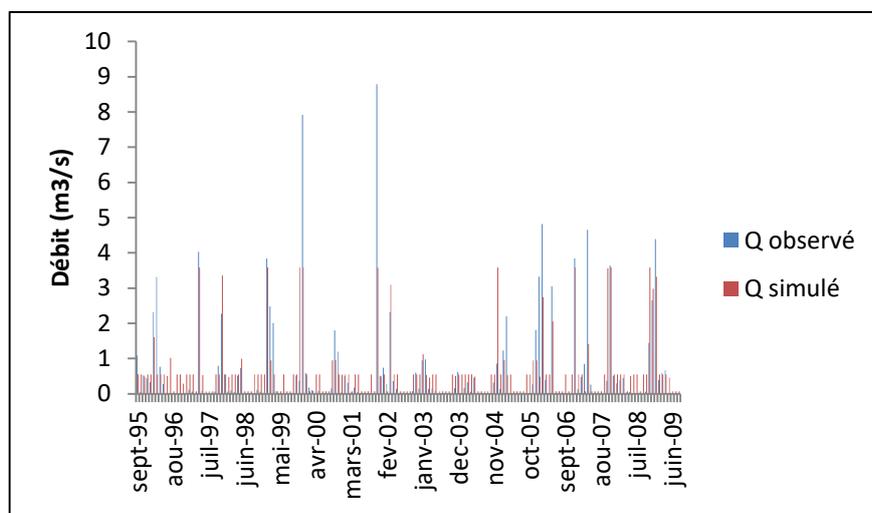
Nous avons utilisé dans le cadre de ce mémoire, une base de données au pas du temps mensuels a été collecté au niveau de l'ANRH de Blida et l'ONM de Chlef, cette base représente des données d'une période de 21ans (Septembre 1995- Aout 2016).

Dans notre cas, nous avons sélectionné 168 mois de la période entre 1995-2016, dont les 2/3 de la base(252) sont réservés pour le calage et le reste (84) est réservé pour la validation (1/3).

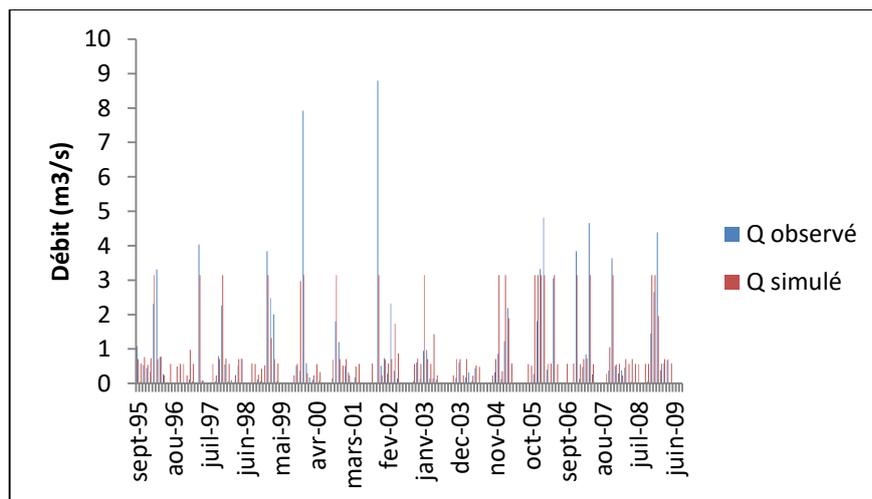
Les résultats du calage et de validation de la station de TENES et ABOU EL HASSEN sont représentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Performance des modèles neuronaux aux stations d'études

Station	Modèle	Calage		Validation	
		Nash (%)	R	Nash (%)	R
TENES	Pluie	72.87	0.72	55.15	0.60
	Pluie+ETP	74.86	0.70	60.93	0.67
ABOU EL HASSEN	Pluie	73.51	0.73	56.35	0.57
	Pluie+ETP	80.33	0.87	58.24	0.89

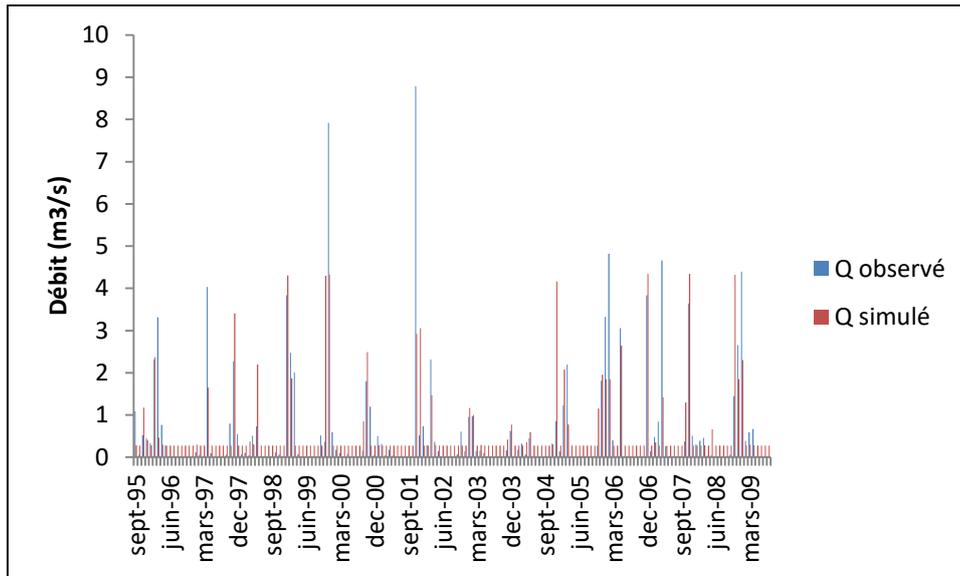


(a)

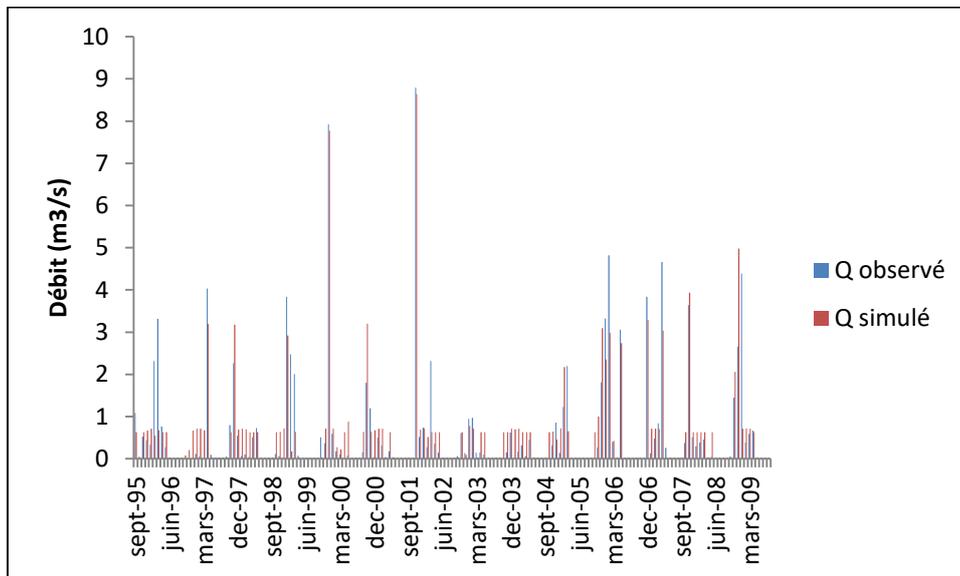


(b)

Figure 4.8: Hydrogrammes issu des simulations réalisées en phase de calage, à l'aide des modèles neuronaux à une seule entrée ; (a) station de TENES, (b) station d'ABOU EL HASSEN



(a)



(b)

Figure 4.9: Hydrogrammes issu des simulations réalisées en phase de calage, à l'aide des modèles neuronaux à deux entrées ; (a) station de TENES, (b) station d'ABOU EL HASSEN

D'après le tableau 4.2 on remarque que :

- les résultats obtenus avec les différents modèles développés (modèles neuronaux) sont généralement très satisfaisants en calage avec des critères de Nash qui sont supérieurs à 72% et les coefficients de corrélation de Pearson varient de fort à très forts entre 0,57 et 0,89 en calage et en validation.

- Les résultats de simulations obtenues par les deux stations (TENES et ABOU EL HASSEN) sont proches.

Une comparaison faite entre les performances des modèles neuronaux montre que le modèle neuronal avec deux entrées (pluie+ETP) est plus performant que le modèle neuronal à une seule entrée (pluie) tant en calage qu'en validation. L'ajout de l'évapotranspiration potentielle améliore la performance des réseaux de neurones, tant en calage qu'en validation pour les deux stations.

La lecture du tableau 4.2 et l'analyse des figures 4.8, 4.9 permet de constater que les réseaux de neurones avec la pluie seulement en entrée sont moins performants que les réseaux de neurones avec la pluie et l'ETP en entrée. En revanche, l'ajout de l'évapotranspiration potentielle améliore un peu la performance du réseau de neurone.

Ces observations permettent de constater que l'ajout des variables explicatives, comme l'évapotranspiration améliore la capacité des réseaux de neurone à calculer les débits du bassin de Oued ALLALA.

Les corrélations et les hydrogrammes issus des simulations réalisées en phase de validation entre les débits observés et simulé sont mentionnées en annexe II.

IV.4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons exploité la modélisation pluie-débit par les réseaux de neurones sous deux différentes formes de série d'architecture en fonction des entrées des modèles, et cela au pas de temps mensuel. Le premier modèle neuronale avec la pluie seulement en entrée et le second avec la pluie et l'ETP en entrée.

En examinant les résultats obtenus par les deux modèles neuronaux, nous remarquons que les performances des réseaux de neurones augmentent sensiblement avec l'ajout d'une autre entrée au modèle.

Conclusion générale

Conclusions générales

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique.

Les variations du débit ne peuvent pas être décrites facilement par des relations linéaires. Le recours à des méthodes non-linéaires s'avère donc nécessaire. Parmi les plus prometteuses figurent les approches basées sur les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).

L'objectif essentiel de ce mémoire est de modéliser la relation pluie-débit au pas de temps mensuels à l'aide d'un modèle à boîte noire (les réseaux de neurones artificiels) en milieu semi-aride algérien (cas du bassin de oued Allala). 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.

Dans ce contexte, deux séries d'architectures de réseaux de neurones ont été exploitées (une première série avec la pluie seulement en entrée et une seconde avec la pluie et l'ETP en entrée) au pas de temps mensuels. En examinant les résultats obtenus par les deux modèles neuronaux, nous remarquons que les performances des réseaux de neurones augmentent sensiblement avec l'ajout d'une autre entrée au modèle.

Le modèle neuronal à deux entrées (pluie, ETP) testé sur le bassin de Oued Allala a abouti à des résultats satisfaisants dans la modélisation des phénomènes hydrologiques, ainsi les débits simulés sont très proches de ceux observés, donc les résultats obtenus, sont très encourageants.

Comme perspectives nous proposons une hybridation des réseaux de neurones avec d'autres modèles pluie-débit telle que la logique floue et les modèles du génie rural pour augmenter la transparence du modèle.

Références Bibliographiques

References Bibliographiques

- Abbott. M. B. Bathurst. J. C. Cunge. J. A. O'Connell. P. E. Rasmussen. J. (1986).** An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system.
- Ambroise, B. (1999).** La dynamique des cycles de l'eau dans un bassin versant- Processus, Facteurs, Modèles. Editions *H*G*A*, Bucarest, 204 p.
- A.N.R.H.**
- Ayral, P. A. (2005).** Contribution à la spatialisation du modèle de prévision des crues éclairées ALHTAIR. Approche spatiale et expérimentale, application au bassin versant du Gardon d'Anduze. Thèse de Doctorat. Université de Provence, Aix-Marseille 1, LGEI, Ecole des Mines d'Alès, Alès, France. 311p.
- Benzineb. K. (2017).** Modélisation des débits de crues de bassin de Oued Ouahrane par les réseaux de neurones artificiels. Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali Chlef. 152p.
- Boe, J. (2007).** Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. thèse de doctorat. l'Université Paul Sabatier- Toulouse III. 255 p.
- Bonn.K. Schelling, K. Weissteiner, C. & Kühbauch, W. (2003).** Relationships between yield and quality parameters of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) and phenological and meteorological data. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189, 113-122.
- Bouanani. A (2002).** Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse doctorat d'état. université Abou Keker Belkaid Tlemcen P13 ,p69.
- Bouthiba.F. (2012).** Fonctionnement Hydrologique d'un bassin versant semi-aride (Cas des bassins versant du Rouina , Ouahrane , Tighazel), 154p.
- Bwira. J. P. (2015).** Modélisation hydrologique conceptuelle GR - Cas du bassin versant de Nsimi au Cameorun ; Thèse master.
- Coulibaly, P., Anctil, F. et Bobee, B. (1999).** Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels : Etat de l'art. *Revue canadienne de génie civil*, Vol. 26., , 293-304.
- Cudennec. C. (2000).** Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique, 187p.
- Cybenko, G. (1989).** Approximation by superposition of sigmoidal functions, *Mathematics of control, signals and systems*, 2, pp. 303-314, pp. 377-403.

- Decelles. A. V. (2002).** Introduction aux réseaux de neurones CONSIDÉRATION SACTUARIELLES suite 2030 Montréal (Québec) H3T 2B1.
- **Dechemi, N., Tarik, B.A. et Issolah. A. (2003).** Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol. 16 n°4 407-424
- Drew. P.J. Monson. J.R.T. (2000).** Artificial neural networks, *Surgery* 127 : 3-11.
- Duan, Q., Sorooshian, S. et Gupta, V.K. (1992).** Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
- Fletcher. R. et Powell, M.J.D. (1963).** A rapidly convergent descent method for minimization. *The Computer Journal*, 6, 163-168.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. et Todini, E. (1996).** Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, 175: 293-338.
- French, M., Krajewski, W. et Cuykendall, R. (1992).** Rainfall Forecasting in Space and Time using a Neural Network, *Journal of Hydrology*, Vol.137, p. 1-31.
- Gaume. E. (2002).** Eléments d'analyse sur les crues éclaircs. Thèse de doctorat de l'ENGREF, 305 p.
- Harouna. Y. (2009).** Modélisation hydrologique hybride : réseau de neurones -modèle conceptuel P22, 182p.
- Hooke, R. et Jeeves, T.A. (1961).** Direct search solutions of numerical and statistical problems. *J. Ass. Comput. Mach.*, 8(2), 212-229.
- Hornik, K., Stinchcombe, M. et White, H. (1989).** Multilayer feedward networks are universal approximators, *Neural Networks* 2, pp. 359-366.
- Houmoura. L. (2012).** Elaboration des structures neuronales et adaptations d'un modèle conceptuel sur la base des mesures historiques pour le transfert pluie-débit à l'échelle annuelle et mensuelle pour des bassins jaugés de l'Algérie P31
- Villeneuve. J. P, Hubert. P, Mailhot. A et Rousseau. A. N. (1998).** La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau, Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) 22p.
- Johannet, A. (2006).** Les réseaux de neurones formels"". Cours, Travaux dirigés et travaux pratiques. Ecole des Mines d'Alès, Alès, France 54.
- Kadous. D. (2012).** Utilisation des réseaux de neurones comme outil du datamining : Génération de modèles comportementale d'un processus a partir de données. 108P
- Khentouche. A. (2004).** Contribution à l'échelle quantitative et qualitative dans le bassin versant de oued Nafla (W de BATNA) Thèse magister. PP55-70.

- Koffi. Y. B. (2007).** Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire, Université de Cocody Abidjan – Doctorat.
- Koffi Y, Ayrat P, Kouassi A, Johannet A, et Biemi J. (2011).** Modélisation des débits des rivières en région tropicale humide : application des réseaux de neurones et du modèle GR2M au Bandama Blanc (COTE D'IVOIRE). Rev. Ivoir. Sci. Technol., 17, 151-171
- Laribi. G. (2013).** Étude de fonctionnement hydrologique d'un bassin versant et de son influence sur le régime des eaux. Cas du bassin versant de Oued Allala.
- Legates, X. et MCCABE, J. (1999).** Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". Water Resources Research, Vol. 35, n°1 233-241
- Levenberg, K. (1944).** A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. Q. Appl. Math., 2, 164-168.
- Llamas, J. (1993).** Hydrologie générale - Principes d'application. Gaetan Morin editeur, Canada.
- Lohani, A. K., Goel, N. K. et Bhatia, K.K.S. (2010).** Comparative Study Of Neural Network, Fuzzy Logic And Linear Transfer Function Techniques In Daily Rainfall-Runoff Modelling Under Different Input Domains. Hydrological processes doi: 10.1002/hyp.7831.
- Maidment. D. (1992).** Hydrology. In: Applied Hydrology, D. R. Maidment (Ed.), McGraw Hill, New-York, 1412 p.
- Manuel. C.** Réseau de neurones artificiel
- Marquardt, D.W. (1963).** An algorithm for the least squares estimation of nonlinear parameters. SIAM J., 11, 431-441.
- Marsily. G. (1994).** Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie. [Tribune libre], Volume 7, numéro 3, Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE).
- Michel, C. (1989).** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.
- Minns, A. & Hall, J. (1996).** Artificial neural network as rainfall-runoff models. Hydrol. Sc. J. 41(3), 399-417.
- Nascimento, N.O. (1995).** Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat. CERGRENE/ENPC.Paris.550 p.
- Nash, J. E. et Stueliffe, J. V. (1970).** River flow forecasting through conceptual models». Part 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology, Vol. 10, 282-290.

-**Nelder, J.A. et Mead, R. (1965)**. A Simplex method for function minimisation. The Computer Journal, 7(4), 308-313.

-**O.N.M.**

-**Oudin, L. (2004)**. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat Cemagref/ ENGREF, 495p.

-**Perrin, C. (2000)**. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble L' INPG, 527p.

-**Rabah.T. (2010)**. Prévisions du comportement mécanique d'alliages biphasés par algorithmes génétiques et réseaux de neurones. Application aux systèmes WC-CO.

-**Refsgaard, J-C and Storm, B. (1995)**. MIKE SHE, In VP Singh (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resource Publications, Colorado, 809–846.

-**Remaoun, M. (2007)**. Crues et sécheresses en Algérie, Cas du Moyen Cheliff, thèse de doctorat d'Etat. USTHB. 240 p.

- **Roche .P. (1963)**, Hydrologie de surface Gauthier Villars ORSTOM, Paris, 430 p

-**Rosenbrock, H.H. (1960)**. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. The Computer Journal, 3, 175-184.

-**Sorooshian, S. et Gupta, V.K. (1985)**. The analysis of structural identifiability: Theory and applications of conceptual rainfall-runoff models. Water resources Research, 21 (4); 487-495.

-**Tarik , B. Dechemi, N. (2004)**. Daily rainfall–runoff modelling using conceptual and black box models; testing a neuro-fuzzy model». Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 49., 919-930.

-**Touzet. C. (1992)**. Les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme

-**Wenri ,H ., Xu, B. et Amy, C. H. (2004)**. Forecasting flows in Apalachicola river using neural networks". Hydrological Processes, Vol. 18 (2004), 2545-2564.

-**Werbos, P.J. (1974)**. "Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences." PhD thesis Thesis, Harvard University, Cambridge, MA, USA.

(1) : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydrologie/>

(2) : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/main.html>

(3) : <https://journals.openedition.org/bmsap/4463>

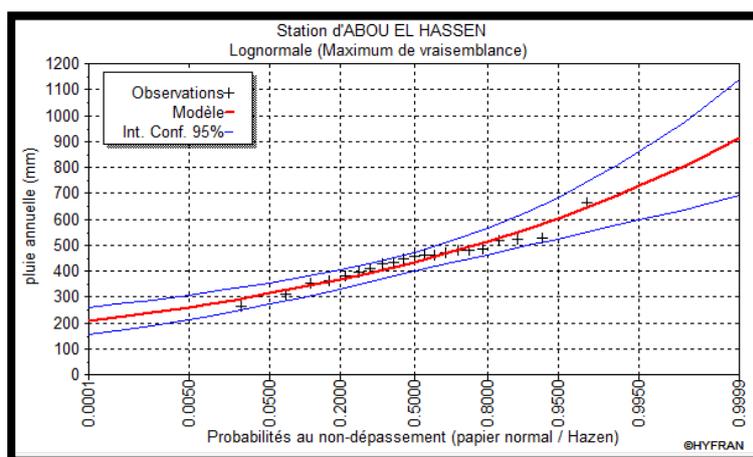
Annexes

Annexe 1

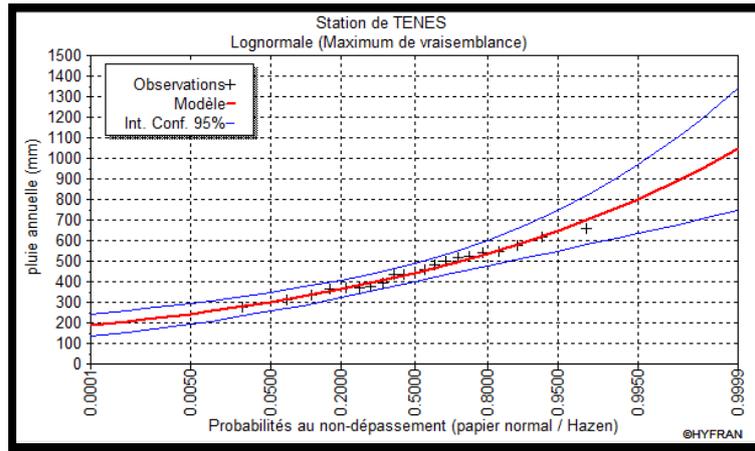
- Ajustement par le lognormal

Ajustement des données à l'aide du lognormal

Station d'ABOU EL HASSEN				
T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	692	59.1	576 - 808
50.0	0.9800	656	51.2	555 - 756
10.0	0.9000	562	33.4	497 - 627
2.0	0.5000	435	18.9	398 - 472
Station de TENES				
T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	758	74.9	611 - 905
50.0	0.9800	712	64.3	585 - 838
10.0	0.9000	595	41.0	515 - 676
2.0	0.5000	443	22.3	399 - 486



(a)



(b)

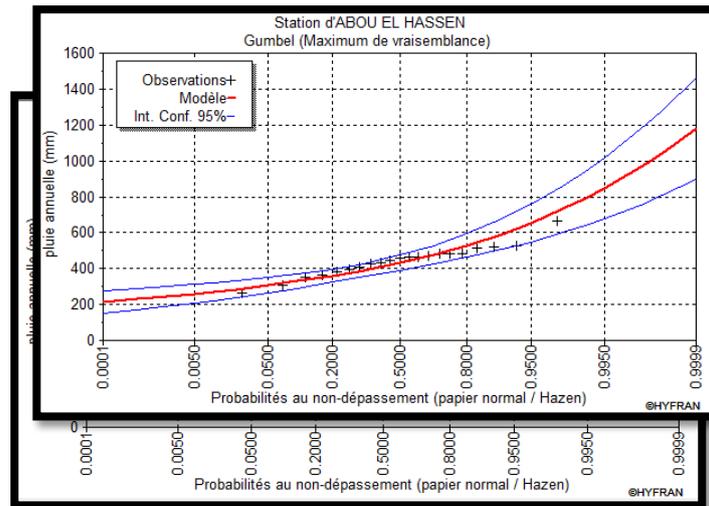
Ajustement des précipitations annuelles de (a) ABOU EL HASSN, (b) TENES

- **Ajustement par la loi de Gumbel**

Ajustement des données à l'aide de la loi de GUMBEL

Station d'ABOU EL HASSEN				
T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	790	76.8	640 - 941
50.0	0.9800	731	66.7	600 - 862
10.0	0.9000	591	43.4	506 - 676
2.0	0.5000	432	21.5	390 - 474
Station de TENES				
T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	830	84.2	665 - 995
50.0	0.9800	765	73.1	622 - 909
10.0	0.9000	612	47.6	519 - 706
2.0	0.5000	437	23.6	391 - 484

(a)



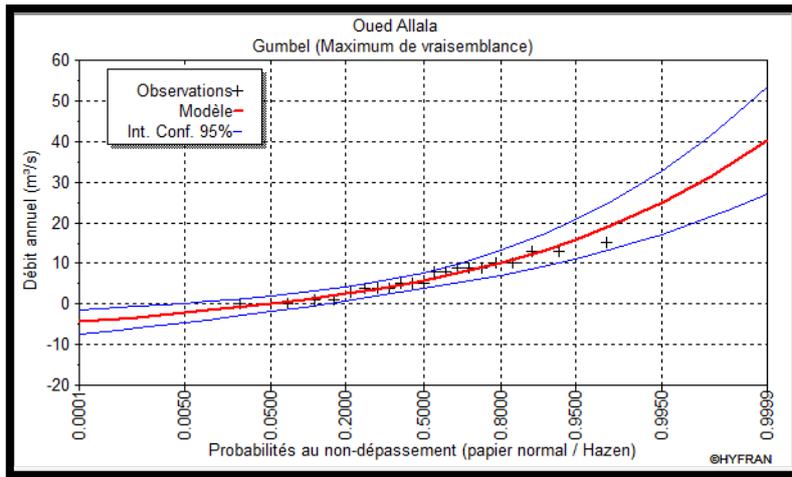
(b)

Ajustement des précipitations annuelles de (a) ABOU EL HASSN, (b) TENES

- **Ajustement par la loi de Gumbel**

Ajustement des débits à l'aide de la loi de Gumbel

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	16.7	1.88	13.0 - 20.4
50.0	0.9800	15.5	1.72	12.1 - 18.9
10.0	0.9000	12.1	1.31	9.55 - 14.7
2.0	0.5000	6.48	0.960	4.59 - 8.36

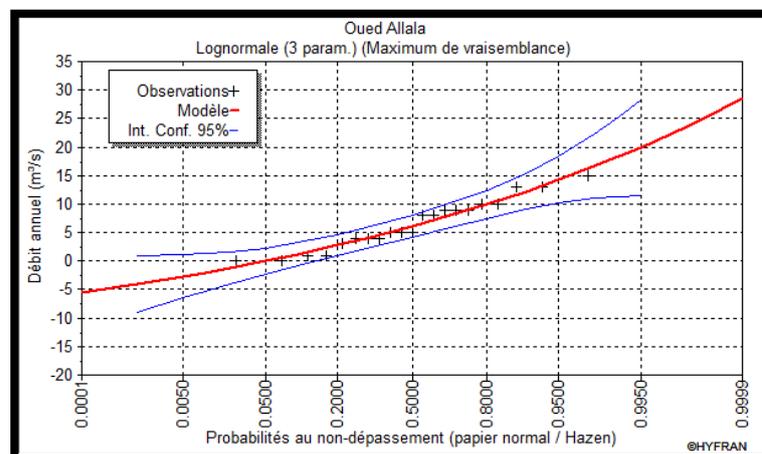


Ajustement des débits annuels de Oued Allala

- **Ajustement par la loi lognormal**

Ajustement des débits à l'aide de la loi lognormal

T	q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance
100.0	0.9900	18.4	3.56	11.4 - 25.3
50.0	0.9800	16.6	2.88	11.0 - 22.3
10.0	0.9000	12.2	1.61	9.06 - 15.4
2.0	0.5000	6.10	1.00	4.14 - 8.06

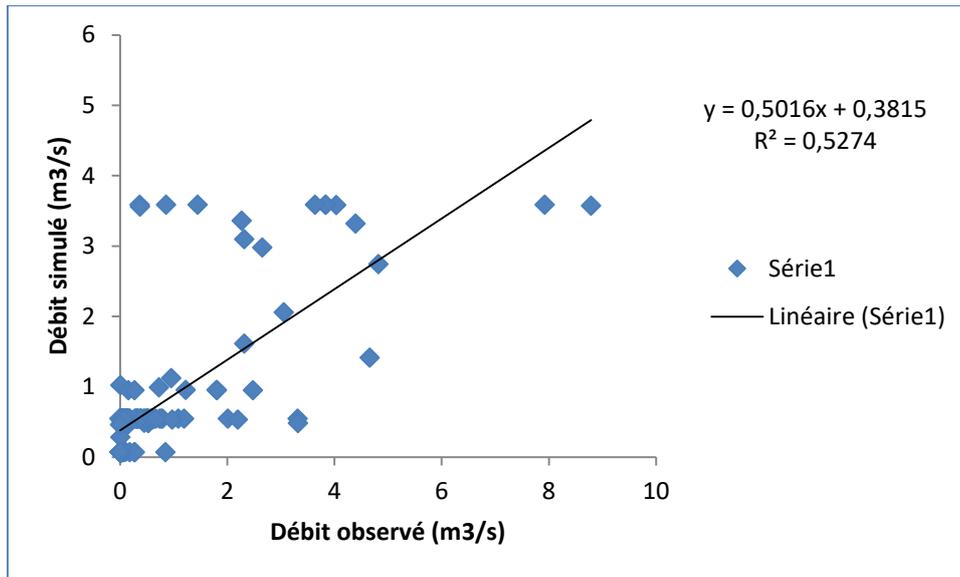


Ajustement des débits annuels de Oued Allala

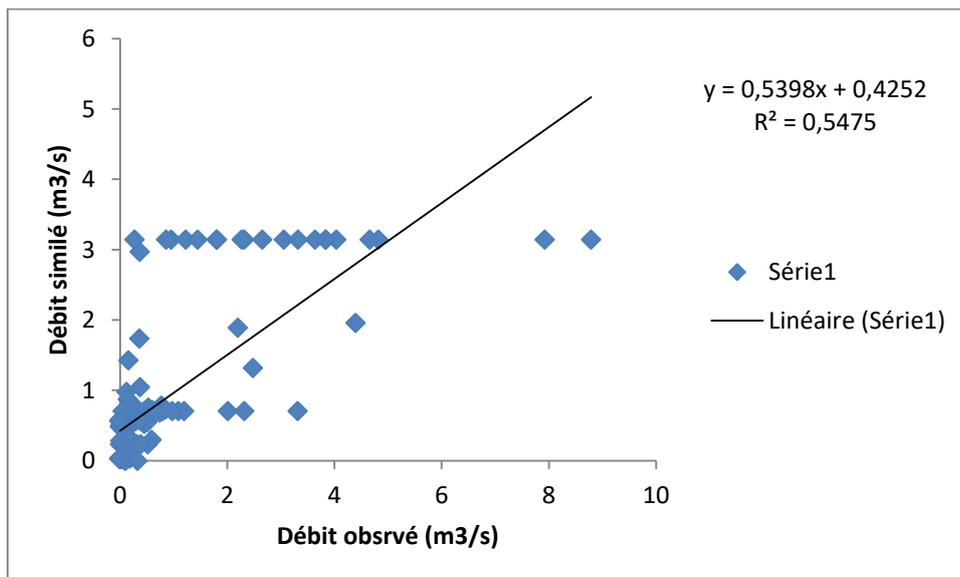
Variations des températures moyennes, maximales et minimales

Mois	Températures minimales (C°)	Températures maximales (C°)	Températures moyenne (C°)
septembre	19,6	24,9	23,04
octobre	15	26,8	19,47
novembre	10	21,7	15,61
décembre	2,5	17,9	12,03
janvier	8,3	14,8	11,77
février	7,7	22,3	11,95
mars	10	19	13,9
avril	13,7	19,5	15,89
mai	15	24	19,19
juin	11,1	30	22,43
juillet	22	32	26,9
aout	23	31,2	27,31

Annexe 2

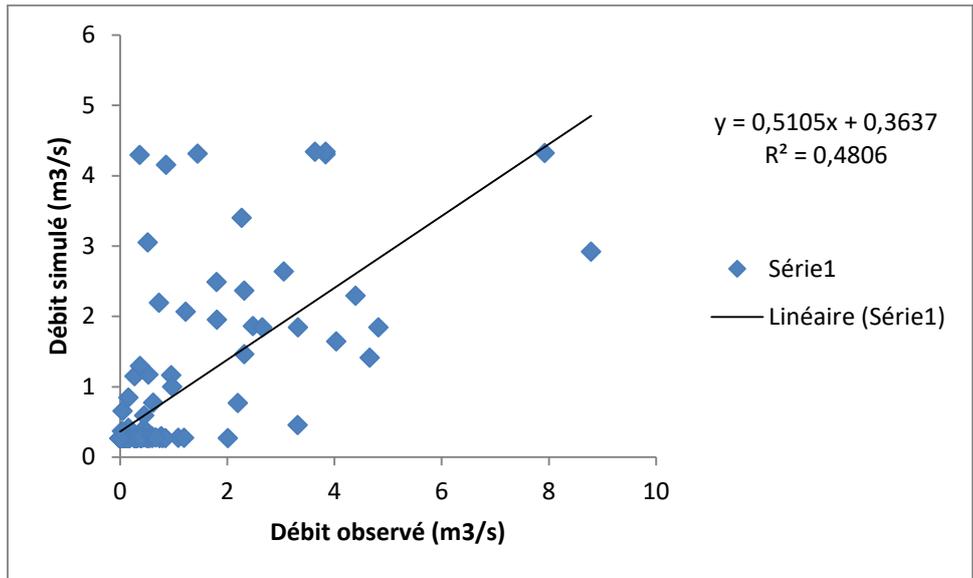


(a)

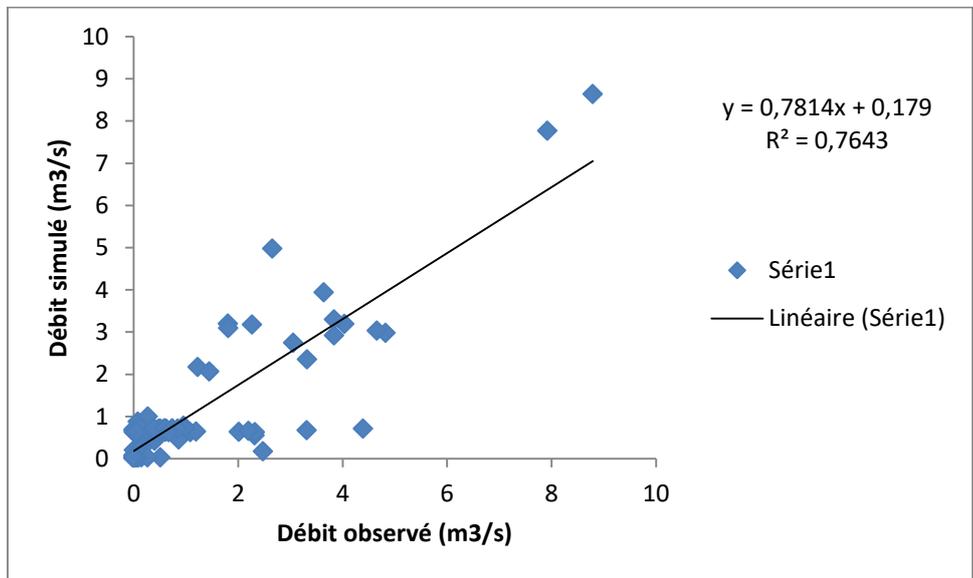


(b)

Corrélation entre Q_{sim} et Q_{obs} des deux stations (a) TENES et (b) ABOU EL HASSEN a une entrée pendant le calage

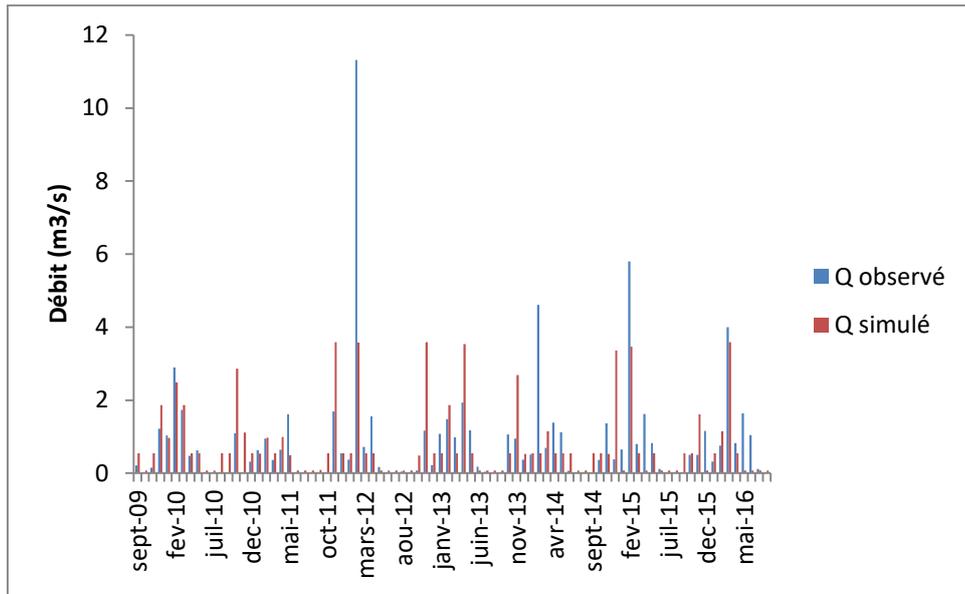


(a)

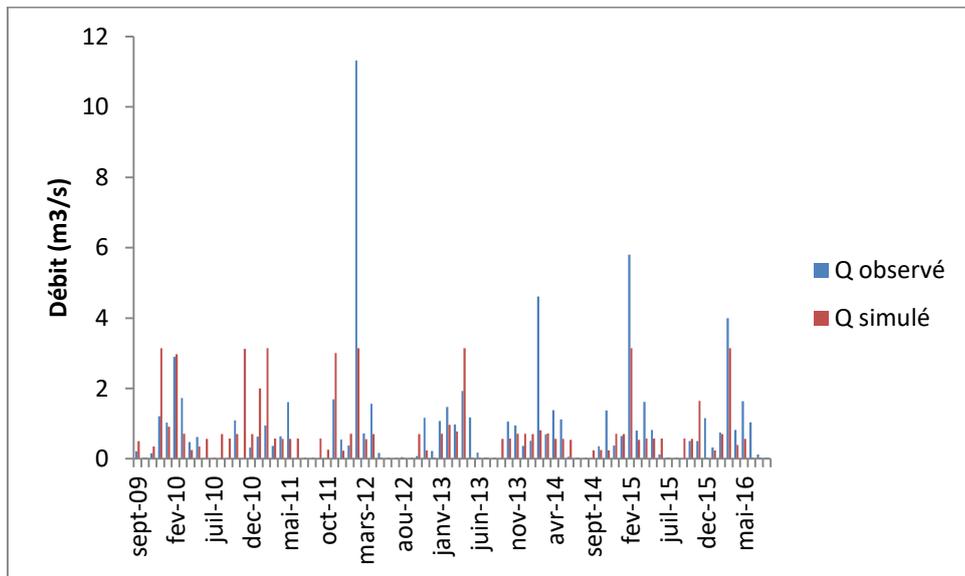


(b)

Corrélation entre Q_{sim} et Q_{obs} des deux stations (a) TENES et (b) ABOU EL HASSEN a deux entrée pendant le calage

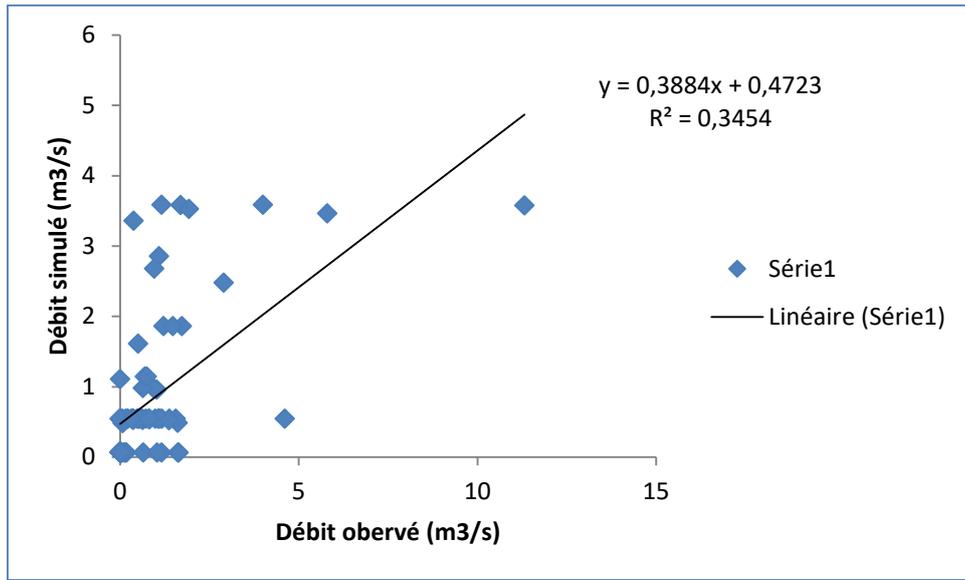


(a)

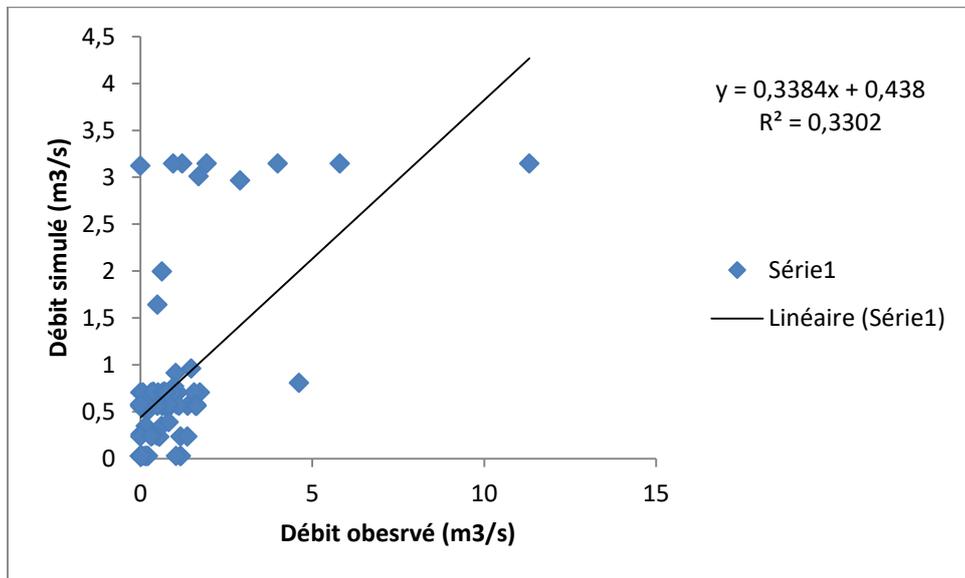


(b)

Hydrogrammes issus des simulations réalisées en phase de validation, à l'aide des modèles neuronaux à une seule entrée ; (a) station de TENES, (b) station d'ABOU EL HASSEN



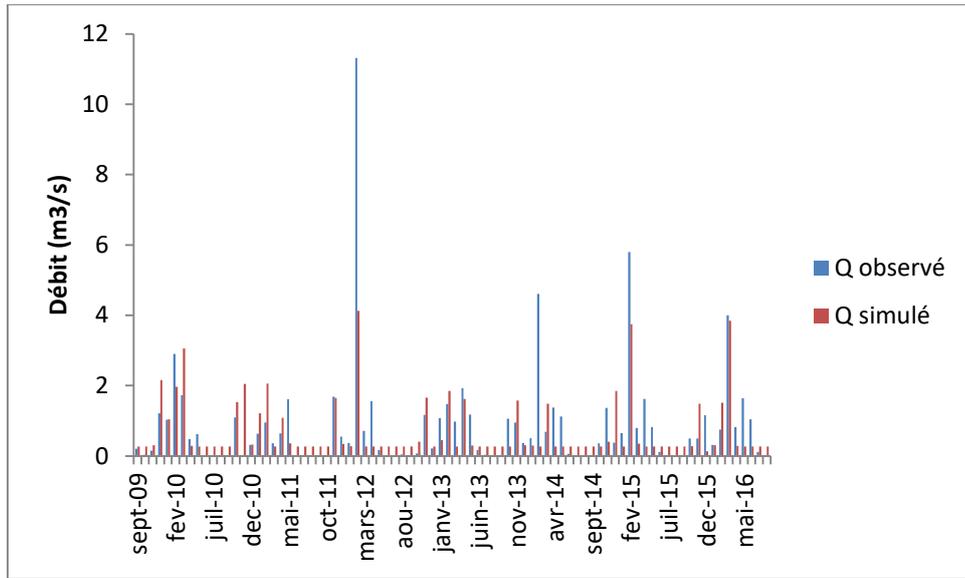
(a)



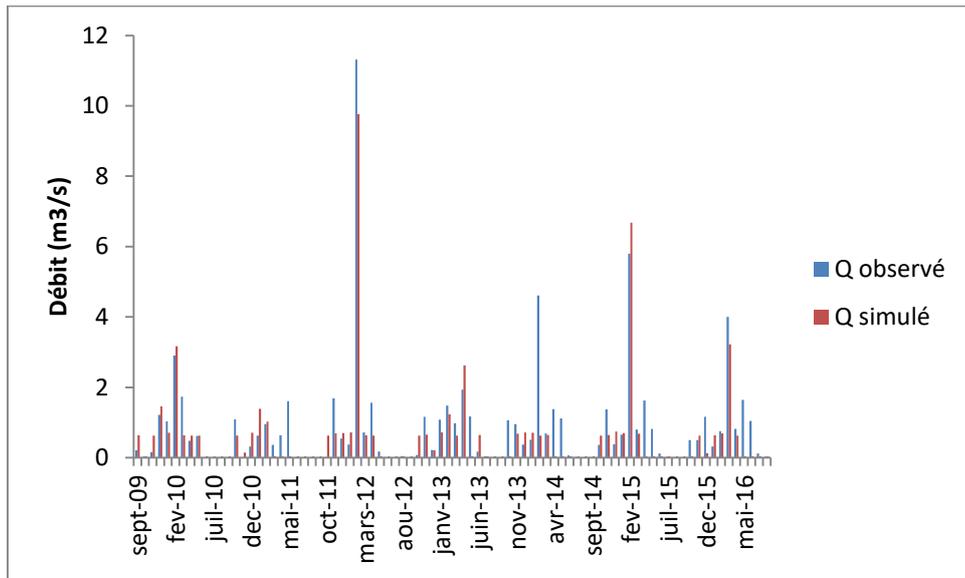
(b)

Corrélation entre Q_{sim} et Q_{obs} des deux stations (a) TENES et (b) ABOU EL HASSEN a une entrée pendant la validation

Deux entrées



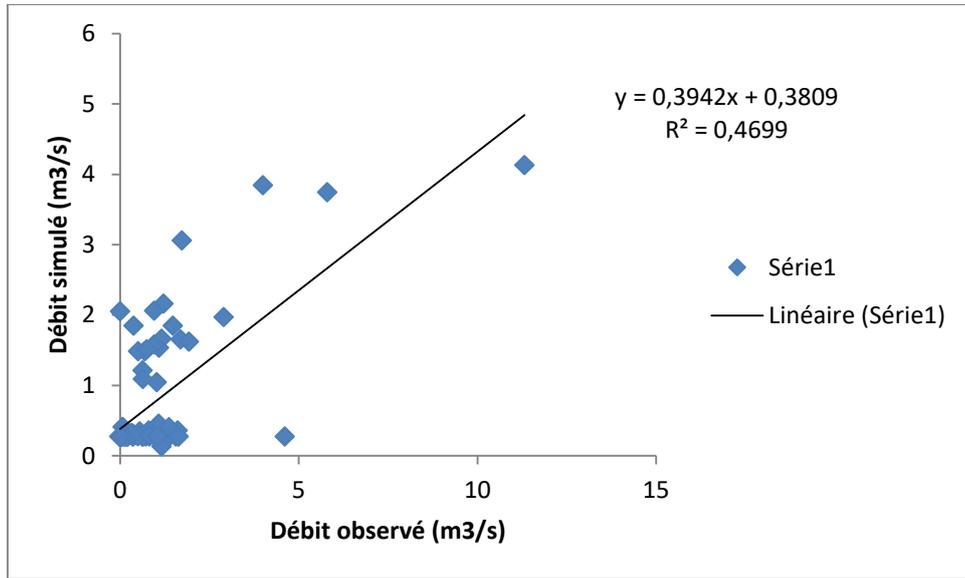
(a)



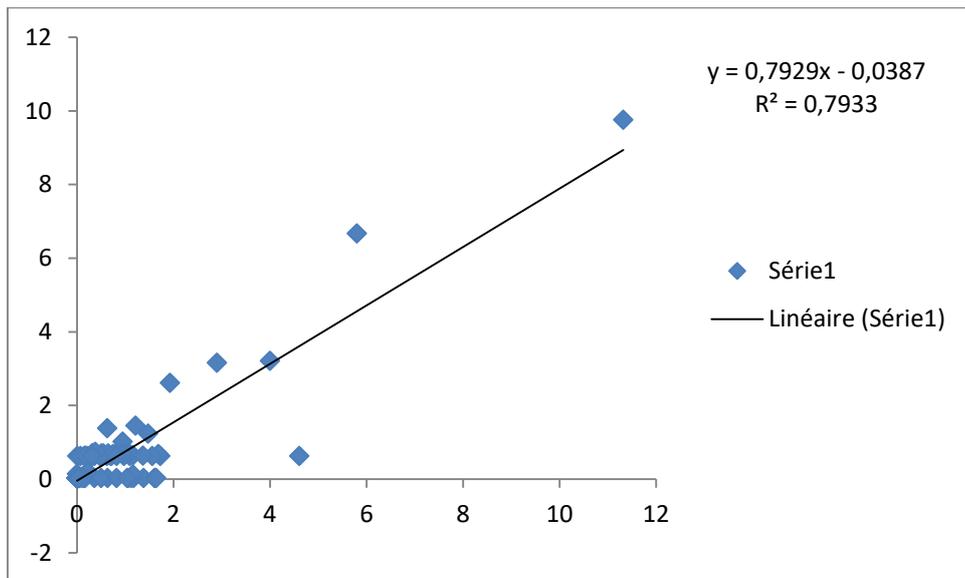
(b)

Hydrogrammes issus des simulations réalisées en phase de validation, à l'aide des modèles neuronaux à deux entrées ; (a) station de TENES, (b) station d'ABOU EL HASSEN

Critère de performance



(a)



(b)

Corrélation entre Q_{sim} et Q_{obs} des deux stations (a) TENES et (b) ABOU EL HASSEN a deux entrées pendant la validation