

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université le 08 Mai 1945 Guelma



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique urbaine

Présenté par : **HABILES HICHEM**

Modélisation pluie-débit par le modèle conceptuel
GR2M : Cas du bassin versant de l'oued Ressoul.

Sous la direction de : **Dr. BENDJEMA LINA**

JUIN 2023

REMERCIEMENTS

Avant tout, Je remercie Dieu le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier pour m'avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'adresser toute ma gratitude à mon encadrant Melle BENDJEMA.LINA Pour sa possession, ses conseils avisés, son observation, sa sollicitude, sa patience et sa gentillesse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury et pour leur participation à l'évaluation de ce travail.

Enfin merci de tout mon cœur à mes chers parents et mon frère et mes sœurs, et à mes collègues et mes amies pour m'avoir toujours réconforté et encouragé dans les moments difficiles.

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Ma très chère mère qui na 'jamais cessé de m'encourager
tous le long de mon parcours et qui s'est toujours sacrifiée
pour faire de moi ce que je suis que dieu la protège.

Mon père qui m'a toujours mené le sentiment de la fierté et
n'a jamais hésité de me supporter moralement.

A Mon frère : MOUHAMED CHERIF

A mes sœurs : HIND & LAMIS

A toute la famille « HABLES »

A tous mes amis sans exception

Tous les étudiants de M2 Hydraulique Urbaine

RESUME

L'étude des relations entre les précipitations et le débit dans les vallées revêt une importance particulière dans de nombreuses applications pratiques de la gestion des ressources en eau. Dans le cadre de notre recherche visant à améliorer la connaissance et la compréhension de l'hydrologie du bassin versant de l'Oued Ressoul, situé dans le nord-est de l'Algérie et faisant partie du vaste bassin versant de la Seybouse. Plus précisément, nous avons utilisé le modèle de retenue ou le modèle de génie rural GR2M. Cette étude a été menée sur le bassin de l'Oued Ressoul.

Pour commencer, nous avons fourni un aperçu de la modélisation hydrologique pluie-débit, puis nous avons présenté notre zone d'étude, le bassin versant de l'Oued Ressoul, en caractérisant certains facteurs physiques, géologiques et climatiques qui influencent l'écoulement. Par la suite, nous avons réalisé une étude hydrologique en utilisant des données hydrométriques couvrant une période de 37 ans.

Les calculs ont été effectués sur une base mensuelle avec le modèle GR2M, en incluant le facteur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) en plus des données de précipitation et de débit. Pour analyser la variabilité annuelle des précipitations de la station d'Annaba, nous avons utilisé l'indice pluviométrique standardisé (SPI). Après avoir ajusté le modèle obtenu et validé ces résultats. Les résultats ont été satisfaisants avec les données de précipitation à l'échelle mensuelle. En effet, le modèle GR2M prend en compte la succession chronologique des phénomènes d'une part, ainsi que l'influence des paramètres climatiques et physico-hydrogéologiques du bassin versant et des échanges externes d'autre part.

Mots clés : hydrologie, bassin versant, Oued Ressoul, modèle, pluie-débit, GR2M

الملخص

دراسة العلاقات بين الهطولات وسريان المياه في الوديان تكتسب أهمية خاصة في العديد من التطبيقات العملية لإدارة موارد المياه. في إطار بحثنا الهادف إلى تحسين المعرفة والفهم في علم الهيدرولوجيا لحوض وادي الرسول، الواقع في شمال شرق الجزائر وجزء من حوض مجرى سيبوس الواسع. بالتحديد، استخدمنا نموذج التجميع أو نموذج الهندسة الريفية. تم إجراء هذه الدراسة على حوض وادي الرسول.

للبدء، قدمنا نظرة عامة على نمذجة الهيدرولوجيا للهطول-السريان، ثم قدمنا منطقتنا الدراسية، حوض وادي الرسول، وقمنا بتوصيف بعض العوامل الفيزيائية والجيولوجية والمناخية التي تؤثر في السريان. بعد ذلك، أجرينا دراسة هيدرولوجية باستخدام بيانات قياس المياه لمدة 37 عامًا.

تمت الحسابات على أساس شهري باستخدام النموذج، مع إدراج عامل التبخر المحتمل بالإضافة إلى بيانات الهطول والسريان. لتحليل التباين السنوي لهطول محطة عنابة، استخدمنا المؤشر المطري الموحد. بعد ضبط النموذج وتحقيق النتائج، كانت النتائج مرضية بالنسبة لبيانات الهطول على مقياس شهري. فعلا، يأخذ النموذج بعين الاعتبار تتابع الظواهر الزمنية من جهة، وتأثير المعاملات المناخية والفيزيكو-هيدرولوجية لحوض المجرى والتبادلات الخارجية من جهة أخرى.

الكلمات المفتاحية: الهيدرولوجيا، مستجمعات المياه، وادي الرسول، تدفق الأمطار، نموذج GR2M

ABSTRACT

The study of the relationships between precipitation and stream flow in valleys is of particular importance in many practical applications of water resource management. In our research aimed at improving the knowledge and understanding of the hydrology of the Oued Ressoul watershed, located in northeastern Algeria and part of the extensive Seybouse watershed, we used the rainfall-runoff model. Specifically, we employed the GR2M retention model or rural engineering model. This study was conducted on the Oued Ressoul watershed.

To begin, we provided an overview of the rainfall-runoff hydrological modeling, and then we introduced our study area, the Oued Ressoul watershed, by characterizing certain physical, geological, and climatic factors that influence the flow. Subsequently, we conducted a hydrological study using hydrometric data spanning a 37-year period.

The calculations were performed on a monthly basis using the GR2M model, incorporating the potential evapotranspiration (ETP) factor in addition to precipitation and streamflow data. To analyze the annual variability of precipitation at the Annaba station, we utilized the Standardized Precipitation Index (SPI). After adjusting the obtained model and validating the results, they proved satisfactory with the monthly precipitation data. The GR2M model takes into account both the chronological sequence of phenomena and the influence of climatic and physico-hydrogeological parameters of the watershed, as well as external exchanges.

Note: Please keep in mind that this translation may not be perfect, and some technical terms may vary depending on the specific context.

Keywords: hydrology, watershed, Oued Ressoul, model, rainfall-flow, GR2M.

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1	Schématisation de simulation entre la réalité et la modélisation	4
Figure. I.2	Les différentes applications de la modélisation pluie-débit	5
Figure. I.3	Composants d'un modèle	6
Figure. I.4	Classification des modèles proposée	6
Figure I.5	Les différentes approches de modélisation	8
Figure I.6	Schéma de la structure du modèle GR2M.	12
Figure I.7	Schéma de la structure du modèle GR4J	16
Figure. II.1	Vue en plan du raccordement d'oued Ressoul avec l'Oued de la Seybouse.	20
Figure. II.2	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul.	25
Figure. II.4	Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul	26
Figure. II.5	Interprétation de l'histogramme d'altitude et de courbe hypsométrique pour différent type de relief.	27
Figure. II.6	Carte des pentes du bassin versant de l'oued Ressoul.	30
Figure. II.7	Ordre d'écoulement selon la classification de STRAHLER	32
Figure III.1	présentation des stations hydrométriques et pluviométriques du bassin versant D'oued Ressoul.	39
Figure III.2	La variation interannuelle temporelle des précipitations annuelles aux stations de Nechmaya et Ain El Barda (1972/73 - 2008/09),	40
Figure III.3	Variations des précipitations moyennes annuelles (1972/73 – 2008/09).	41
Figure III.4	Variations des précipitations mensuelles moyennes mensuelles des deux stations d'Ain El Berda et de Nechmaya (1972/73 – 2008/09).	42
Figure III.5	Variation des précipitations moyennes mensuelles, 1972/73- 2008/09	43
Figure III.6	Variation interannuelle des températures moyennes 1972/73-2008/09	43
Figure III.7	Variation des Températures moyennes maximales et minimales mensuelles de la station d'Annaba (1972/73 - 2008/09)	44
Figure III.8	évolution de SPI au cours de la période d'étude 1972/73-2008/09	46
Figure III.9	Variation interannuelle de l'ETP (Thornthwaite) de la station d'Annaba (1972/73 -2008/09).	48
Figure III.10	Variations interannuelles des lames d'eau écoulées (1972/73-2008/09).	50
Figure III.11	Représentation graphique des coefficients d'hydraulicité mensuels (1972/73-2008/09).	52
Figure IV.1	Résultats du calage du modèle GR2M (1972/1973 – 1996/1997)	57
Figure IV.2	les résultats de Validation du modèle GR2M (09/1997-08/2009).	58
Figure IV.3	Résultats du calage du modèle GR2M (09/1977-08/1983)	60
Figure IV.4:	Résultats de la validation du modèle GR2M (09/1973-08/1976)	61
Figure IV.5	Résultats du calage du modèle GR2M (09/1973-08/1979)	63
Figure IV.6	Résultats de la validation du modèle GR2M (09/1980-08/1983)	64

LISTE DES FIGURES

Figure IV.7	Résultats du calage du modèle GR2M (09/1991-08/1994)	65
Figure IV.8	Résultats de la validation du modèle GR2M (09/1995-08/1996)	66

LISTE DES TABLEAUX

Tab II.1	Récapitulatif de quelques modèles hydrologiques	10
Tab I.2	Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants	14
Tab I.3	Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants.	16
Tab II.1	Les résultats de calcul de rectangle équivalent	23
Tab II.2	Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Ressoul.	24
Tab II.3	Détermination de l'indice de pente de ROCHE I_{PR} (%)	28
Tab II.4	Classification du relief selon I_g par O.R.S.T.O.M	30
Tab II.5	Indices de forme de bassins versant étudié	31
Tab II.6	Classification des reliefs selon D_s d'après ORSTOM.	32
Tab II.7	Nombre et longueurs des Talwegs.	33
Tab II.8	Coefficient de torrencialité pour chaque fréquence de Talweg.	34
Tab II.9	Tableau récapitulatif des résultats du temps de concentration.	35
Tab II.10	Récapitulation des paramètres hydrographiques du bassin versant.	36
Tab II.11	Synthétise les principales caractéristiques de bassin versant de l'oued Ressoul.	37
Tab III.1	Caractéristiques des stations de mesure de Nechmaya et Ain El Barda (1972/73-2008/09).	39
Tab III.2	Précipitation moyenne mensuelle de station Ain barda et Nechmaya (1972/73 - 2008/09)	42
Tab III.3	Valeurs des températures moyennes, maximales et minimales mensuelles (1972/73-2008/09).	44
Tab III.4	Classification de la sécheresse selon le SPI	45
Tab III.5	Fréquence des classes de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)	46
Tab III.6	Evapotranspiration potentielle non corrigée en fonction de la température moyenne.	47
Tab III.7	Variation des facteurs de corrections 'K' aux stations météorologiques d'Annaba.	48
Tab III.8	Variation interannuelle des débits (1972/73-2008/09)	49
Tab III.9	Variation mensuelle de débits et de coefficients d'hydraulicité (1972/73-2008/09)	51
Tab IV.1	Résultats du calage de GR2M (1972/1973 – 1996/1997).	55
Tab IV.2	Résultats de validation du modèle GR2M (1997/98 – 2008/09)	57
Tab IV.3	Résultats du calage de GR2M (09/1977-08/1983).	59
Tab IV.4:	Résultats de validation du modèle GR2M (09/1973-08/1976)	61
Tab IV.5	Résultats du calage du modèle GR2M (09/1973-08/1979)	62
Tab IV.6	Résultats de validation du modèle GR2M (09/1979-08/1983)	63
Tab IV.7	Résultats du calage de GR2M (09/1990-08/1994)	64
Tab IV.8	Résultats de validation du modèle GR2M (09/1995-08/1996)	65

LISTE DES ABREVIATIONS

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

CEMAGREF : Centre d'Etude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts.

Ct : Coefficient de torrentialité.

Cv : Coefficient de variation

Dd : Densité de drainage.

ETP : Evapotranspiration Potentielle

GR : Génie Rural

GR1A : Modèle du Génie Rural Annuel à un paramètre.

GR2M : Modèle du Génie Rural mensuel à 2 paramètres.

GR4J : Modèle du Génie Rural mensuel à 4 paramètres.

Ip : Indice de pente.

l : Largeur

L : Longueur.

ONM : Office National de Météorologie.

P : Périmètre.

P : Précipitations

Q : Débit en m³/s

R : Ruissellement (mm).

R² : Coefficient de détermination.

S : Surface

T : Température

Tc : Temps de concentration.

SPI : Indice Pluviométrique Standardisé

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT		I
DEDICACE		II
RESUME		III
المخلص		IV
ABSTRACT		V
LISTE DES FIGURES		VI
LISTE DES TABLEAUX		VIII
LISTE DES ABREVIATIONS		X
TABLE DES MATIERES		XI
INTRODUCTION GENERALE		1
<i>CHAPITRE I : État De L'art De La Modélisation Hydrologique</i>		
I.1.	Introduction	3
I.2.	Objectif de la modélisation	3
1.3.	Définition d'un modèle	4
I.4	Intérêts d'un modèle pluie-débit	4
I.5	Typologie de modèles hydrologiques	5
I.5.1	Selon le degré d'abstraction	7
I.5.1.1	Modèles physiques	7
I.5.1.2	Modèles mathématiques	7
I.5.2	Selon la nature des variables	7
I.5.2.1	Modèles déterministes	7
I.5.2.2	Modèles stochastiques (probabilistes)	7
I.5.3	Selon la discrétisation spatiale	7
I.5.3.1	Modèles globaux	7
I.5.3.2	Modèles spatialisés (distribués)	7
I.5.4	Selon la description des sous processus	7
I.5.4.1	Modèles conceptuels	8
I.5.4.2	Modèles empiriques	8
I.6	Classification basée sur la représentation des processus hydrologiques	8
I.6.1	La modélisation de type boîte noire	8
I.6.2	Un modèle hydrologique à base physique	9
I.6.2	Un modèle à réservoir	9
I.7	Choix du modèle	9

TABLE DES MATIERES

I.8	Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)	10
I.8.1.	Description du modèle pluie-débit annuel GR1A	11
I.8.2.	Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M	11
I.8.2.1.	Description mathématique	12
I.8.2.2.	Production	12
I.8.2.3.	Percolation	13
I.8.2.4.	Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique	13
I.8.2.5.	Paramètres	14
I.8.2.6	Applications des modèles	14
I.9.	Description du modèle pluie-débit journalier GR4J	15
I.10.	Le calage et validation d'un modèle	17
I.11.	Critères de qualité	17
I.11.1.	Le coefficient de détermination (R^2)	17
I.11.2.	Le critère de Nash	17
I.11.3.	Changement (ou variabilité) climatique	18
I.13.	Conclusion:	18
<i>CHAPITRE II : Présentation Générale De La Zone D'étude</i>		
II.1.	Introduction	20
II.2.	Situation géographique	20
II.3.	Caractéristiques morphologiques	21
II.3.1.	Caractéristiques géométriques	21
II.3.2.	Caractéristiques de forme	22
II.3.2.1.	Indice de compacité de GRAVELIUS (K_c)	22
II.3.2.2.	Notion du Rectangle Equivalent	22
a.	La longueur du rectangle équivalent	22
b.	Largeur du rectangle équivalent	23
II.4.	Description du milieu physique	23
II.4.1.	Courbes hypsométriques	23
II.4.1.1.	Présentation de logiciel ArcGIS	23
II.4.2.	Altitudes caractéristiques	25
a.	Altitude minimale (H_{min})	25
b.	Altitude à 95% de surface (H95)	25
c.	Altitude médiane (H50)	25
d.	Altitude à 5% de surface (H5)	25

TABLE DES MATIERES

e.	Altitude maximale (H_{max})	25
f.	Altitude moyenne (H_{moy})	26
II.4.3.	Intégrale hypsométrique	27
II.4.4.	Analyse spatiale des pentes	28
a.	Indice de pente de ROCHE I_{PR}	28
b.	Indice de pente global (I_g)	29
c.	Classification des pentes du bassin versant de l'oued Ressoul	30
II.4.5.	La dénivelée (D)	31
II.4.6.	Dénivelée spécifique (D_s)	31
II.5.	Caractéristiques hydrographiques	32
II.5.1.	Classification des cours d'eau (Talwegs)	33
II.5.2.	Densité de drainage (D_d)	33
II.5.3.	Fréquence des cours d'eau (F_c)	33
II.5.4.	Coefficient de torrentialité C_t	34
II.5.5.	Temps de concentration T_c	35
II.5.6.	Vitesse d'écoulement (V)	36
II.6.	Géologie du site	36
II.7.	Synthèse des caractéristiques du bassin versant de l'oued Ressoul	37
<i>CHAPITRE III : Hydroclimatologie</i>		
III.1.	Introduction	38
III.2.	Présentation des données	38
III.3.	Etude des précipitations	40
III.3.1.	Variation interannuelle des précipitations	40
III.3.2.	Variation moyennes mensuelles des précipitations	41
III .3.3.	Etude des Températures	43
III .3.3.1.	Variation interannuelle des températures	43
III .3.3.2.	Variations mensuelles des températures	44
III .4.	Caractéristique du régime pluviométrique	45
III.5.	Etude des Evapotranspirations (méthode Thorntwaite)	46
III.6.	Etude hydrologique	49
III.6.1	Variation interannuelle de l'écoulement	49
III .7.	Variation mensuelle de l'écoulement	51
III.8.	Ruissellement (R)	52
III.9.	Conclusion	53

TABLE DES MATIERES

<i>CHAPITRE IV : Modélisation Pluie-Débit De L'oued Ressoul</i>		
IV.1.	Introduction	54
IV.2.	Modélisation de la relation Pluie –Débit par l'utilisation du modèle GR2M	54
IV.2.1	Calage et validation de la période totale:	55
❖	Interprétations des résultats du calage et validation	59
IV. 2. 2.	Calage et validation du période sèche	59
❖	Interprétations des résultats du calage et validation de la période sèche	62
IV. 2. 3.	Calage et validation du période humide	64
❖	Interprétations des résultats du calage et validation de la période humide	65
IV.3.	Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE		66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		67

INTRODUCTION GENERALE

De par sa rareté, l'eau en Algérie, comme dans la plupart des pays du monde, est un facteur limitant du développement et source de tensions sociales. La rareté est appréhendée en termes de stress hydrique et d'irrégularité de la ressource, deux facteurs susceptibles de s'accroître avec le changement climatique.

Face au défi d'assurer la couverture des besoins sans cesse croissants en eau (villes, industries, agriculture), une politique active de mobilisation des ressources eau a été mise en œuvre, ainsi que de nouveaux instruments de gestion. Dans ce contexte, on comprend alors aisément la nécessité de mettre au point des outils d'aide à la gestion et à la décision qui permettent de mieux cerner le fonctionnement des hydro-systèmes naturels et le devenir de l'eau dans son environnement. L'utilisateur de ces instruments peut bénéficier ainsi d'une meilleure connaissance de la répartition spatiale et temporelle des flux d'eau et des matières et composés qu'elle véhicule à l'échelle du bassin.

En hydrologie, une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique est indispensable. Donc les concepts hydrologiques sont exprimés en langage mathématique pour représenter le comportement correspondant observé dans la nature. Pour l'utilisateur, l'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse "satisfaisante" aux questions qu'il se pose à propos de l'objet modélisé.

De nos jours il existe différents types de modèles : du modèle physique au modèle empirique, du distribué au global, et chaque type exprime une façon de concevoir le cycle hydrologique (Mouelhi, 2003). Une classification peut être faite sur quelques clefs de différenciation d'après des critères énoncés par Clarke (1973) & Ambroise (1998). L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit a commencé dans les années soixante. (Nascimento, 1995).

Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil « simple » permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc...).

Pour ce faire, nous allons appliquer le modèle du Génie rural (GR2M) sur le bassin versant l'Oued Ressoul (Nord-Est Algérien). L'objectif est de trouver les paramètres optimaux de ce modèle qui permettent une meilleure simulation afin d'apprécier les débits simulés pour la prévision et ou la prédétermination.

INTRODUCTION GENERALE

Cette recherche est structurée en quatre chapitres :

1. Le premier chapitre offre un aperçu de la modélisation hydrologique pluie-débit, des différents modèles hydrologiques utilisés dans ce domaine, ainsi qu'une description du modèle Génie RuralGR2M.
2. Le deuxième chapitre présente le site d'étude, en fournissant un aperçu hydrographique, topographique, géologique et morphologique du bassin versant.
3. Le troisième chapitre est consacré à la détermination des paramètres hydrologiques et climatiques.
4. Le quatrième chapitre présente la modélisation pluie-débit en appliquant le modèle GR2M aux données du bassin de l'Oued Ressoul.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion qui récapitule les principaux résultats obtenus dans cette étude et propose quelques perspectives pour de futures recherches.

CHAPITRE I : État De L'art De La Modélisation Hydrologique

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

I.1 Introduction

La modélisation hydrologique est une activité en Hydrologie. Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit a commencé dans les années soixante. (Nascimento, 1995). Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil (simple) permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts,...)

I.2 Objectif de la modélisation

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

- Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques ;
- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage : on désire savoir avec quelle fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (en deçà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée. On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau ;
- Prévision des crues et des étiages : il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin ;
- Influence d'aménagements sur l'hydrologie : on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux.

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés.

Si d'autres approches hydrologiques que la modélisation pluie-débit propose des réponses à certaines de ces problématiques (analyse fréquentielle statistique sur les débits pour la prédétermination), cette dernière paraît cependant très profitable pour des questions supposant un traitement temporel continu, comme la prévision des débits.

Dans ce cas, le fait de remonter à l'origine des débits (la pluie) permet en plus de profiter d'un délai supplémentaire par rapport à des méthodes n'exploitant que l'information sur les débits.

I.3 Définition d'un modèle

Il semble important, avant de rentrer dans l'étude de façon approfondie, de définir ce qu'est un modèle afin d'expliquer les choix de l'outil de modélisation utilisé dans notre étude.

Un modèle permet donc d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes (fig.I.1). Le plus souvent basé sur la représentation mathématique ou physique des processus, il intègre les différentes phases du cycle de l'eau, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité. (SANA et FERAHI, 2017)

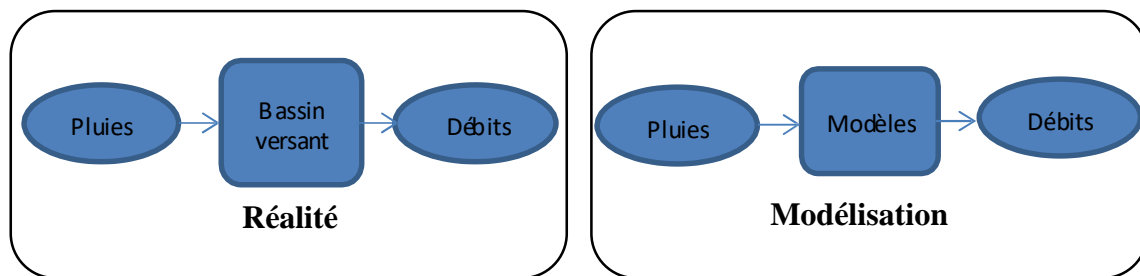


Figure I.1 : Schématisation de simulation entre la réalité et la modélisation (SANA et FERAHI, 2017)

Le modèle hydrologique parfait, pouvant s'appliquer à toutes les échelles de temps et d'espace, n'existe pas, mais les efforts accomplis dans l'amélioration et le perfectionnement des outils de modélisation permettent aujourd'hui, de mieux cerner les différentes phases du cycle hydrologique et ainsi de mieux les modéliser.

I.4 Intérêts d'un modèle pluie-débit

Selon (Radia, 2012)

- Les débits sont parfois inexistantes ou connus sur une durée trop faible.
- Les pluies sont plus faciles à observer et à modéliser.
- Le délai de prévision est augmenté si l'on remonte aux pluies.
- Avec les débits seuls, on ne peut pas faire la différence entre variation climatique et évolution du bassin. Les différentes applications de la modélisation pluie-débit:

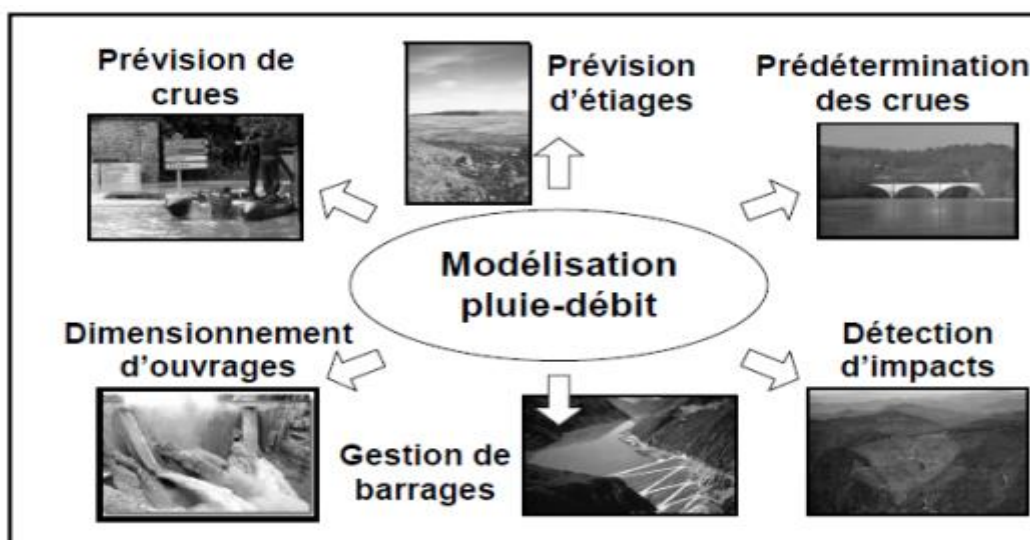


Figure I.2 : Les différentes applications de la modélisation pluie-débit (Perrin, 2000).

I.5 Typologie de modèles hydrologiques

L'ambiguïté des interactions entre les différents éléments du bilan hydrologique et la complexité des systèmes étudiés ont permis l'émergence d'un nombre indénombrable de modèles " il y a presque d'autant de modèles que d'hydrologues", on ne trouve pas dans la littérature des catégories de modèles nettement distincts" (Ambroise, 1998).

Beaucoup d'auteurs ont abordé le sujet de la classification des modèles. Rappelons à titre d'exemple les références suivantes : Singh (1995), Singh et Woolhiser (2002), Clarke (1973), Beven (1989), ASCE (1996), Wurbs (1998), Ambroise (1998) pour ne citer qu'eux.

D'après Refsgaard (1997), les modèles hydrologiques peuvent être classés selon la description des processus physiques en tant que conceptuels ou physiques et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en tant que globaux ou distribués.

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Selon Singh, 1995 (Figure I.3) un modèle est caractérisé par 5 éléments constitutifs : la géométrie du système (bassin versant), les entrées dans le système, les lois de formalisations des processus, l'état initial et les conditions aux limites du système et enfin les sorties.

Singh (1995) a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations. Selon la description des processus, on peut avoir plusieurs niveaux de classifications : modèle global ou distribué (Figure I.4) déterministe ou stochastique. La méthode de résolution employée peut également différencier les modèles en empirique ou conceptuel.

Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent dans la (Figure I.5)

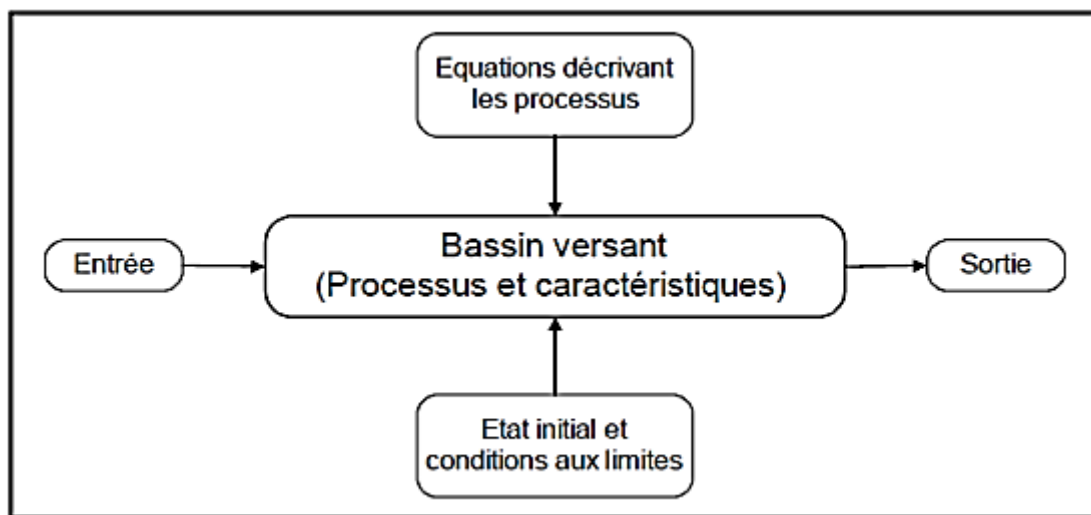


Figure I.3 : Composants d'un modèle (d'après Singh, 1995)

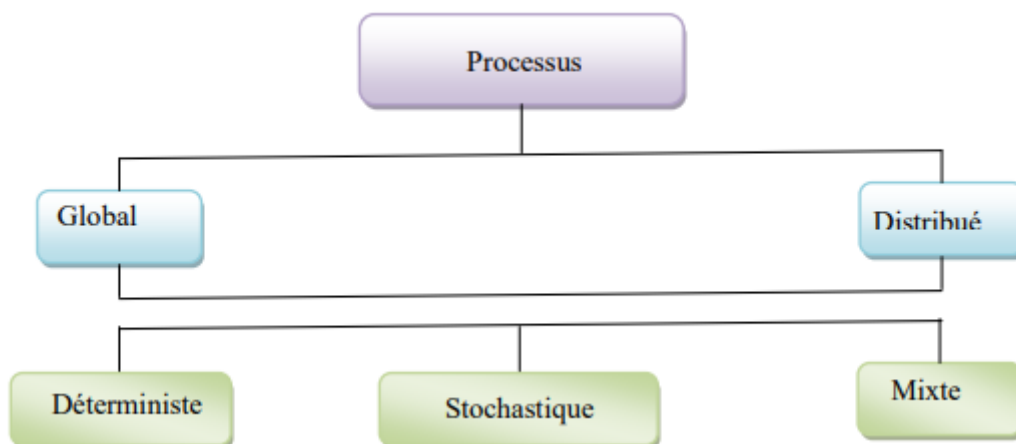


Figure I.4 : Classification des modèles proposée par (Singh, 1995).

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

I.5.1 Selon le degré d'abstraction

I.5.1.1 Modèles physiques : Dont les équations ont été déduites à partir des principes de base de la physique (conservation de masse, quantité de mouvement, quantité d'énergie, ...), et dont la forme finale simplifiée contient des paramètres qui ont un sens physique. Ils représentent le système à une échelle réduite. Il existe plusieurs modèles à bases physiques comme le modèle KINEROS, LISEM, ABC,...

I.5.1.2 Modèles mathématiques : Ils décrivent le processus hydrologique à l'aide des équations mathématiques qui relient les variables d'entrée et de sortie.

I.5.2 Selon la nature des variables

I.5.2.1 Modèles déterministes : Dans lesquels la relation entre variables d'entrée et de sortie est phénoménologique et ne considère pas le caractère aléatoire de variable, la même entrée produit toujours la même sortie.

I.5.2.2 Modèles stochastiques (probabilistes) : Le terme stochastique est lié à la statistique et traduit le caractère aléatoire du modèle. Il permet de générer, aléatoirement, des données par des lois de distributions particulières.

I.5.3 Selon la discrétisation spatiale

I.5.3.1 Modèles globaux : D'après Maison (2000), le modèle global s'applique globalement sur l'ensemble d'un bassin versant (approche par bilan) qui est considéré comme entité homogène. On utilise dans ce type de modèles des valeurs représentatives moyennes. Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (génie rural) (CEMAGRAF) que nous allons utiliser dans notre étude. C'est un modèle à réservoir, il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J.

I.5.3.2 Modèles spatialisés (distribués) : Ils tiennent en compte la variabilité spatiale de processus et de variables d'entrée, ils sont plus avantageux que les modèles globaux. Dans le cas où les composants du système ne sont pas complètement spatialisés, on parle de modèles semi spatialisés.

I.5.4 Selon la description des sous processus

Le processus hydrologique de transformation pluie-débit est composé d'autres sous processus : précipitations, interception, infiltration, ... etc.

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Les modèles hydrologiques peuvent se classer selon la manière de décrire ces processus :

I.5.4.1 Modèles conceptuels : D'après Ambroise (1991), le modèle conceptuel considère le bassin versant comme un assemblage de réservoirs d'humidité, interconnectés et qui sont censés de représenter plusieurs niveaux de stockages, suivant une dimension verticale. Ce modèle est basé sur la connaissance des phénomènes physiques qui agissent sur les entrées pour obtenir les sorties.

I.5.4.2 Modèles empiriques : Ils sont utilisés pour reproduire le comportement global du système sans décrire les processus élémentaires. Ils sont généralement de type boîte noire sous la forme $\text{débit} = f(\text{pluie})$ où f est déterminée par une régression effectuée sur les chroniques pluies-débits (Ambroise, 1991).

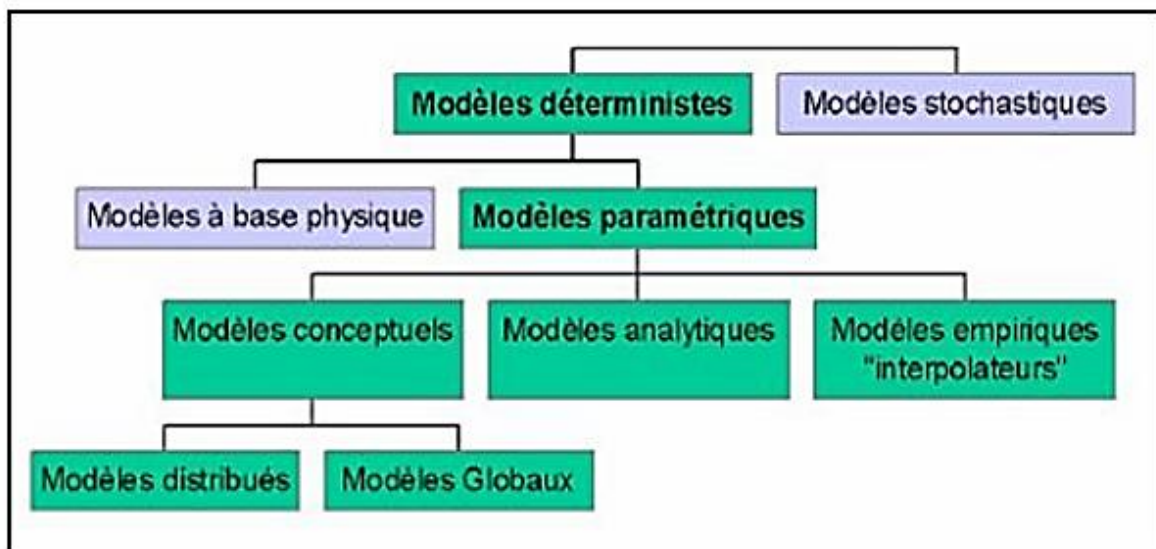


Figure I.5 : Les différentes approches de modélisation (Gaume, 2002).

I.6 Classification basée sur la représentation des processus hydrologiques

Selon le degré de complexité avec lequel on souhaite traduire les processus hydrologiques, Perrin (2000) distingue trois types de modèles : ceux de type boîte noire, ceux à base physique et ceux à réservoirs.

I.6.1 La modélisation de type boîte noire

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

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

par les modèles linéaires d'analyse de séries temporelles (Box et Jenkins, 1976) et les réseaux de neurones (Anctil, et al., 2004).

I.6.2 Un modèle hydrologique à base physique

Met en œuvre des équations qui décrivent la physique des processus hydrologiques : infiltration avec l'équation de Green et Ampt ou le modèle de Philip, évapotranspiration avec la formule de Penman, écoulement dans les zones saturée et non saturée avec les équations de Boussinesq et de Richards ou encore écoulement à surface libre avec les équations de Barré de Saint-Venant. Ces équations s'appuient sur des paramètres physiques mesurables, comme la conductivité hydraulique des sols à saturation, qui ne nécessitent pas en théorie d'être calibrés

On distingue aussi les modèles empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé.

I.6.3 Un modèle à réservoir

Dans un modèle hydrologique dit à réservoirs, la transformation de la pluie en débit est décomposée en différentes composantes. Les équations qui les décrivent comportent des paramètres qui ne peuvent être mesurés et qui doivent être obtenus par calage (Fouchier, 2010). Ces procédures prennent souvent la forme de réservoirs qui se remplissent et se vident au cours du temps.

I.7 Choix du modèle

Il n'y a pas de règles précises pour choisir le modèle le mieux adapté à une étude hydrologique particulière. Toutefois, certaines règles générales peuvent être énoncées pour guider ce choix (Luc ; 2000). Lindström et al. (1997) présentent les qualités suivantes comme règles de modélisation :

- Le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains,
- Les besoins en données doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci sur la majorité des bassins,
- La complexité du modèle doit être justifiée en termes de performances,
- Le modèle doit être convenablement validé,
- Le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

On peut ajouter à cela que le modèle doit apporter des réponses satisfaisantes aux questions posées et doit présenter des qualités de généralité et de robustesse.

Le tableau suivant représente des exemples de quelques modèles

Tableau. I.1 : récapitulatif de quelques modèles hydrologiques (Estupina-Borrell, 2004).

Modèles	Statistique ou à base physique	Taille de l'unité hydrologique	Type de calage	Nature de la sortie
TOPMODEL	À base physique (zones contributives saturées)	Versant	À base physique (zones contributives saturées)	Hydrogramme de crue à l'exutoire
TOPKAPI	À base physique (processus complexes)	Pixel	Paramètres à caler à partir de chroniques PQ	Hydrogramme de crue
HEC HMS	À base physique (processus de type hortonien)	Sous bassin versant	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
SOPHIE	Modèles à propagation le long d'un cours d'eau et modèles pluie PQ globaux	Sous bassins versants	Calage statistique à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
MIKE SHE	À base physique (processus complexes)	Pixel	Prédétermination possible et calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue en différents points du bassin
AIGA	À base physique (processus de type hortonien)	Pixel	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Risque hydrologique
HYDROTEL	À base physique	Pixel	Prédétermination possible puis calage à partir de chroniques PQ	Hydrogrammes de crue

I.8 Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) :

Les modèles GR sont conçus pour estimer les débits d'eau dans les bassins versants en utilisant des données météorologiques et des caractéristiques du bassin versant telles que la topographie, les sols et la végétation. Ils permettent de simuler les différents flux d'eau, tels que les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement et les débits de sortie.

Les modèles GR sont disponibles dans différentes versions adaptées aux pas de temps de fonctionnement spécifiques, tels que le modèle annuel (GR1A), le modèle mensuel (GR2M) et le modèle journalier (GR4J).

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

I.8.1 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . (ZAOUI, 2022)

Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Equation I.1}$$

Où X est l'unique paramètre du modèle.

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle.

Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13; 3.5].

I.8.2. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

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

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoulf (1994), Makhoulf et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi et al. (2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi et al. (2006b) qui paraît la plus performante.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin (ZAOUI, 2022).

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

I.8.2.1. Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure I.6. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

I.8.2.2. Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps,

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{x_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_k}{x_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{x_1} \tanh\left(\frac{P_k}{x_1}\right)} \quad \text{Equation I.2}$$

Le paramètre x_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm, La pluie en excès, P_1 , est donnée par,

$$P_1 = P - P_s \quad \text{Equation I.3}$$

Et le contenu du réservoir est actualisé,

$$S' = S_k + P_s \quad \text{Equation I.4}$$

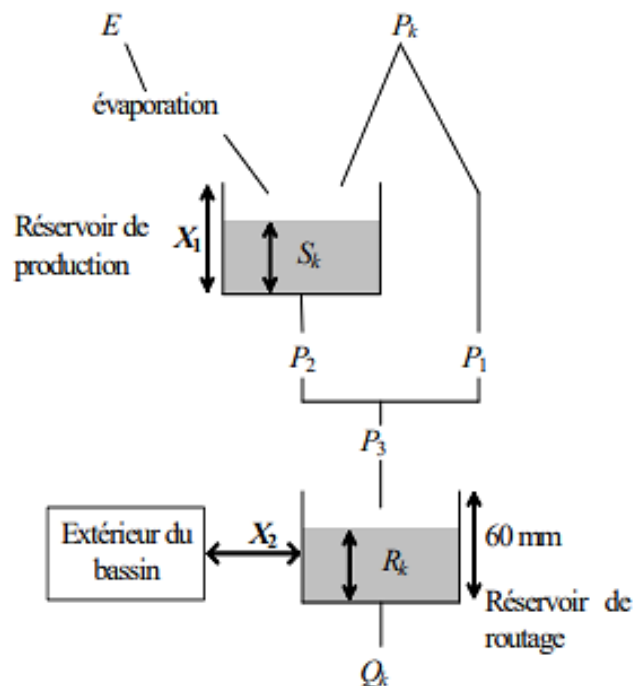


Figure I.6 Schéma de la structure du modèle GR2M (GHERISSI, 2012)

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_S est prélevée du réservoir,

$$E_S = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad \text{Equation I.5}$$

E_S Est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' ,

$$S'' = S' - E_S \quad \text{Equation I.6}$$

I.8.2.3. Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 ,

$$P_2 = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \quad \text{Equation I.7}$$

Et son niveau S_{K+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par,

$$S_{K+1} = S'' - P_2 \quad \text{Equation I.8}$$

I.8.2.4 Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par,

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \text{Equation I.9}$$

Le niveau R_K dans le réservoir devient alors R' ,

$$R' = R_K + P_3 \quad \text{Equation I.10}$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par,

$$F = (X_2 - 1) \cdot R' \quad \text{Equation I.11}$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 \cdot R' \quad \text{Equation I.12}$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante :

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad \text{Equation I.13}$$

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{K+1} = R'' - Q_k \quad \text{Equation I.14}$$

I.8.2.5 Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : Capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : Coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau I.2

Tableau I .2: Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140 -- 2640
X_2 (-)	0.92	0.21 -- 1.31

I.9 Description du modèle pluie-débit journalier GR4J

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

Un schéma de la structure est donné à la **Figure I.7**. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

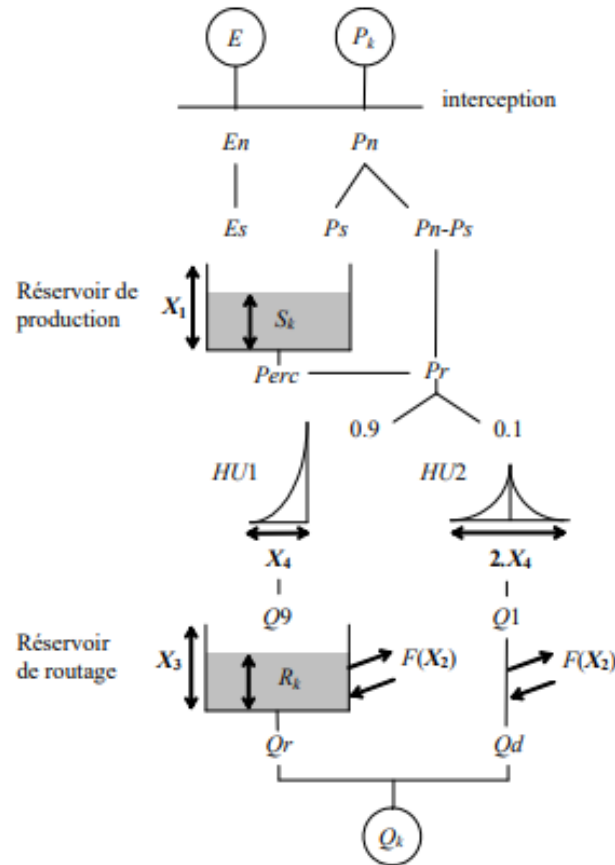


Figure I.7 : Schéma de la structure du modèle GR4J (GHERISSI.R)

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X_1 : Capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : Coefficient d'échanges souterrains (mm)

X_3 : Capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X_4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau I.3

Tableau I.3 : Valeur des paramètres du modèle GR4J obtenues sur un large échantillon de bassins versants (BOUREK, 2010):

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X_1 (mm)	350	100 à 1200
X_2 (mm)	0	-5 à 3
X_3 (mm)	90	20 à 300
X_4 (jours)	1.7	1.1 à 2.9

I.9.1. Applications des modèles

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer

- **La reconstitution ou l'extension de séries de débit** : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées.
- **La prédétermination (les séries de débit observé étant souvent courte)** : il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;
- **La prévision à court terme (quelques heures à quelques jours)** : elle est particulièrement utile pour les événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions.

Les travaux de Tangara (2005) ont par exemple permis de mettre au point un modèle continu (GR3P) dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme ; voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005) ;

- **La prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois)** : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;
- **La détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant** : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002) ;
- **La gestion ou le dimensionnement d'ouvrages** : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien 14 d'étiage, écrêtement de crue, etc.)

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (Yang et al. 1991).

I.10 Le calage et validation d'un modèle

Le calage consiste donc à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible.

Le critère utilisé est le critère des moindres carrés des erreurs, présenté sous la forme adimensionnelle du critère de Nash borné. L'opération de calage consiste à trouver des valeurs des paramètres du modèle qui minimise l'erreur de modélisation sur la période considérée. Une période de 5 ans généralement est utilisée pour caler le modèle.

La validation porte sur l'application des modèles sur les données qui n'ont pas été utilisées lors de calage des modèles. (BOUREK, 2010)

I.11 Critères de qualité

I.11.1 Le coefficient de détermination (R^2)

Il permet d'évaluer le degré d'association entre deux variables X et Y et de juger de la qualité de l'ajustement des points par la droite de régression, en expliquant la proportion de la variance de Y par les variations de X. (ZAOUI, 2022).

Il peut être estimé par l'équation suivante,

$$R^2 = \frac{\sum(Q_i \text{ obs} - Q_i \text{ sim})^2}{\sum(Q_i \text{ obs} - Q_i \text{ moy})^2} \quad \text{Equation I.27}$$

Où $Q_i \text{ moy}$ est la moyenne des débits observés (Q_{obs}). Pour une bonne simulation des débits le coefficient de détermination doit être égal à un.

I.11.2 Le critère de Nash

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

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

Il est défini par :

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

$$\text{Nash (Q)} = 100 \times [1 - \sum_i (Q_{i, \text{obs}} - Q_{i, \text{cal}})^2 / \sum_i (Q_{i, \text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2] \quad \text{Equation I.27}$$

$Q_{i, \text{obs}}$ et $Q_{i, \text{cal}}$ sont les débits observés et calculés au pas de temps i (mm),

\bar{Q}_{obs} , est la moyenne des débits observés sur la période considérée.

Pour tenir compte de certaines valeurs particulières des débits, ce critère a été calculé en utilisant la racine carrée des débits pour atténuer l'importance des débits de pointe, ou le logarithme pour les débits d'étiage.

En pratique, on estime que la simulation est de mauvaise qualité lorsque le critère de Nash est faible (< 70 %), elle est acceptable lorsqu'il est supérieur à 70 %, parfaite lorsqu'il est égal à 100 % (ZAOUI, 2022).

I.11.3 Changement climatique

Le changement climatique est un sujet important et préoccupant. Il fait référence aux modifications à long terme des conditions météorologiques mondiales, telles que l'augmentation des températures moyennes, les variations des précipitations, la fonte des glaciers et la montée du niveau de la mer.

Ce phénomène est largement attribué aux activités humaines, en particulier à l'émission de gaz à effet de serre résultant de la combustion des combustibles fossiles, de la déforestation et d'autres activités industrielles.

Les conséquences du changement climatique peuvent être graves, notamment des événements météorologiques extrêmes plus fréquents et plus intenses, des pénuries d'eau, des perturbations des écosystèmes, des impacts sur l'agriculture et la sécurité alimentaire, ainsi que des risques accrus pour la santé humaine.

La communauté internationale s'efforce de trouver des solutions pour atténuer le changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, en favorisant les énergies renouvelables, en adoptant des pratiques durables et en renforçant la résilience aux impacts déjà observés.

Il est important que chacun joue un rôle dans la lutte contre le changement climatique, en adoptant des comportements respectueux de l'environnement, en économisant l'énergie, en favorisant les transports durables, en réduisant les déchets et en soutenant des politiques et des initiatives visant à atténuer les effets du changement climatique. (Andréassian, 2002)

I.12 Conclusion

Le bassin versant est un système complexe et ouvert dont le fonctionnement en réponse aux influences atmosphériques dépend des caractéristiques hydrologiques et pédologiques spécifiques à ce bassin. Des efforts considérables de recherche ont été déployés pour étudier les différents processus impliqués dans la génération des débits, ce qui a permis des avancées fondamentales dans la compréhension des voies de l'eau au niveau d'un bassin versant. La modélisation pluie-débit est considérée comme l'un des moyens les plus adaptés pour décrire de manière simplifiée la réalité complexe du fonctionnement d'un bassin versant. En raison des variations hydro-climatiques à travers le monde, les modèles pluie-débit se sont diversifiés en plusieurs catégories afin de prédire les débits de réponse d'un bassin aux événements pluvieux à partir d'une série d'observations pluies-débits.

CHAPITRE II : Présentation Générale De La Zone D'étude

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Introduction

L'objectif dans ce chapitre est d'identifier les paramètres morphométriques, géométriques et les reliefs d'une façon général dans notre zone d'étude, ces caractéristiques jouent un rôle très important et essentiel dans la diagnostique de bassin versant notamment leur comportement hydrologique.

II.2 Situation Géographique

Le bassin versant de l'oued Ressoul qui fait partie du bassin hydrographique du Seybouse se localise au Nord Est algérien. Le bassin couvre une superficie d'environ 101,23 Km², soit près de 1,53% du bassin de la Seybouse et d'un périmètre de 51,32 Km, orientée suivant la direction Sud-sud-ouest – Nord-nord-est (Fig.II.1).



Figure. II.1 : Vue en plan du raccordement d'oued Ressoul avec l'Oued de la Seybouse.

(GHAOUTI, 2019)

Le bassin versant de l'oued Ressoul, situé au sud-est de la wilaya de Annaba, est contrôlé à son exutoire par la station hydrométrique d'Ain Berda, qui se trouve à environ 28 km au sud de la ville d'Annaba et à 25 km de la mer. Le cours d'eau principal de ce bassin mesure environ 25 km de longueur.

L'oued Ressoul est formé par la réunion de deux cours d'eau principaux. À l'est de Ain Berda, il y a l'oued Mouya, qui coule presque du sud au nord et draine la partie sud-est du bassin versant.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

À l'ouest de Ain Berda, il y a l'oued Guis, qui coule du sud-ouest au nord-est et reçoit les eaux provenant du versant sud-ouest.

Le bassin versant de l'oued Ressoul est délimité comme suit :

- À l'est, il est bordé par le bassin d'Oued Seybouse Maritime.
- À l'ouest, il est limité par le lac Fetzara.
- Au sud-ouest, il est délimité par le bassin d'Oued Kebir-Hammam.
- Au sud, il est bordé par le bassin d'Oued Seybouse Moyenne.

Le bassin versant de l'oued Ressoul inclut partiellement trois communes de deux wilayas différentes, à savoir Guelma et Annaba. Nechmaya, Selmoun El Hachemi et Ain Berda. Elle est limitée par :

- Au nord, le bassin versant est limité par la commune de Cheurfa, qui se trouve dans la wilaya de Annaba.
- Au nord-est, il est limité par la commune El Harrouchi, qui fait partie de la commune de Ain Berda, dans la wilaya de Annaba.
- À l'est, la commune limitrophe est Ain Ben Beida, qui est située dans la wilaya de Guelma.
- Au sud-est, la commune voisine est Djeballah Khemissi, qui est également dans la wilaya de Guelma.
- Au sud-ouest, la commune limitrophe est Guelaat Bousbaa, qui fait partie de la wilaya de Guelma.
- À l'ouest, la commune de Djbel Menchoura, située dans la wilaya de Guelma, est la commune voisine.

II.2. Caractéristiques morphologiques

Les indices morphologiques permettent de caractériser le milieu physique d'un bassin versant. La détermination de ces indices s'appuie sur la connaissance de la répartition hypsométrique sur la totalité du bassin versant.

II.2.1. Caractéristiques géométriques

Pour délimiter ce bassin hydrographique nous avons utilisé la carte ASTER Global Digital Elevation Model V003 (N36E07). La surface du bassin versant de Ressoul a été calculée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.3, après avoir enregistré les données topographiques du bassin. La surface calculée est : **S = 101,23 km²** et le périmètre calculé est : **P = 51,33 Km**.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.2.2. Caractéristiques de forme

II.2.2.1. Indice de compacité de GRAVELIUS (K_C)

Appelé aussi indice de forme, cet indice caractérisant la forme du bassin versant est donnée par la formule :

$$K_C = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{Equation II.1}$$

K_C : Indice de compacité de GRAVELIUS

P : Périmètre du bassin versant (Km).

S : Surface du bassin versant (Km²)

$$K_C = 1,43$$

D'après (BELKACEMI F, 2020)

Si :

- $K_C < 1.12 \rightarrow$ le bassin versant est compacté ;
- $K_C > 1.12 \rightarrow$ le bassin versant est allongé ;
- $K_C = 1.12 \rightarrow$ le bassin versant est de forme circulaire.

Donc la forme du bassin versant d'oued Ressoul est allongée.

II.2.2.2. Notion du Rectangle Equivalent

C'est une transformation purement géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions "L" et "l". Ce dernier permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement. La longueur "L" et la largeur "l" sont données par les expressions suivantes :

a. La longueur du rectangle équivalent

La longueur du rectangle équivalent est donnée par l'expression suivante :

$$L = \frac{K_C}{1.12} \sqrt{S} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \quad \text{Equation II.2}$$

L : longueur de rectangle équivalent en Km,

S : Superficie du bassin versant en Km².

K_C : indice de compacité.

$$L = 20,80 \text{ km}$$

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

b. Largeur du rectangle équivalent

La largeur du rectangle équivalent est obtenue par la relation suivante :

$$l = \frac{K_c}{1.12} \sqrt{S} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad \text{Eq II.3}$$

$$l = 4,87 \text{ km}$$

Tableau. II.1 : les résultats de calcul de rectangle équivalent.

Indice de compacité de Gravelus K_C	Rectangle équivalent	
	Longueur équivalente (Km)	Largeur équivalente (Km)
1,42	20,80	4,87

II.3. Description du milieu physique

II.3.1. Courbes hypsométriques

Elle est d'une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant. Les surfaces partielles par tranche d'altitude sont données dans le **Tableau. II.2** et la répartition et la courbe hypsométriques est en **Figure. II.2**.

Remarque : il convient de noter que la courbe a été réalisée avec le logiciel ArcGIS (10.3)

II.3.2. Présentation de logiciel ArcGIS :

ArcGIS offre des applications SIG professionnelles complètes qui prennent en charge diverses tâches SIG comme :

- La cartographie,
- La compilation de données,
- L'analyse,
- La gestion des géo-données et des images,
- Le partage d'informations géographiques.

Il est la plate-forme que les professionnels des SIG utilisent pour gérer leurs workflows et leurs projets SIG et pour développer des données, des cartes, des modèles et des applications.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Tableau. II.2: Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Ressoul.

N° de classe	Classe d'altitude	Altitude moy	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
	$H_i - H_{i-1}$	\bar{H}_i [m]	S_i [km ²]	S_i [%]	ΣS_i [km ²]	ΣS_i [%]
1	51 - 100	75,5	2,49	2,47	2,49	2,47
2	100 - 200	150	22,34	22,12	24.83	24,59
3	200 - 300	250	29,97	29,68	54.8	54,27
4	300 - 400	350	22,01	21,8	76.81	76,07
5	400 - 500	450	13,54	13,41	90.22	89,48
6	500 - 600	550	6,65	6,59	96.81	96,07
7	600 - 700	650	2,04	2,02	98.85	98,09
8	700 - 800	750	1,59	1,58	100.44	99,46
9	800 - 910	855	0,54	0,54	101,23	100

Vu que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude, il est intéressant d'étudier la répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Ressoul par tranche d'altitude, le bassin versant de l'oued Ressoul présente un relief moins accentué (**Figure. II.2 et Figure. II.3**), il est montagneux dans sa partie Sud. Plus de la moitié (50 %) de la surface du bassin versant est située entre les altitudes 100 m et 300 m, ces zones représentent les plaines et les versants.

La courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul présente une pente forte vers les hautes altitudes indiquant la présence d'un plateau. La faible pente de la courbe hypsométrique aux basses altitudes indique la présence d'une vallée encaissée à l'exutoire du bassin versant.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

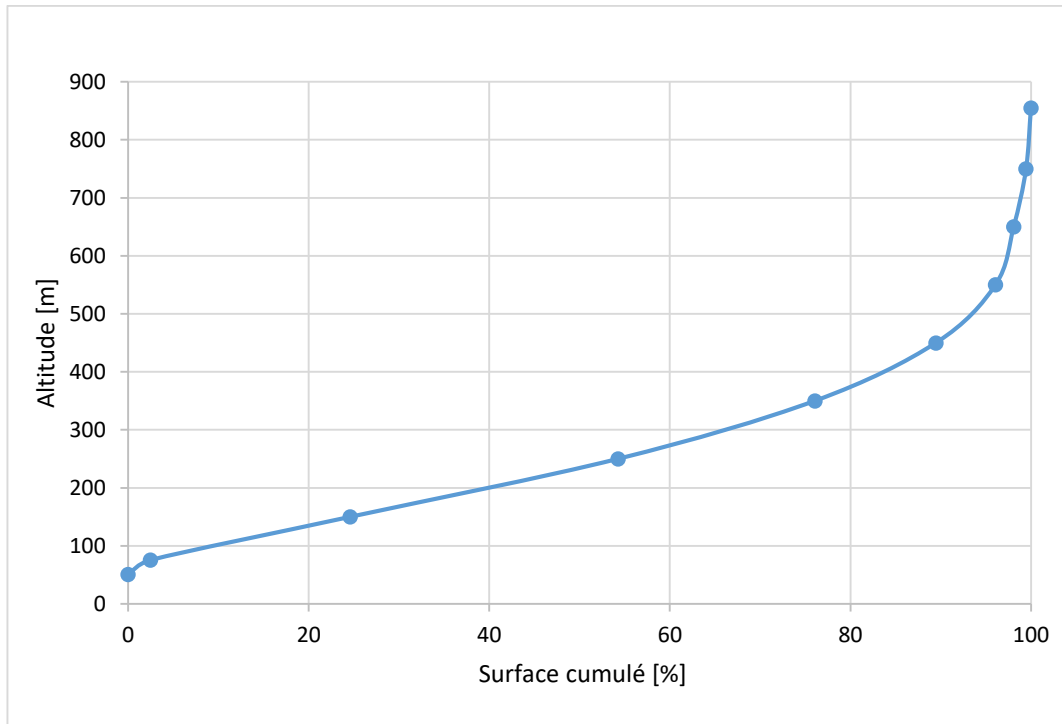


Figure. II.2: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul.

II.3.2. Altitudes caractéristiques

La courbe hypsométrique traduit la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin versant et permet, en outre, de déterminer les altitudes caractéristiques suivantes :

- a. Altitude minimale (H_{min}) :** Cette altitude représente le point le plus bas du bassin versant généralement à l'exutoire, elle est 51 m.
- b. Altitude à 95% de surface (H_{95}) :** Celle-ci est obtenue directement à l'aide de la courbe hypsométrique, elle correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la superficie totale du bassin versant. L'altitude à 95% de surface est 586 m.
- c. Altitude médiane (H_{50}) :** Elle correspond à l'altitude qui inclut 50% de la superficie totale du bassin versant sur la courbe hypsométrique. Elle est 286 m.
- d. Altitude à 5% de surface (H_5) :** Elle correspond à l'altitude lue sur la courbe hypsométrique au point d'abscisse 5% de la superficie totale du bassin versant. Elle est de 111 m.
- e. Altitude maximale (H_{max}) :** Cette altitude considère le point le plus haut du bassin versant, elle est égale **910 m** à Koudiet Thalbala.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

f. Altitude moyenne (H_{moy}) : Elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{1}{s} * \sum_i^n S_i * \left(\frac{H_i + H_{i-1}}{2} \right) \quad \text{Equation II.4}$$

Où :

H_{moy} : l'altitude moyenne du bassin versant exprimée en m,

S : la superficie totale du bassin versant exprimée en km^2 ,

S_i : la superficie partielle comprise entre deux altitudes successives (km^2),

n : le nombre de courbes de niveau.

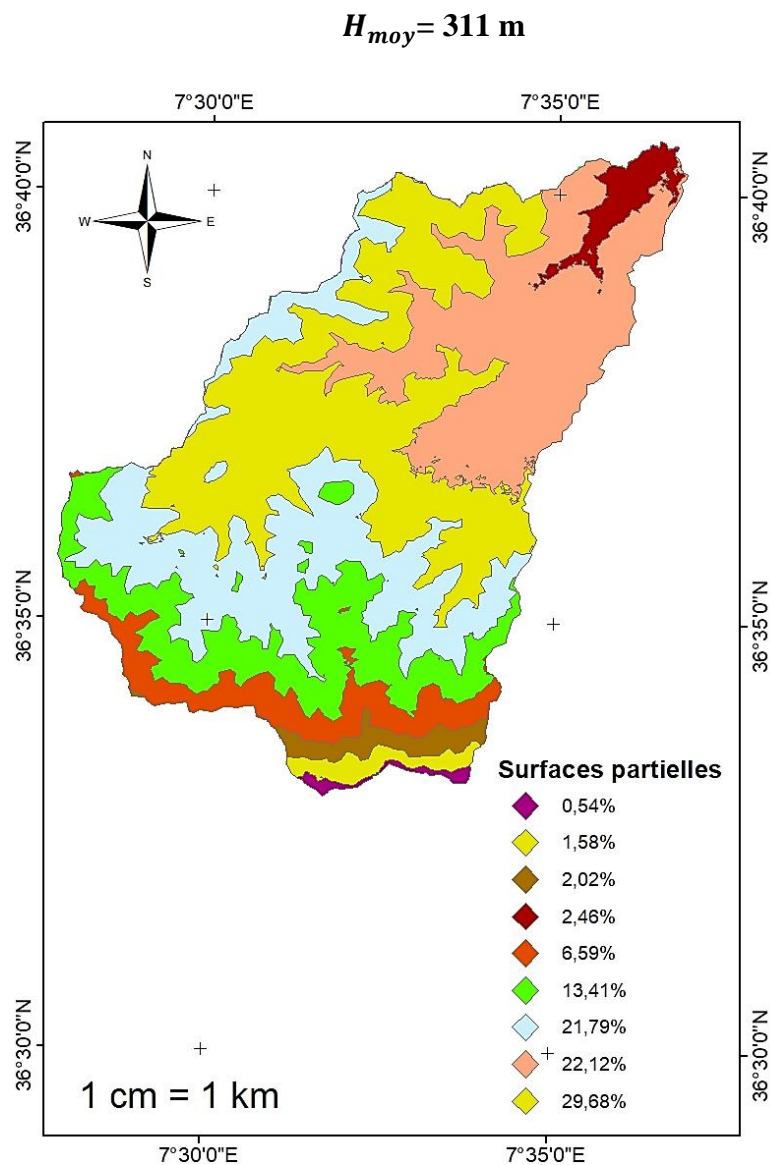


Figure. II.4 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Ressoul

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.3.3. Intégrale hypsométrique

L'intégrale hypsométrique, qui représente l'aire entre la courbe hypsométrique et l'axe des abscisses, permet de refléter l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin versant. Son calcul permet de déterminer si le bassin versant est immature ou vieux. Si l'intégrale hypsométrique est élevée, c'est-à-dire supérieure à 0.6, cela indique que le bassin versant est immature. Cela signifie que la superficie du bassin est faible par rapport aux changements d'altitude initiaux. Cette caractéristique est souvent observée dans les bassins abrupts où les altitudes varient rapidement sur une petite superficie.

En revanche, si l'intégrale hypsométrique est faible, c'est-à-dire inférieure à 0.3, cela indique que le paysage est vieux. Cela signifie que malgré une superficie importante du bassin, l'altitude varie très peu. C'est typique des plaines douces situées près d'un cours d'eau où les changements d'altitude sont minimaux (BENAÏCHOUCHE.2013).

$$IH = \frac{H_{moy} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad \text{Equation II.5}$$

$$IH=0.30$$

Le bassin de l'oued Ressoul présente une intégrale hypsométrique faible (0.30), un profil concave et régulier, ce qui indique un relief considérablement érodé et un stade d'évolution de fin maturité avancé.

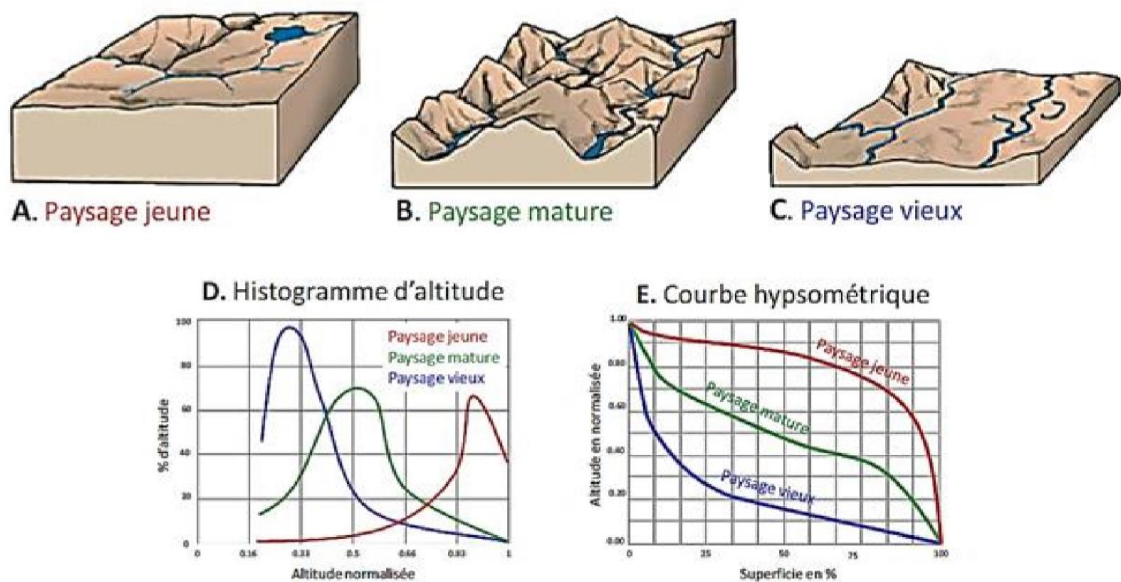


Fig. II.5: Interprétation de l'histogramme d'altitude et de courbe hypsométrique pour différents types de relief. (BENAÏCHOUCHE.2013)

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.3.4. Analyse spatiale des pentes

a. Indice de pente de ROCHE I_{PR}

L'indice de pente moyenne est déterminé à partir des données du bassin versant, l'objectif a caractérisé le régime hydrologique, comparer et classier plusieurs bassins entre eux. Il est donné par :

$$I_{PR} = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum \sqrt{S_i(H_i - H_{i-i})} \quad \text{Equation II.6}$$

I_{PR} : Indice de pente de Roche,

S_i : Fraction de la surface totale du bassin comprise entre les cotes et H_i et H_{i-i} (-),

H_i et H_{i-i} : Dénivelée entre deux courbes de niveau voisines (m),

D_i : dénivelée en km.

L_r : la longueur du rectangle équivalent (km)

Tableau. II.3: Détermination de l'indice de pente de ROCHE I_{PR} (%)

Tranche d'altitudes (m)		D_i [km]	S_i %	$S_i * D_i$	$\sqrt{S_i * D_i}$
51	100	0,04	2,47	0,000988	0,031432467
100	200	0,1	22,12	0,02212	0,14872794
200	300	0,1	29,68	0,02968	0,172278844
300	400	0,1	21,8	0,0218	0,147648231
400	500	0,1	13,41	0,01341	0,115801554
500	600	0,1	6,59	0,00659	0,081178815
600	700	0,1	2,02	0,00202	0,04494441
700	800	0,1	1,58	0,00158	0,039749214
800	910	0,11	0,54	0,000594	0,024372115
				Σ	0,80613359
				$\sqrt{L_r} = \sqrt{20.79}$	4.55
$I_{PR} = 0.17 = 17 \%$					

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

b. *Indice de pente global (I_g)*

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par la formule :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{Equation II.7}$$

Où :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad \text{Equation II.8}$$

Avec :

D : la dénivelée ; déterminer par la courbe hypsométrique.

I_g : Indice globale de Roche,

D : dénivelée (m),

L : longueur du rectangle équivalent (m).

$$I_g = 0.023$$

$0.020 < I_g < 0.050$, selon la classification adoptée par l'ORSTOM (France), le relief est dit assez fort si l'indice de pente global est compris entre 20 et 50 m/km (**Tableau. II.4**).

Théoriquement, on ne peut plus utiliser la méthode ORSTOM, mais on peut à la rigueur l'utiliser quand même en extrapolant les résultats de 100 à 200 km² ou utiliser la méthode CIEU (RODIER et RIBSTEIN, 1988).

Malgré sa simplicité, l'indice de pente global présente l'inconvénient de décroître pour un même bassin lorsque la superficie croit.

Il permet la classification mais on ne peut pas s'en servir pour comparer des indices de pente des bassins versants de superficies différentes. Pour pallier à cette lacune, il serait préférable d'utiliser la dénivelée spécifique

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Tableau. II.4: Classification du relief selon I_g par O.R.S.T.O.M

Type de relief	Valeurs de I_g
Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.010$
Relief modéré	$0.010 < I_g < 0.020$
Relief assez fort	$0.020 < I_g < 0.050$
Relief fort	$0.050 < I_g < 0.100$
Relief très fort	$0.100 < I_g$

c. Classification des pentes du bassin versant de l'oued Ressoul

Les classes de pentes < 10 occupent environ 39.61 Km² soit 39 % de la superficie totale du bassin versant. La classe de pente entre 10 et 30 % représente presque $1/2 \approx 50$ % de la superficie du bassin. Alors que les valeurs de pente supérieure à 30 % touchent une partie moins importante du bassin versant avec 11 % de sa superficie totale (**Figure. II.6**).

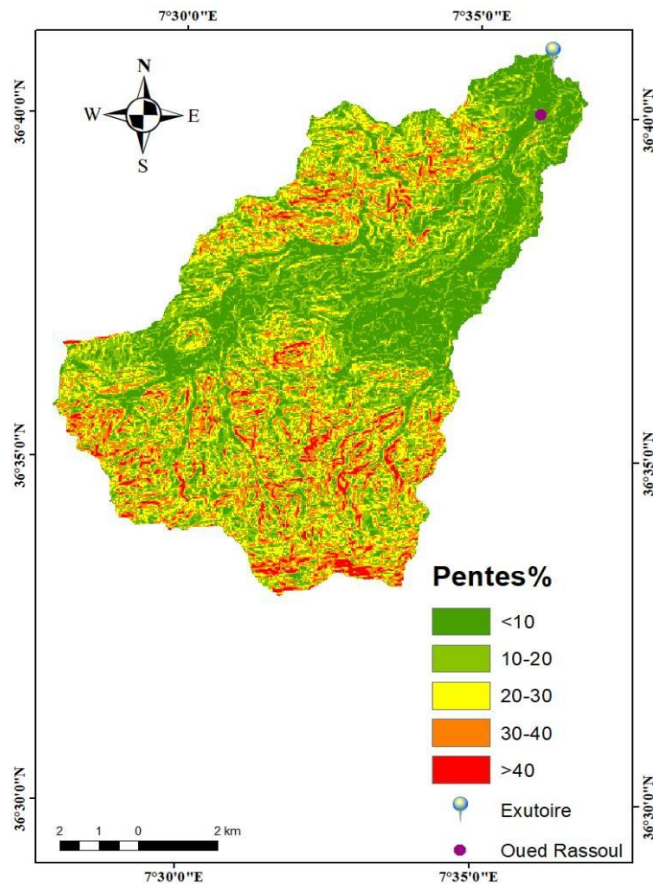


Figure. II.6 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Ressoul. (ZAOUI, 2022)

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.3.5. La dénivelée (D)

On définit la dénivelée entre et comme étant la différence des altitudes ayants 5% et 95% de la superficie totale du bassin versant dont 90% de la superficie s'inclut (Equation II.9).

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad \text{Equation II.9}$$

Après l'application numérique on trouve les résultats suivants (**Tableau. II.5**) :

Tableau. II.5: Indices de forme de bassins versant étudié.

Bassin versant	$S [km^2]$	$P [km]$	K_c	$L_r [km]$	$L_r [km]$	$D[m]$
Oued Ressoul	101.23	51.32	1.42	20.79	4.86	475

II.3.6. Dénivelée spécifique (D_s)

La dénivelée spécifique permet de définir les différents types de relief des bassins versant suivant la classification de (Equation II.9) (ORSTOM : Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer).

$$D_s = I_g * \sqrt{S} \quad \text{Equation II.10}$$

Où :

D_s : Dénivelée spécifique (m),

I_g : Indice de pente global (m/km),

S : superficie du bassin versant km^2 , pour notre cas $S=101.23 km^2$.

$$D_s = 231.41 \text{ m}$$

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification de l'Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer (tableau II.6) (ORSTOM).

Le bassin versant étudié de l'oued Ressoul possède une dénivelée spécifique de 231.41 m, ce qui lui permettant d'être classé en classe R5 ($100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$), correspondant à un relief assez fort.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Tableau. II.6 : Classification des reliefs selon D_s d'après ORSTOM.

Classe de relief	Type de relief	Valeurs de D_s
1	Relief très faible	$D_s < 10$ m
2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m
3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m
4	Relief modère	$50 \text{ m} < D_s < 100$
5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250$
6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500$
7	Relief très fort	$D_s \geq 500$ m

II.4. Caractéristiques hydrographiques

Elle est définie par l'ensemble des chenaux de drainage naturels où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines soit sous forme de source, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau (Roche, 1963). La disposition du réseau hydrographique (**Figure. II.7**) est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques.

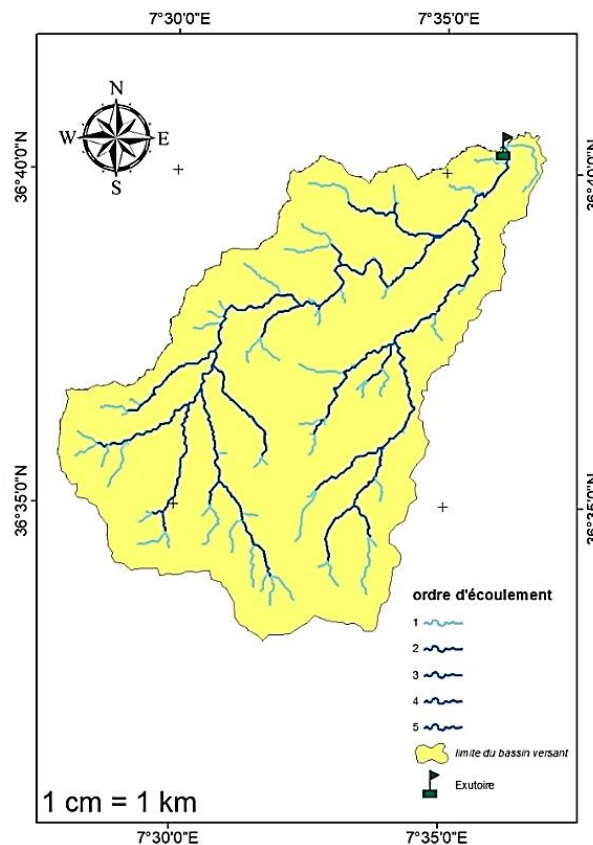


Figure. II.7 : Ordre d'écoulement selon la classification de STRAHLER.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.4.1. Classification des cours d'eau (Talwegs)

La classification des Talwegs ou les cours d'eau et les affluents est une étape nécessaire dans l'étude de réseau hydrographique pour chaque ordre on détermine le nombre de talwegs et la longueur totale de ceux-ci (**Tableau. II.7**).

Tableau. II.7: Nombre et longueurs des Talwegs.

Ordre	Nombre des talwegs	Longueur des talwegs [km]
1	401	173,54
2	66	39,31
3	18	27,23
4	4	19,36
5	1	16,91
Σ	490	276,34

II.4.2. Densité de drainage (D_d)

Elle est définie comme étant la longueur totale de tous les talwegs d'ordre i à n " L_i ", du bassin versant, rapportée à la surface totale " S " du bassin. Ce paramètre s'exprime par la relation suivante (Equation II.11),

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad \text{Equation II.11}$$

D_d : Densité de drainage (Km/Km²),

L_i : Longueur de cours d'eau (km),

i : L'ordre d'écoulement de 1 à n .

S : Surface du bassin versant, $S = 101.23$ (Km²).

$$D_d = 2.72 \text{ (Km/Km}^2\text{)}$$

II.4.3. Fréquence des cours d'eau (F_c)

Représente le nombre de cours d'eau par unité de surface. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$F_c = \frac{N}{S} \quad \text{Equation II.12}$$

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

N : nombre totale des cours d'eau,

S : la surface du bassin en Km²,

$$F_c = 4.84 \text{ Km}^{-2}$$

II.4.4. Coefficient de torrentialité C_t

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité de drainage et celle des thalwegs élémentaires d'ordre 1 :

$$C_t = F_1 * D_d \quad \text{Equation II.13}$$

D_d : densité de drainage (km/km²) ;

F_1 : La fréquence des thalwegs d'ordre (km).

Ce paramètre permet l'estimation de la grandeur de l'énergie érosive du cours d'eau.

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad \text{Equation II.14}$$

F_1 : La fréquence des thalwegs d'ordre 1,

S : Surface du bassin en km², S = 101.23 Km²,

N_1 : Nombre de talweg d'ordre 1.

Tableau. II.8: Coefficient de torrentialité pour chaque fréquence de Talweg.

Ordre	Nombres de Talwegs	F_i	C_t
1	401	3.88	10,35
2	66	0.64	1,70
3	18	0.17	0,46
4	4	0.039	0,10
5	1	0.01	0,03
			$\Sigma=12.65$

$$C_t = 10.37$$

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.4.5. Temps de concentration T_c

C'est le temps que met la particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Le calcul de ce temps de concentration se fait par plusieurs formules empiriques comme suite (Equation II.15) :

➤ **Formule de TURRAZA :**

$$T_c = 0.108 \frac{\sqrt{S.L}}{\sqrt{I}} \quad \text{Equation II.15}$$

T_c : Temps de concentration en (h).

S : Surface du bassin versant en ($S = 101.23 \text{ Km}^2$).

L : Longueur du thalweg principal en ($L = 25 \text{ Km}$),

I : Pente moyenne du cours d'eau ($I = 17.90 \%$).

➤ **Formule de SCS (Soil Conservation Service) :**

$$T_c = \left(0.87 * \frac{L^3}{H}\right)^{0.387} \quad \text{Equation II.16}$$

L : Longueur du Talweg principal ($L = 25 \text{ Km}$) ;

H : Différence entre altitude max. et altitude min. $H = (910-51) = 859 \text{ m}$.

➤ **Formule de VENTURA :**

Est donnée par :

$$T_c = 0.1272 * \frac{\sqrt[3]{S}}{\sqrt{I_m}} \quad \text{Equation II.17}$$

I_{PR} : Pente moyenne du cours d'eau ($I_m = 13.30\%$) ;

S : Surface du bassin versant ($S = 101.23 \text{ Km}^2$).

Après l'application numérique on trouve les résultats suivants (**Tableau II.9**) :

Tableau II.9: Tableau récapitulatif des résultats du temps de concentration.

Formule utilisée	T_c temps de concentration trouvé (heurs)
Formule de TURRAZA	3.51
Formule de SCS	2.91
Formule de VENTURA	1.61
La moyenne	2.67

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.4.6. Vitesse d'écoulement (V)

Ce paramètre caractérise la vitesse moyenne d'écoulement des oueds par gravité suivant les pentes du bassin versant. Elle est exprimée par la relation suivante (Equation II.18).

$$V = \frac{L}{T_c} \quad \text{Equation II.18}$$

Où :

V : Vitesse d'écoulement [km/h] ;

L : Longueur du talweg principal [km] ;

T_c : Temps de concentration [h].

V=9.36 km/h

Tableau II. 10 : Récapitulation des paramètres hydrographiques du bassin versant.

Paramètres caractéristiques	Symboles	Unités	Valeurs
Densité de drainage	D_d	Km/km ²	2.67
Fréquence des cours d'eaux	F_c	-	4.74
Coefficient de torrentialité	C_t	-	10.37
Temps de concentration	T_c	Heur	2.67
Vitesse de ruissellement	V	Km/h	9.36

II.5. Géologie du site

Pour toutes indications stratigraphique et tectonique relatives à la zone montagneuses principales. Cet ensemble montagneux de structure complexe (faillé, plissé) affecté par toutes les phases tectoniques depuis le paléozoïque apparaît comme tout à fait indépendant du reste de la région de Annaba dont l'orogénie se lie à la terminaison orientale de la chaîne Numidique. La nappe Numidienne avec son flysch habituel argilo-gréseux mise en place à la suite des poussées tectoniques d'origine alpine. [YLES.2014].

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

II.6. Synthèse des caractéristiques du bassin versant de l'oued Ressoul

Nous avons essayé de récapituler dans le tableau.II.11 l'ensemble des caractéristiques morphométriques, topographiques et hydrologiques du bassin versant étudié.

Tableau II.11 : Synthétise les principales caractéristiques de bassin versant de l'oued Ressoul.

Caractéristiques		Symbole	Unité	Bassin Versant	
Topographique	Altitudes	Minimale	H_{min}	Km	51
		à 95% de surface	H95%	Km	586
		Médiane	H50%	Km	286
		Moyenne	H_{moy}	Km	311
		à 5% de surface	H5%	Km	111
		Maximale	H_{max}	Km	910
	Intégrale hypsométrique		IH	Km	
Pente moyenne		-	%	2.17	
Morphométriques	Superficie		S	Km ²	101.23
	Périmètre		P	Km	51.32
	Indice de compacité		K_c	-	1.42
	Rectangle équivalent	Longueur	L	Km	20.79
		Largeur	l	Km	4.86
	Densité de drainage		D_d	Km/Km ²	2.67
	Indice de pente globale		I_g	%	2.30
	Dénivelée spécifique		D_s	m	219.96
Hydrographique	Talweg principal		-	-	Oued Rassoul
	Principaux influents		-	-	Oued Guis, Oued Mouya
	Longueur de talweg principal		L	Km	25
	Fréquence de talweg		F_c	Km-2	4.74
	Coefficient de torrentialité		Ct	-	10.37
	Temps de concentration		Tc	h	2.97
	Vitesse d'écoulement		V	Km/h	9.36

CHAPITRE III :

Hydroclimatologie

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

III.1 Introduction

L'hydro-climatologie est une discipline scientifique qui étudie l'interaction entre le climat et le cycle de l'eau. Elle se concentre sur les processus hydrologiques et climatiques, ainsi que sur les variations et les changements qui se produisent dans les systèmes hydrologiques en réponse aux conditions climatiques.

L'eau est une ressource essentielle pour la vie sur Terre, et son cycle joue un rôle crucial dans le fonctionnement des écosystèmes, l'approvisionnement en eau douce, l'agriculture, la production d'énergie et d'autres secteurs économiques. Cependant, le climat influence directement la distribution spatiale et temporelle des précipitations, de l'évaporation, de l'évapotranspiration et du ruissellement, ce qui affecte la disponibilité et la gestion des ressources en eau.

L'hydro-climatologie vise donc à comprendre les relations complexes entre les facteurs climatiques, tels que la température, les précipitations, l'humidité de l'air et les vents, et les processus hydrologiques, tels que le ruissellement, l'infiltration, la recharge des eaux souterraines et les débits des cours d'eau. Elle utilise des outils et des techniques variés, tels que la modélisation climatique et hydrologique, l'analyse statistique des données, les mesures in situ et les observations satellitaires, pour étudier et prédire les phénomènes hydrologiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

Comprendre l'hydro-climatologie est crucial pour anticiper et s'adapter aux changements climatiques en cours. Les variations du climat, telles que l'augmentation des températures, les modifications des régimes de précipitations et les événements météorologiques extrêmes, ont un impact direct sur les ressources en eau, la gestion des barrages, la planification urbaine et les politiques de gestion des risques liés à l'eau. Par conséquent, une meilleure compréhension de l'hydro-climatologie est essentielle pour promouvoir une gestion durable des ressources en eau et pour prendre des décisions éclairées en matière de politique et de planification dans un contexte de changement climatique.

III.2. Présentation des données

Les données pluviométriques et hydrométriques utilisées dans cette étude appartiennent aux :
✓ L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Elles concernent deux stations pluviométriques : Ain Berda (140606), Nechmeya (140605) et une seule station hydrométrique : Ain Berda (140602) (Figure. III.1).

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

Les données de températures ont été déterminées à partir des ré-analyses produites par :

✓ "National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)" et "L'Office National de la Météorologie (ONM)". Elles concernent la station : Annaba (les salines).

Sur la base de ces critères, La période retenue dans cette étude est de (1972/73 à 2008/09) pour le débit, la précipitation et température.

Tableau III.1 : Caractéristiques des stations de mesure de Nechmaya et Ain El Barda (1972/73-2008/09).

STATIONS		Codes	Longitude	L'altitude	Altitude (m)	Période d'enregistrement
Pluviométrique	Nechmaya	14-06-05	07°30'48" E	36°36'41" N	254	1972/73-2008/09
	Ain El Barda	14-06-06	07°48'09" E	36°40'55" N	73	
Hydrométrique	Ain El Barda	14-06-02	07°48'09" E	36°40'55" N	73	

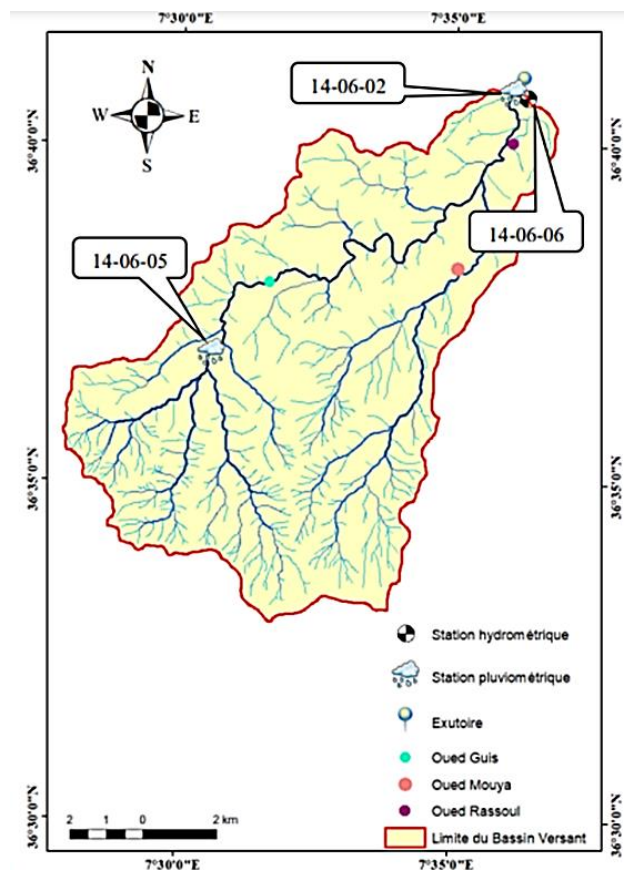


Figure III.1 : présentation des stations hydrométriques et pluviométriques du bassin versant D'oued Ressoul. (Zaoui, 2022)

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

III.3. Etude des précipitations

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons sur l'étude des précipitations, qui est le facteur principal du comportement hydrologique de la région. Varie dans le temps et dans l'espace. Pour ce faire, nous avons pris en considérations les valeurs annuelles et mensuelles des précipitations des deux stations, la station de Nechmaya situé en amont du bassin versant et la station d'Ain El Berda se trouvant, en aval, dont les caractéristiques sont consignées dans le.

III.3.1. Variation interannuelle des précipitations

La variation interannuelle temporelle des précipitations annuelles aux stations de Nechmaya et Ain El Barda (figure III.2) sur une période de 37 ans (1972/73 - 2008/09), montre qu'au niveau de la station Nechmaya, l'année la plus pluvieuse enregistrée en (1983/84) avec 1006 mm d'hauteur d'eau, alors que l'année la plus sèche est observée en (2001/02) avec un total de 186 mm A Ain el barda les précipitations annuelles ont atteint un maximum de 973 mm en 2002/03, alors que la plus faible pluie soit 368,2 mm a été enregistrée en 2001/02.

La moyenne annuelle des précipitations à la station de d'Ain El Berda (621.68 mm) est plus élevée de celle de Nechmeya (573.96 mm).

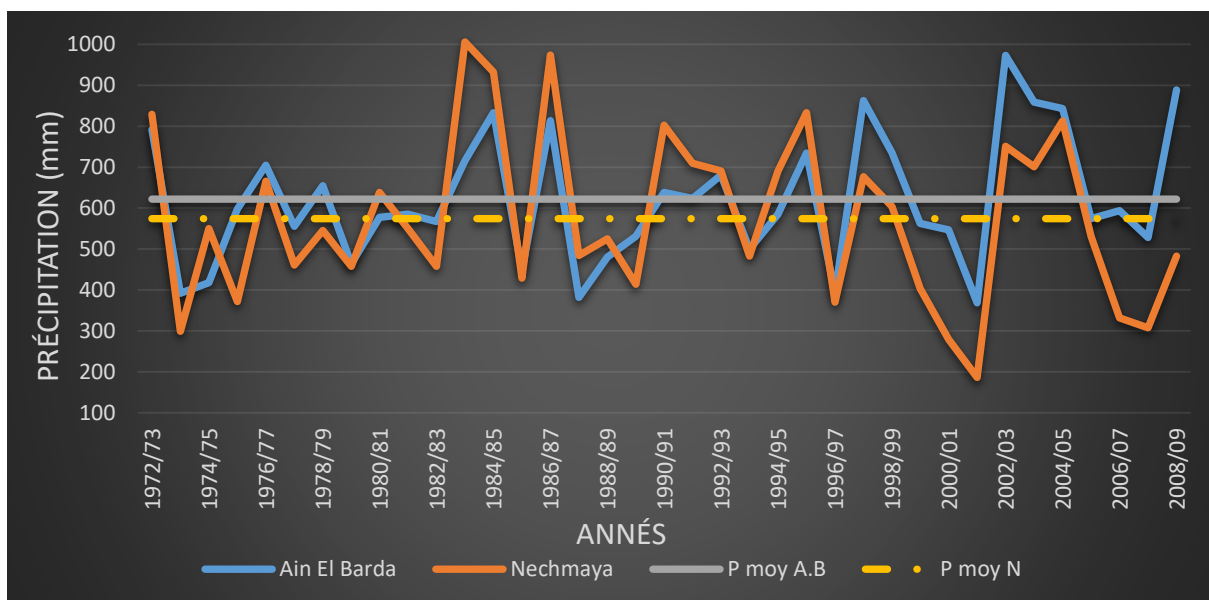


Figure III.2 : La variation interannuelle temporelle des précipitations annuelles aux stations de Nechmaya et Ain El Barda (1972/73 - 2008/09),

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

La figure III.3, visualise l'évolution ou bien la variation de la pluviométrie annuelle sur une période de 37 ans 1972/73-2008/09 sur l'ensemble du bassin versant d'oued Ressoul, où l'on remarque que le régime annuel est très irrégulier d'une année à une autre. La hauteur maximale des précipitations atteint 893,60 mm en cours de l'année 1986/87, tandis que la hauteur minimale de l'ordre de 277,25 mm a été enregistrées à en 2001/02, La hauteur moyenne est de l'ordre de 597,82 mm.

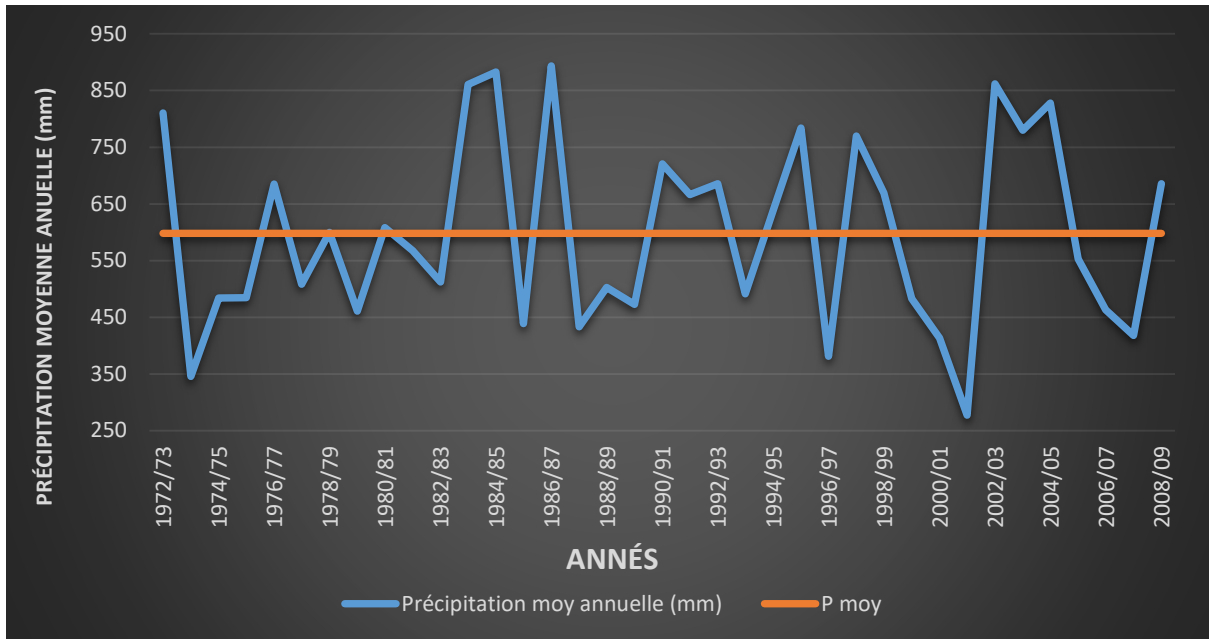


Figure III.3 : Variations des précipitations moyennes annuelles (1972/73 – 2008/09).

III.3.2. Variation moyennes mensuelles des précipitations

Le tableau III.2, représente les valeurs moyennes mensuelles des pluviométries mesurées au niveau de la station de Nechmaya et de la station d'Ain El Berda sur une période d'observation de 37 ans (1972/73-2008/09).

La variation mensuelle est très inégalement répartie dans l'espace et dans le temps. La répartition des précipitations moyennes mensuelles sur la période (1972/1973 – 2008/2009) (Fig.III.4), montre que les mois le plus sec est Juillet avec 3.1 mm à Nechmeya et 2.5 mm à Ain El Berda, et les plus pluvieux sont, Novembre et Décembre et Janvier, (un maximum d'ordre de 96 mm, enregistré en décembre) à la station d'Ain el barda (Annaba), quant au niveau de Nechmaya, nous avons les mois les plus pluvieux sont Décembre, Janvier, Février (un maximum d'ordre de 89 mm, enregistré en décembre).

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

Tableau III.2 : Précipitation moyenne mensuelle de station Ain barda et Nechmaya
(1972/73 - 2008/09)

Stations	Sept	Oct	Nov	déc	janv	févr	Mars	Avr	Mai	Juin	juil	Aout	
Ain El Berda	P(mm)	36.24	54.84	75.38	96.06	92.24	69.66	69.28	61.24	41.43	13.59	2.48	9.15
	<i>Ecart type</i>	29,82	41,94	56,31	57,40	53,34	40,64	44,96	41,53	34,06	15,76	5,13	11,35
	c.v	0,82	0,76	0,75	0,60	0,58	0,58	0,65	0,68	0,82	1,16	2,07	1,24
Nechmaya	P(mm)	29.24	46.02	61.82	88.9	82.61	75.86	71.64	56.43	37.04	13.73	3.09	7.57
	<i>Ecart type</i>	22,62	37,50	58,95	79,78	61,55	67,21	59,67	43,53	38,94	20,38	7,76	10,60
	c.v	0,77	0,81	0,95	0,90	0,75	0,89	0,83	0,77	1,05	1,48	2,51	1,40

c.v : Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type à la moyenne.

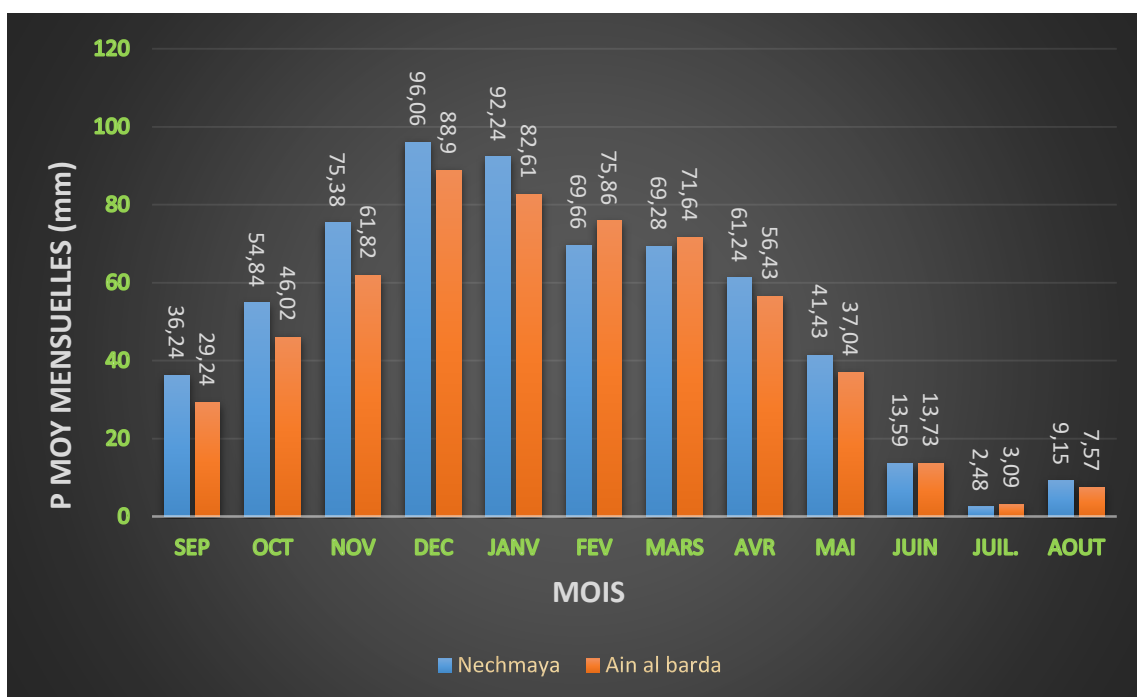


Figure III.4 : Variations des précipitations mensuelles moyennes mensuelles des deux stations d'Ain El Berda et de Nechmaya (1972/73 – 2008/09).

D'après L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles du bassin versant d'oued Ressoul (Figure III.5) montre que le mois le plus pluvieux est Décembre tandis que le mois le plus sec est juillet.

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

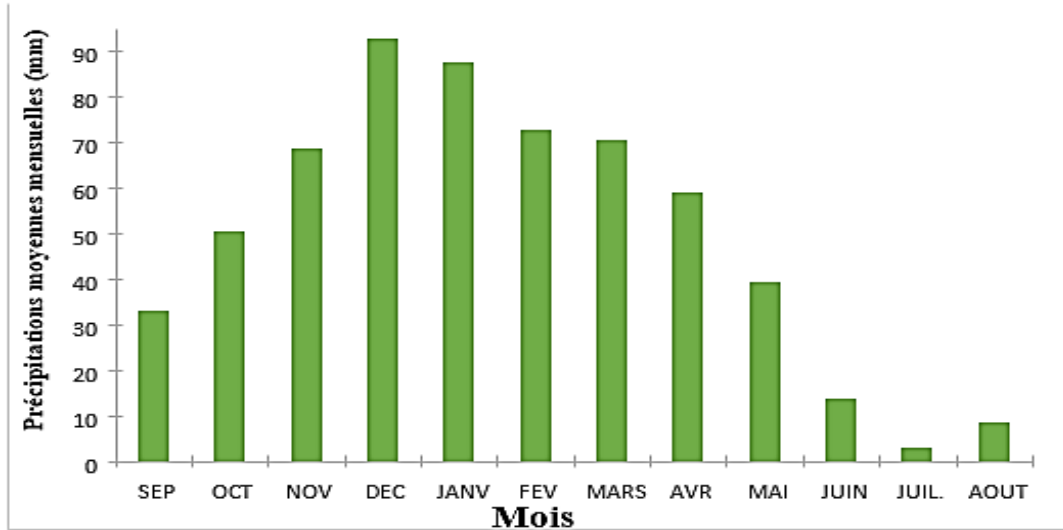


Figure III.5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles, 1972/73- 2008/09

III .3.3. Etude des Températures

La température est un facteur très important régissant les facteurs climatiques et intervenant dans de nombreux calculs d'évapotranspiration. Pour notre étude nous disposons de données de températures (max, moyenne, min) annuelles et mensuelles de la station météorologique d'Annaba (les salines) pour une période de 37 ans (1972/73-2008/09).

III .3.3.1. Variation interannuelle des températures

La température moyenne annuelle, étant de 17.70 °C pour la période (1972/73-2008/09) (Figure III.6) la température maximale atteint 18.54°C en 1987/88, en revanche une température minimale de 16.63°C a été enregistrée en 1974/75.

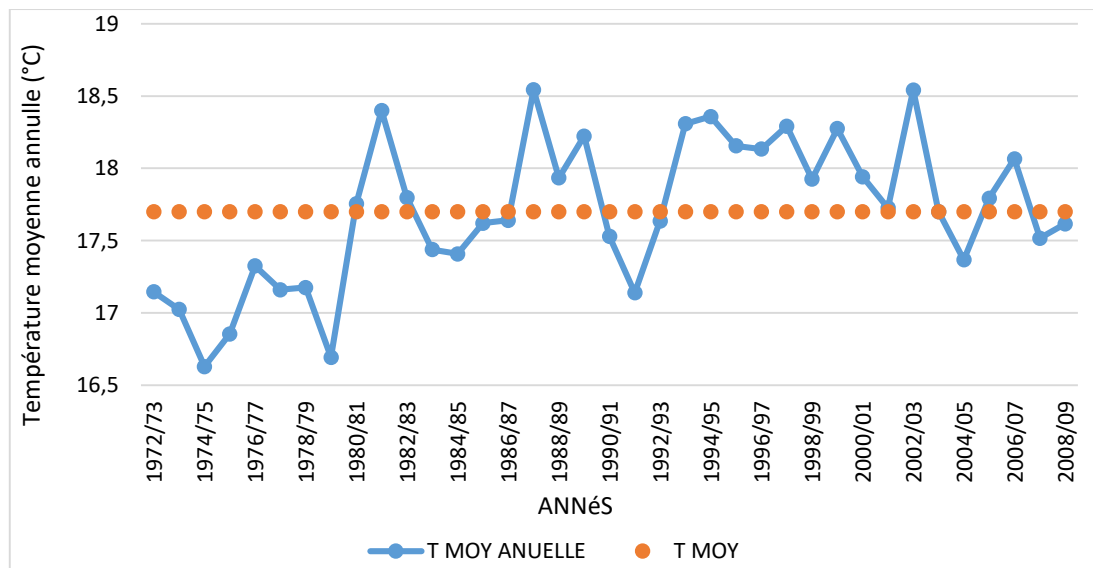


Figure III.6 : Variation interannuelle des températures moyennes 1972/73-2008/09

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

III .3.3.2. Variations mensuelles des températures

Les variations de la température moyenne mensuelle durant la période allant de 1972/1973 à 2008/2009, sont représentées dans (Tab.III.3 et fig.III.7).

Tableau III.3: Valeurs des températures moyennes, maximales et minimales mensuelles (1972/73-2008/09).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Aout
T Max	31,63	28,26	23,02	19,49	18,15	19,02	21,52	23,64	26,46	31,21	33,1	33,89
T moy	23,30	19,88	15,31	12,22	11,20	11,52	13,07	14,9	18,4	22,12	24,88	25,56
T Min	16,92	13,40	9,16	6,32	5,39	5,67	6,35	7,99	11,37	14,91	17,57	18,76

Le tableau ci-dessus, montre que les variations des températures moyennes mensuelles indiquent que le mois de janvier est le plus froid avec (11.20 °c), et le mois d'aout le plus chaud (25.56 °c).

La courbe des maximums (fig. III.7) observés enregistre une valeur maximale de 33.89°C en Aout et une valeur minimale en Janvier de 18.15°C. La courbe des minima observés enregistre une valeur maximale de 18.76°C en Aout et une valeur minimale en Janvier de 5.39°C. La saison chaude s'étend de Mai à Octobre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle, alors que la saison froide correspond à la période allant de Novembre à Avril.

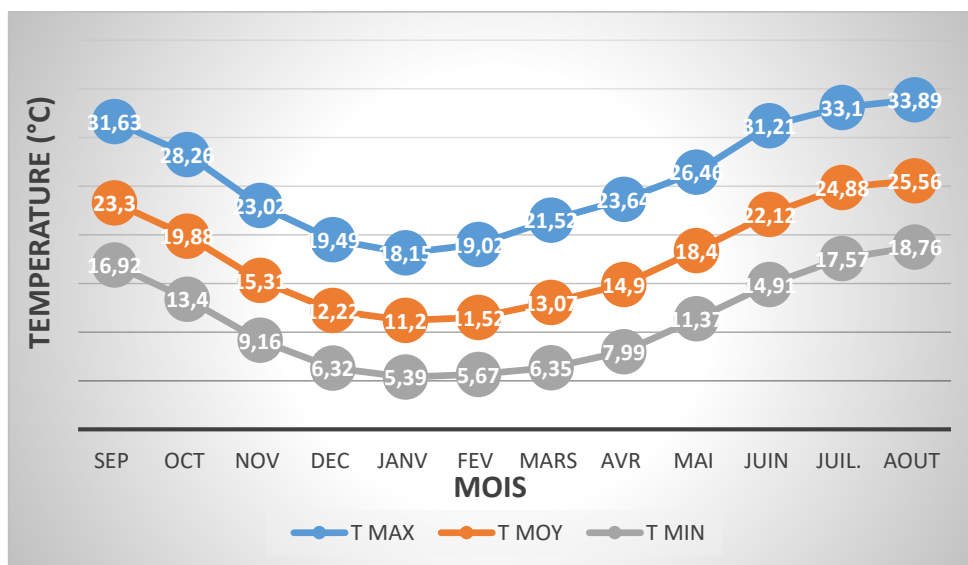


Figure III.7 : Variation des Températures moyennes maximales et minimales mensuelles de la station d'Annaba (1972/73 - 2008/09)

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

III .4. Caractéristique du régime pluviométrique

Pour analyser la variabilité annuelle des précipitations de la station de Annaba, nous avons utilisé l'indice pluviométrique standardisé (SPI : standardized precipitation index). Cet indice est en général utilisé pour déterminer la sévérité de la sécheresse.

Nous l'avons utilisé dans ce travail pour caractériser les années sèches et humides au cours de la période d'étude 1972/73-2008/09. Le SPI correspond à la différence entre la pluie de l'année i (P_i) et la pluie moyenne (P_{moy}) par rapport à l'écart-type (σ) (BENDAOUH 2018).

$$SPI= P_i - P_{moy}/\sigma \quad \text{Equation III.1}$$

Tableau III.4 : Classification de la sécheresse selon le SPI (BENDAOUH, 2018)

Classes du SPI	Degré de la sécheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1,5 < SPI < 2$	Humidité forte
$1 < SPI < 1,5$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 1$	Normale
$-1,5 < SPI < -1$	Sécheresse modérée
$-2 < SPI < -1,5$	Sécheresse forte
$SPI < -2$	Sécheresse extrême

La répartition graphique du SPI (figure. III.8) met en évidence la succession entre années humides et sèches. La courbe de tendance en rouge montre plus clairement cette succession, en effet nous distinguons une période sèche s'étalant entre 1973 /1974 et 1982/1983.

On remarque que le régime annuel est très irrégulier d'une année à une autre durant la période entre 1983/84 et 2008/09 des périodes humides et sèches et enfin un retour à l'humidité à partir de 2005/2006 à 2008/2009. En général, la variance varie dans l'intervalle] -2 ; 2[.

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

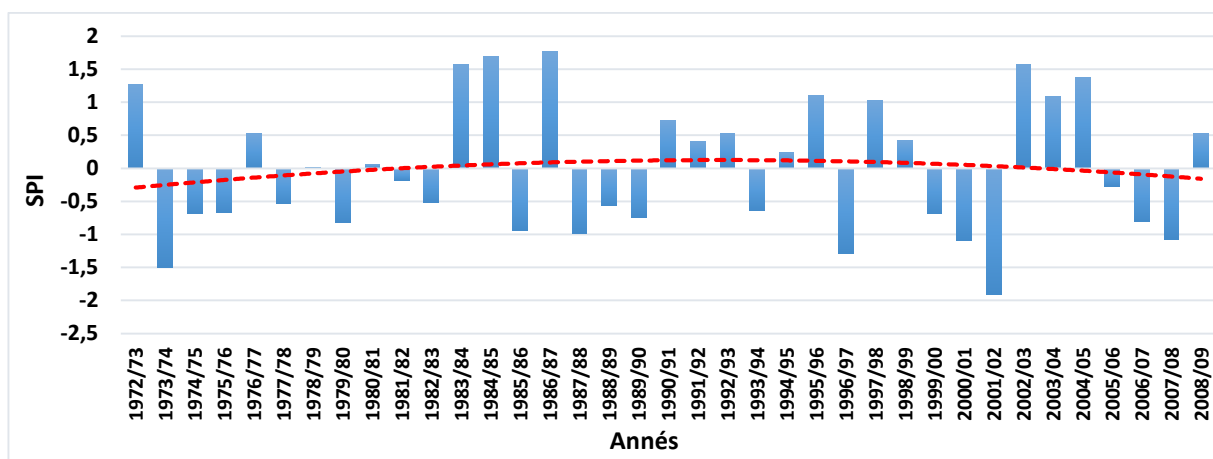


Figure III.8 : évolution de SPI au cours de la période d'étude 1972/73-2008/09

Tableau III.5: Fréquence des classes de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

Classe du SPI	Nombre d'années	Pourcentage %
Humidité forte	4	11
Humidité modérée	4	11
Normale	23	63
Sècheresse modérée	4	11
Sècheresse forte	1	3

Les résultats obtenus du SPI indique une situation variée entre la sécheresse, la normalité et l'humidité où, 14 % des années présentent une sécheresse, et 63 % des années présentent une normalité absolue, tandis que le reste s'inscrit dans un contexte humide avec un pourcentage égal à 22 %.

Toutes les valeurs de SPI négatifs représentent une année sèche, par contre les valeurs positives indiquent une année humide.

III .5. Etude des Evapotranspirations (méthode Thorntwaite)

L'évapotranspiration est le processus d'évaporation de l'eau à partir des surfaces libres et de transpiration des plantes. Elle joue un rôle essentiel dans le cycle de l'eau et a des impacts importants sur l'environnement. Sa mesure et son estimation sont d'une grande importance pour la gestion des ressources en eau et la compréhension des écosystèmes.

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

Selon Penman (1956), l'évapotranspiration potentielle (ETP) est définie comme l'évaporation à partir d'une surface de gazon court, en pleine croissance, couvrant uniformément le sol et ayant une réserve d'eau adéquate. En d'autres termes, l'ETP représente l'évapotranspiration maximale d'une couverture végétale. Les expériences menées sur des lysimètres ont conduit Thornthwaite (1954) à conclure que, pour de grandes surfaces et de longues périodes de temps, la température est le facteur le plus influent sur l'ETP.

La formule proposée par Thornthwaite est applicable lorsque la température moyenne mensuelle de la zone est inférieure à 26,5 °C. Si la température moyenne mensuelle atteint ou dépasse 26,5 °C, les valeurs de l'ETP non corrigée sont directement obtenues à partir d'une table de correspondance (Tableau III.6).

Il est important de noter que la méthode de Thornthwaite est basée sur des hypothèses simplificatrices et peut ne pas être aussi précise que d'autres méthodes plus avancées qui prennent en compte des facteurs supplémentaires tels que l'humidité de l'air, la vitesse du vent, etc. Cependant, elle offre une estimation raisonnable de l'ETP potentielle dans les régions où les données météorologiques détaillées ne sont pas disponibles.

Tableau III.6: Evapotranspiration potentielle non corrigée en fonction de la température moyenne. (YAHY et ZAIDI.2014)

T [°C]	ETP _{NC} [mm]	T [°C]	ETP _{NC} [mm]	T [°C]	ETP _{NC} [mm]	T [°C]	ETP _{NC} [mm]
26,5	135	29,5	158,9	32,5	175,3	35,5	183,7
27	139,5	30	162,1	33	177,2	36	184,3
27,5	143,7	30,5	165,2	33,5	179	36,5	184,7
28	147,8	31	168	34	180,5	37	184,9
28,5	151,7	31,5	170,7	34,5	181,8	37,5	185
29	155,4	32	173,1	35	182,9	38	185

$$ETP = k * 16 * \left(\frac{10 * T}{I}\right)^a \quad \text{Equation III.2}$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigée [mm] ;

T : Température moyenne mensuelle de l'air [°C] ;

$$a: 6.75*10^{-7}, I^3 - 7.71*10^{-5} * I^2 + 1.79*10^{-2} * I + 0.49 \quad \text{Equation III.3}$$

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

I : Indice thermique annuel, donné par :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i_m \quad \text{Equation III.4}$$

D'où :

$$i_m = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad \text{Equation III.5}$$

i_m : Indice thermique mensuel ;

K : Coefficient correctif dépendant de la latitude et donné par la Tableau suivante :

Tableau III.7 : Variation des facteurs de corrections 'K' aux stations météorologiques de d'Annaba. (BOUGUERRA,2019)

Station	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Annaba	0,862	0,848	1,035	1,1	1,223	1,225	1,245	1,171	1,038	0,973	0,854	0,837

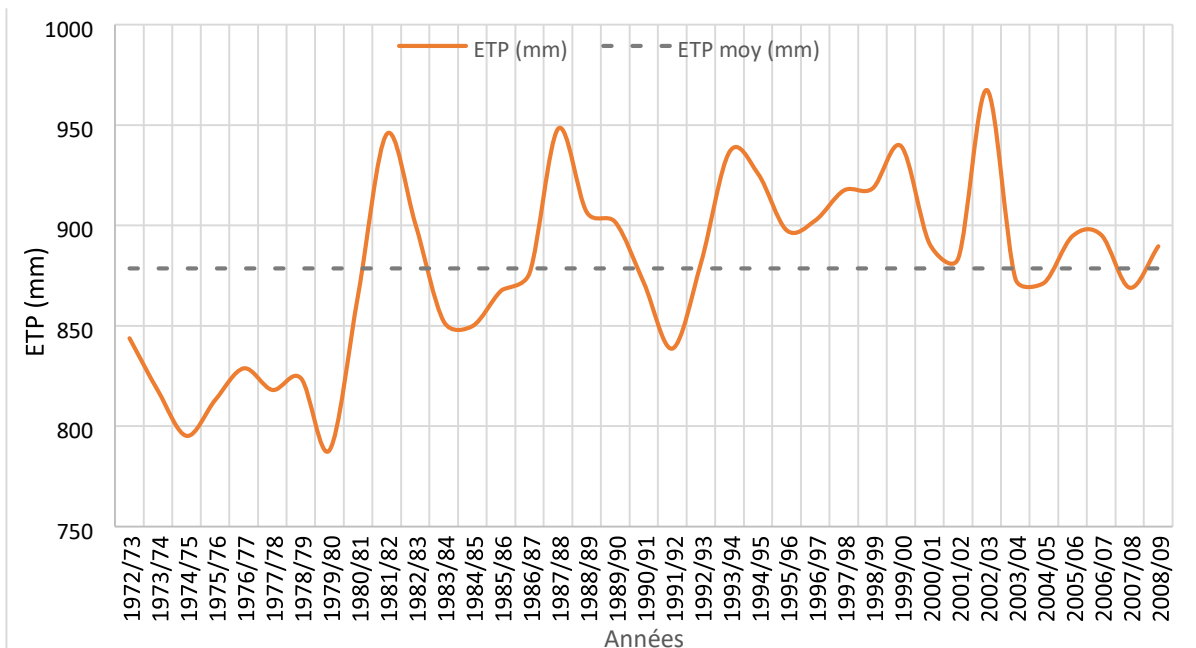


Figure III.9 : Variation interannuelles de l'ETP (Thorntwaite) de la station d'Annaba (1972/73 -2008/09).

La figure III.9 montre les valeurs annuelles de l'ETP de Thornthwaite, l'ETP a été enregistrée sur une période de 37 ans (1972/73 à 2008/09). Une carence marquée en ETP a été enregistrée dans les années 1972-82 ; En raison de la diminution de la température (voir Figure III.8), la valeur la plus élevée a été enregistrée au cours de l'année 2003/04.

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

III.6. Etude hydrologique

Afin d'avoir une vue sur le régime d'écoulement des cours d'eau dans cette étude, une station hydrométrique a été sélectionnée ; la station de Ain Berda qui reçoit toutes les eaux provenant du bassin versant de l'oued Ressoul (101,24 km²). Des séries de mesures de longue durée d'observation ont été fournies par le service hydrologique de l'ANRH.

III.6.1 Variation interannuelle de l'écoulement

Le débit est très variable d'une année à l'autre (Tableau. III.8), et le débit à la station de mesure hydrologique est très important ; le débit moyenne du bassin versant du Ressoul à la station d'Ain Berda est de 0,43 m³/s (1972/73-2008/09), correspondant à un apport annuel moyen d'environ 13,61 Hm³, la zone de drainage est de 101,24 km². Le rapport suivant :

$$\frac{Q_i}{Q_{moy}} = C_{h.a} \quad \text{Equation III.6}$$

$C_{h.a}$: Coefficient d'hydraulicité,

Q_i : Débit annuelle m³/s,

Q_{moy} : Débit moyenne annuelle m³/s.

Tableau III.8 : Variation interannuelle des débits (1972/73-2008/09)

<i>Année</i>	Débit (m³/s)	Ch. a		<i>Année</i>	Débit (m³/s)	Ch. a
<i>1972/73</i>	1,03	2,405		<i>1991/92</i>	0,30	0,689
<i>1973/74</i>	0,03	0,066		<i>1992/93</i>	0,65	1,506
<i>1974/75</i>	0,09	0,209		<i>1993/94</i>	0,24	0,550
<i>1975/76</i>	0,12	0,285		<i>1994/95</i>	0,51	1,195
<i>1976/77</i>	0,46	1,072		<i>1995/96</i>	0,66	1,535
<i>1977/78</i>	0,20	0,463		<i>1996/97</i>	0,02	0,052
<i>1978/79</i>	0,31	0,727		<i>1997/98</i>	0,33	0,776
<i>1979/80</i>	0,01	0,033		<i>1998/99</i>	0,65	1,502
<i>1980/81</i>	0,35	0,814		<i>1999/00</i>	0,17	0,407
<i>1981/82</i>	0,23	0,535		<i>2000/01</i>	0,16	0,373
<i>1982/83</i>	0,34	0,800		<i>2001/02</i>	0,01	0,013
<i>1983/84</i>	0,92	2,143		<i>2002/03</i>	1,51	<u>3,522</u>
<i>1984/85</i>	0,93	2,167		<i>2003/04</i>	0,49	1,141
<i>1985/86</i>	0,07	0,155		<i>2004/05</i>	1,25	2,903
<i>1986/87</i>	1,27	2,943		<i>2005/06</i>	0,60	1,396
<i>1987/88</i>	0,00	<u>0,009</u>		<i>2006/07</i>	0,37	0,862
<i>1988/89</i>	0,12	0,277		<i>2007/08</i>	0,13	0,293
<i>1989/90</i>	0,13	0,308		<i>2008/09</i>	0,57	1,315
<i>1990/91</i>	0,77	1,794				

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

Le cours d'eau étudié est caractérisé par l'irrégularité de leur débit, ce qui est confirmé par l'hydraulicité interannuelle de ces cours d'eau. L'analyse des résultats des coefficients d'hydraulicités annuels (Ch. a) obtenus sur la période 1972/1973 - 2008/2009 pour celle de Ain Berda, ont permis de classer les deux années hydrologiques. On peut classer l'année hydrologique 2002/2003 comme la plus humide et 1987/1988 comme la plus sèche à la station d'Ain Berda.

L'analyse de la répartition des annuels sur les périodes d'observation, a montré clairement les années déficitaires et excédentaires, la station d'Ain Berda montre 15 ans excédentaires et 22 ans déficitaires sur 37 ans d'observation. La longue période déficitaire s'observe durant les années soixante-dix (Figure III.10).

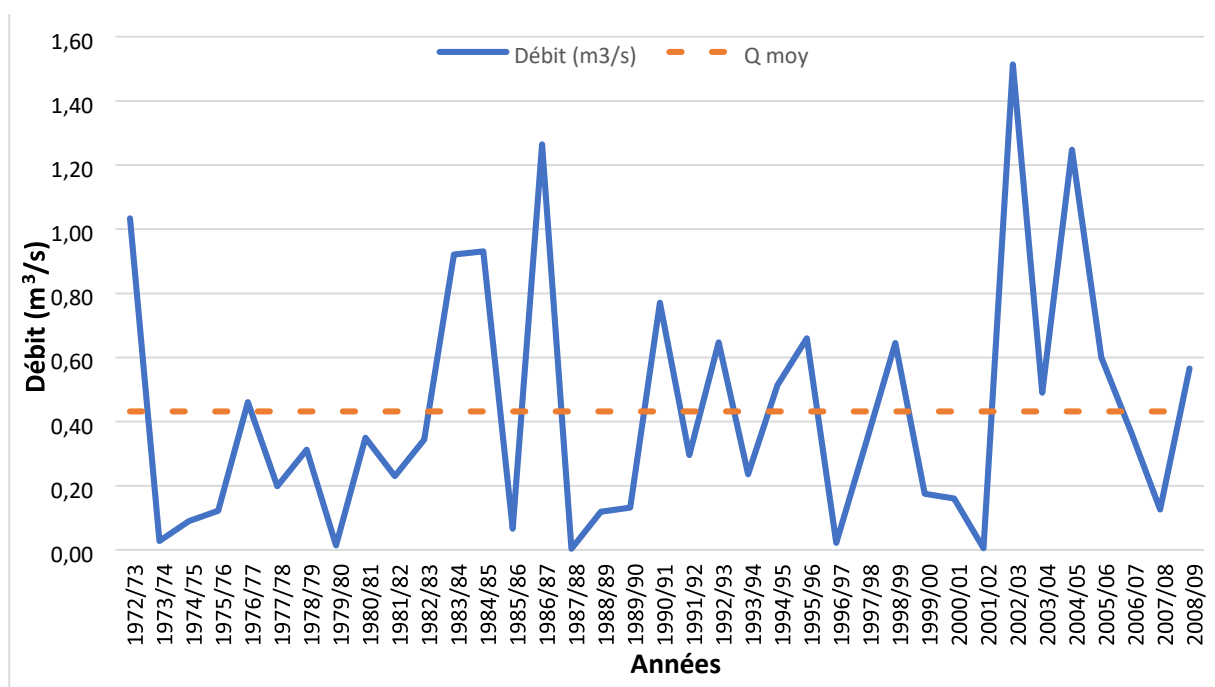


Figure III.10 : Variations interannuelles des lames d'eau écoulées (1972/73-2008/09).

III .7. Variation mensuelle de l'écoulement

La variation du régime d'écoulement d'un cours d'eau à l'échelle mensuelle est définie par son coefficient d'hydraulicité (C_h) (tableau III.4), qui représente le rapport entre le débit moyen mensuel du mois considéré au débit moyen interannuel obtenu après le traitement de la longue série d'observation. En effet, la période de hautes eaux se caractérise par une hydraulicité supérieure au seuil de référence (1), et contrairement pour la période de basses eaux le coefficient d'hydraulicité est inférieur à la valeur 1.

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

Tableau III.9: Variation mensuelle de débits et de coefficients d'hydraulicité (1972/73-2008/09)

<i>Mois</i>	<i>Q (m³/s)</i>	<i>Ch.m</i>
<i>SEP</i>	0,01	0,019
<i>OCT</i>	0,04	0,087
<i>NOV</i>	0,32	0,723
<i>DEC</i>	0,59	1,35
<i>JANV</i>	1,12	2,58
<i>FEV</i>	1,22	2,81
<i>MARS</i>	0,94	2,2
<i>AVR</i>	0,71	1,64
<i>MAI</i>	0,21	0,48
<i>JUIN</i>	0,04	0,08
<i>JUIL.</i>	0,00	0,011
<i>AOUT</i>	0,00	0,011

L'analyse de la répartition du coefficient d'hydraulicité mensuel le long de l'année, nous a permis le mois de Février est le plus humide et la période de Décembre à Avril comme étant une période de hautes eaux en raison de l'importance des précipitations tombées dans cette dernière. Pendant les mois restants le régime d'écoulement d'oued devient faible, notamment au mois d'Août et juillet. Durant cette période (basses eaux), les débits moyens mensuels sont compris 0 m³/s (figure III.11).

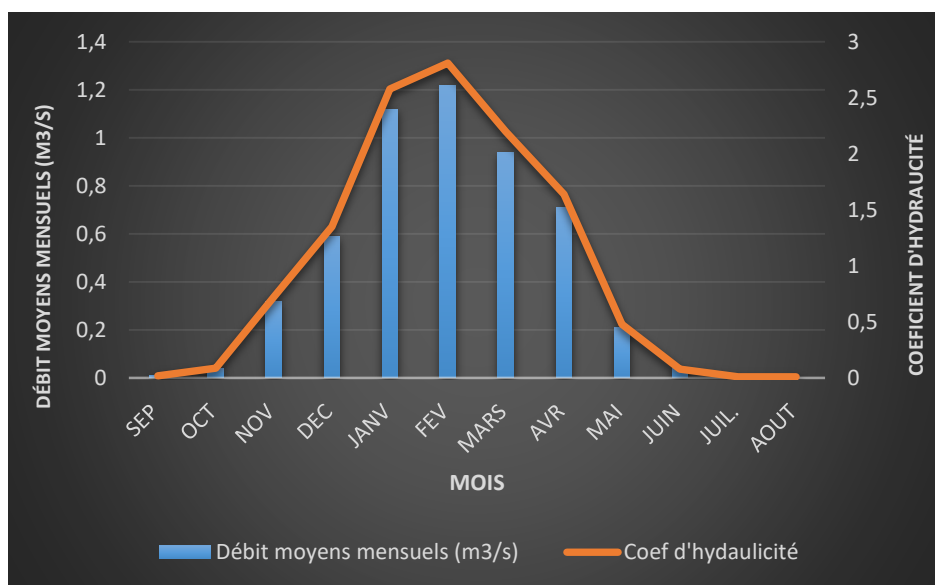


Figure III.11 : Représentation graphique des coefficients d'hydraulicité mensuels (1972/73-2008/09).

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

III.8. Ruissellement (R)

La lame d'eau ruisselée est obtenue par l'application de la relation empirique de TIXERONTBERKALOFF. Cette relation fait intervenir la précipitation moyenne annuelle et l'évapotranspiration potentielle, dont l'expression est la suivante :

$$R = \frac{P^3}{3*(ETP)^2} \quad \text{Equation III.}$$

Avec :

R : Lame d'eau ruisselée [mm] ;

P : Précipitation moyenne annuelle [mm] ;(597.82mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle [mm]. (878.64mm).

R = 92.25mm = 0.092 m.

III.9. Conclusion

L'étude climatique menée sur les stations de Nechmaya et d'Ain El Barda sur une période de 37 ans, de 1972/73 à 2008/09, a permis de caractériser la région comme ayant un climat subhumide à hivernale relativement chaude. Voici les principaux paramètres relevés :

1. Précipitations :

- La moyenne pluviométrique enregistrée sur les 37 ans est de 597,82 mm/an.
- Le mois de décembre est généralement le plus humide, tandis que juillet et août sont les mois les plus secs.

2. Températures :

- La température moyenne annuelle enregistrée à la station d'Annaba (1972/73-2008/09) est de 17,70°C.
- Le mois de janvier est le plus froid, avec une température moyenne de 11,10°C.
- Le mois d'août est le mois le plus chaud.

3. Évapotranspiration potentielle :

- L'évapotranspiration potentielle moyenne, qui représente la quantité d'eau qui pourrait s'évaporer si elle était disponible, est importante et égale à 878,64 mm/an.

CHAPITRE III. Hydro-climatologique

4. Ruissellement :

- Le ruissellement, c'est-à-dire la quantité d'eau qui s'écoule en surface, est de 92,25 mm/an.

5. l'indice pluviométrique standardisé :

L'évolution de l'indice de précipitation standardisé (SPI), indique une variabilité temporelle de précipitation. Cette variabilité caractérisée par une alternance des phases humides, sèches et proche de normal avec un pourcentage égal à 63 % pour l'ensemble du bassin.

Ces données permettent de mieux comprendre le climat de la région étudiée et ses caractéristiques en termes de précipitations, de températures et de flux d'eau.

CHAPITRE IV :
Modélisation Pluie-Débit De
L'oued Ressoul

IV.1. Introduction

Le modèle hydrologique joue un rôle essentiel dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, l'utilisation rationnelle de ses ressources en eau et la prévention des catastrophes naturelles telles que les crues. Grâce aux avancées significatives en informatique et en Systèmes d'Informations Géographiques, les modèles hydrologiques distribués intègrent une représentation de plus en plus détaillée du bassin versant et des processus hydrologiques. Cependant, en raison de la multitude de paramètres impliqués et de la complexité de ces bassins, cette approche spécialisée ne garantit pas nécessairement de meilleurs résultats.

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser un modèle hydrologique global qui nécessite peu de paramètres mais est capable de représenter le comportement hydrologique de notre bassin. Les modèles GR (Génie Rural), développés par le Cemagref, sont réputés pour leur robustesse et leur faible nombre de paramètres de calibration. Pour notre étude, nous utiliserons le modèle GR2M, qui vise à déterminer les paramètres caractéristiques de ce modèle pour le bassin versant d'Oued Ressoul. L'objectif est de déterminer le modèle le plus approprié et performant pour notre bassin versant en se basant uniquement sur les données de pluviométrie, de débits, d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de la superficie du bassin versant.

IV.2. Modélisation de la relation Pluie –Débit par l'utilisation du modèle GR2M

Au cours des vingt dernières années, de nombreux modèles hydrologiques ont été développés, en particulier en ce qui concerne la corrélation entre les précipitations et les débits. Ces modèles sont devenus des outils indispensables pour toutes les études et recherches liées à l'estimation, à la valorisation et à la gestion des ressources en eau. Parmi ces modèles, ceux du Génie Rural se distinguent par leur faible nombre de paramètres et leur capacité à représenter le comportement hydrologique d'un bassin. Ils ont été testés sur des bassins versants de tailles variées, allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km², et dans des contextes climatiques divers. Ils sont également utilisés dans de nombreux domaines opérationnels tels que la prédétermination des crues, la prévision des crues et des étiages, la détection d'impacts, ainsi que la gestion et le dimensionnement des ouvrages. Nous avons choisi d'utiliser la version Excel de ces modèles, disponible sur le site du CEMAGREF.

Pour prédire les débits mensuels, nous avons utilisé comme entrées du modèle les valeurs mensuelles des précipitations observées (en mm), les ETP calculées selon la méthode de

CHAPITRE IV. Modélisation pluie-débit de l'oued Ressoul

Thornthwaite (en mm), ainsi que les débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (en mm). Les débits en lames d'eau écoulées mensuelles, relatifs à la période 1972/73-2008/09, proviennent de la station d'Ain el barda.

Concernant le choix de la période de calage et validation, il faut rappeler que la série de données pluviométriques n'est pas stationnaire. A cet effet, ce travail va nous permettre également d'évaluer la performance du modèle face à un changement de moyenne et donc de tester sa sensibilité face aux changements climatiques. Pour ce faire nous avons étudié trois cas :

- Cas n°1 : cas d'une série de donnée pluviométrique non stationnaire :

Dans ce cas nous avons choisi la période totale (1972/73 - 2008/09).

- Cas n°2 : cas d'une série de donnée pluviométrique stationnaire :

Dans ce cas nous avons choisi la période (1972/73 - 1982/83) comme période sèche.

- Cas n°3 : cas d'une série de donnée pluviométrique stationnaire :

Dans ce cas nous avons choisi la période (09/1991-08/1994) comme période humide.

IV. 2. 1. Calage et validation de la période totale:

Les paramètres de calage X1 et X2 ont été fixé en utilisant le solveur. Le Solveur est un outil qui permet l'optimisation des paramètres X1 et X2. C'est une macro programmée sur une feuille Excel, donc facile à manipuler, et dont le but est de minimiser l'écart entre la valeur observée et la valeur simulée. Le principe de fonctionnement du Solveur est basé sur le calcul de l'écart entre le débit observé et le débit simulé. La valeur de la somme des carrés des écarts est alors par le solveur pour obtenir la bonne combinaison de calage X1 et X2 permettant un meilleur ajustement du modèle. Les données utilisées sont relatives à la période allant de Septembre 1972 à Aout 1997. Les résultats du calage, coefficient de détermination, et le Nash sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau. IV.1 : Résultats du calage de GR2M (1972/1973 – 1996/1997).

Paramètres	X1	X2	Nash %	R²
Valeurs	5,20	0,71	83,4	0.85

CHAPITRE IV. Modélisation pluie-débit de l'oued Ressoul

X_1 : Capacité du réservoir de production (mm),

X_2 : Paramètre d'échange (mm),

Nash : critère (%)

R^2 : Coefficient de détermination.

D'après les valeurs du critère de Nash et du coefficient de détermination obtenues à partir de la formule de l'ETP de Thornthwaite, ainsi que la bonne superposition des courbes des débits observés et simulés (voir Tableau IV.1. et Figure IV.1), il semble que le calage soit correct.

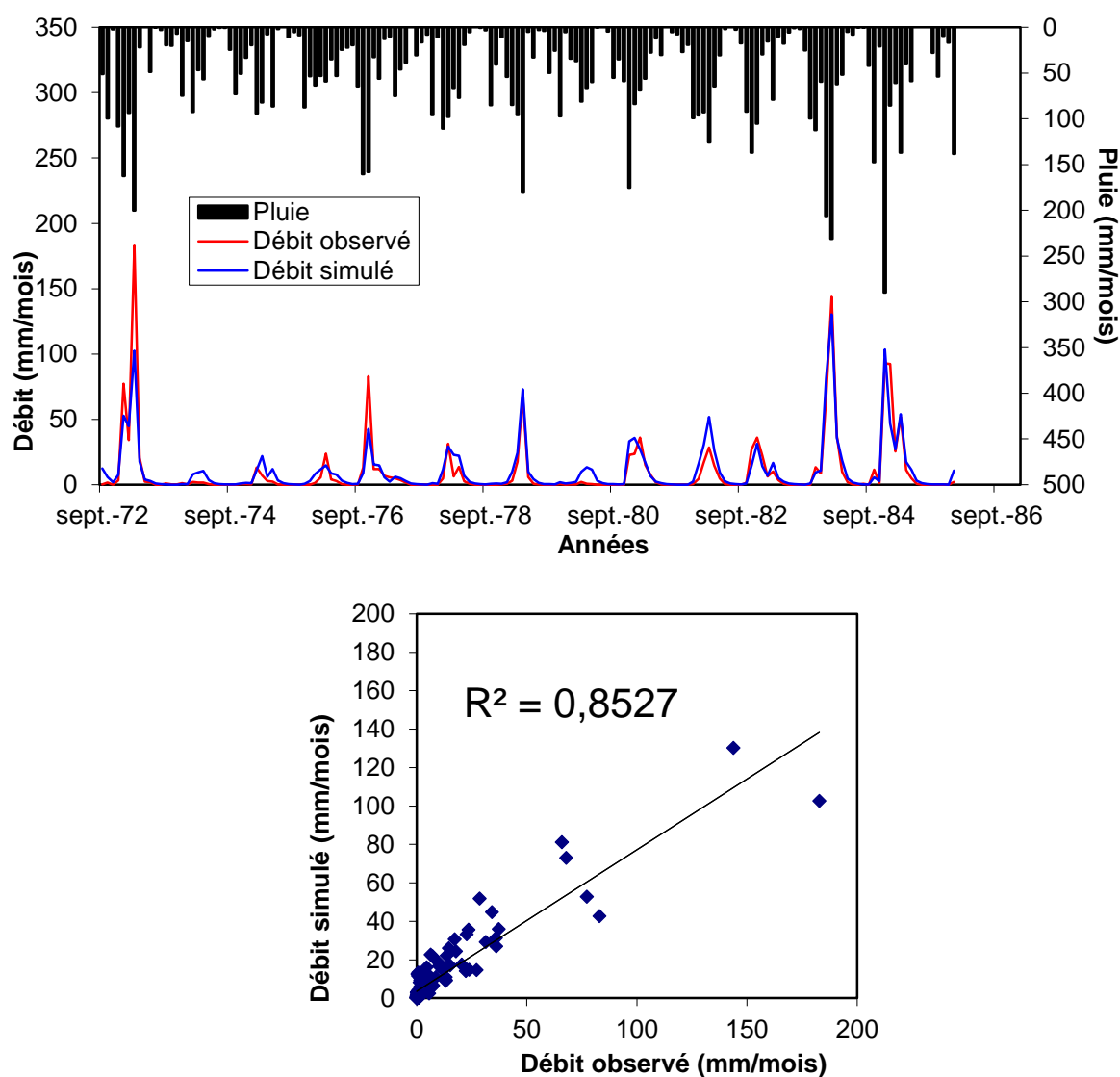


Figure IV.1: Résultats du calage du modèle GR2M (1972/1973 – 1996/1997)

CHAPITRE IV. Modélisation pluie-débit de l'oued Ressoul

On a appliqué enfin, les paramètres optimaux obtenus lors de la période de calage sur la période de validation, et on a jugé le modèle par les critères d'évaluation numériques et graphiques. La validation du modèle a été effectuée avec la série allant (09/1997-08/2009). Les résultats sont résumés dans le tableau Tableau IV.2

Tableau IV.2 : Résultats de validation du modèle GR2M (1997/98 – 2008/09)

Paramètres	X ₁ [mm]	X ₂ [mm]	Nash %	R ²
Valeurs	5,20	0,71	74,2	0.80

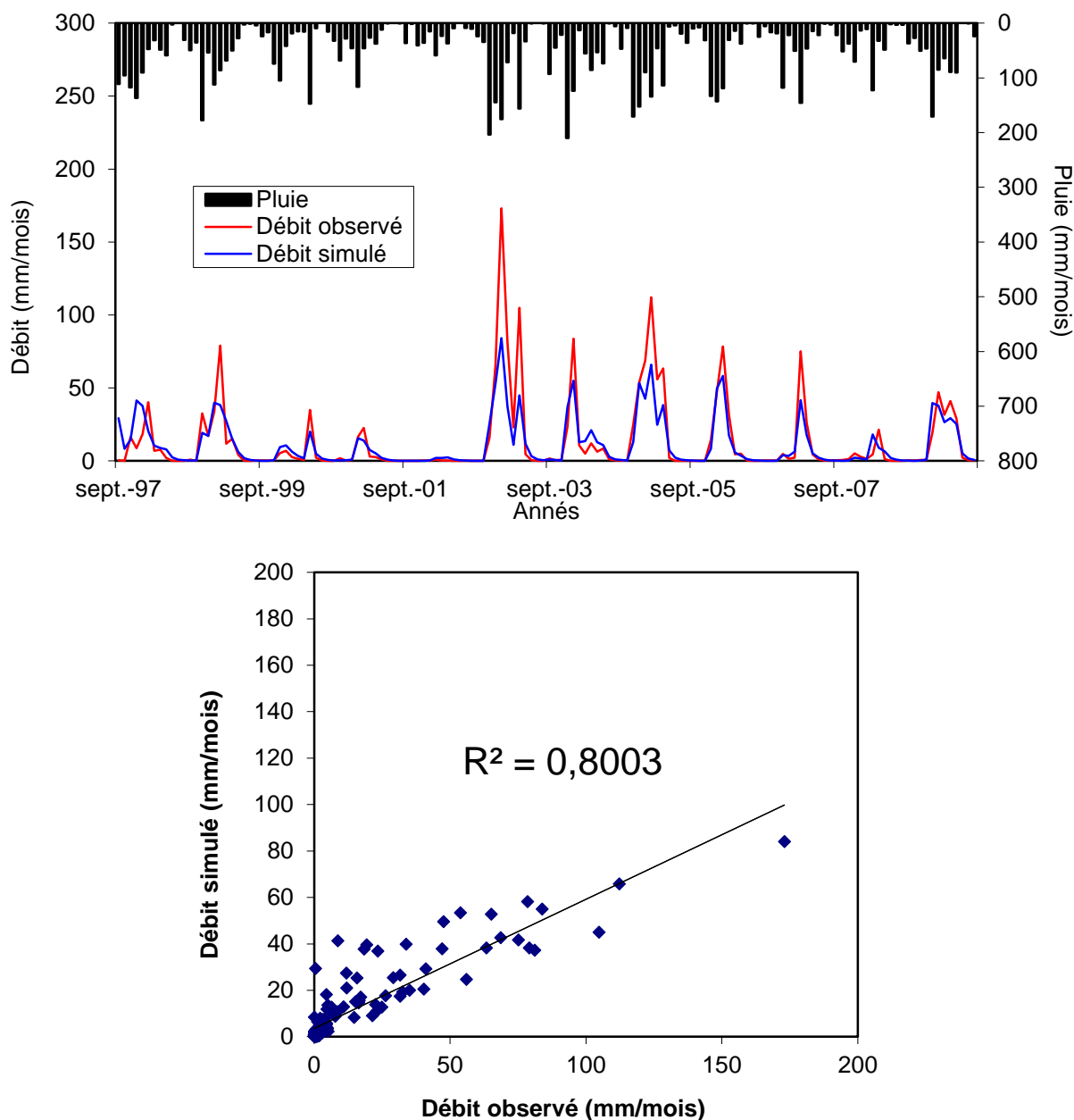


Figure IV.2 : les résultats de Validation du modèle GR2M (09/1997-08/2009).

❖ Interprétations des résultats du calage et validation

Le calage du modèle au cours de la période (09/1972-08/1997) montre des résultats satisfaisants avec un critère de Nash de 83,4 % et un R^2 de 85 %. La validation du modèle sur la période (09/1997-08/2009) montre des résultats satisfaisants du fonctionnement hydrologique du bassin, le critère de Nash est presque le même du calage (74,2%) et le R^2 est de 80 % plus faible. Ceci montre bien l'influence du changement de moyenne des précipitations sur la performance du modèle à simuler la réponse hydrologique du bassin.

IV. 2. 2. Calage et validation du période sèche

Dans ce cas nous avons cherché à caler les deux paramètres X_1 et X_2 du modèle jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination et du critère de Nash. La période choisie pour le calage est celle comprise entre (09/1977-08/1983). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau Tableau. IV.3

Tableau. IV.3: Résultats du calage de GR2M (09/1977-08/1983)

Paramètres	X_1 [mm]	X_2 [mm]	Nash %	R^2
Valeurs	5,23	0,63	84,7	0.83

Pour la validation, nous utilisons des séries des données des précipitations, du débit et d'évapotranspirations correspondant à la période de (09/1973-08/1976) et qui n'ont pas été déjà introduites dans le modèle.

Le tableau Tableau IV.4 résume les résultats de la validation du modèle GR2M, les coefficients de détermination (débits simulés /débits observés).

Tableau IV.4 : Résultats de validation du modèle GR2M (09/1973-08/1976)

Paramètres	X_1 [mm]	X_2 [mm]	Nash %	R^2
Valeurs	5,23	0,63	44,8	0.44

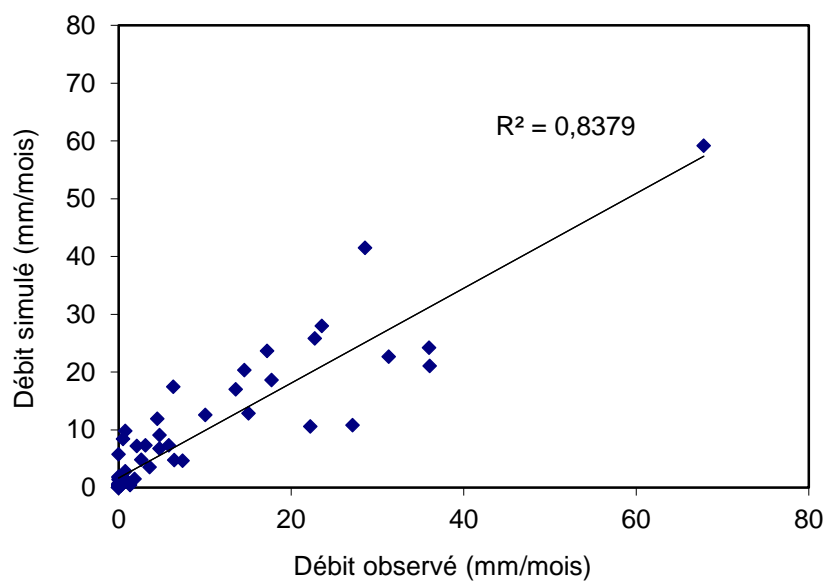
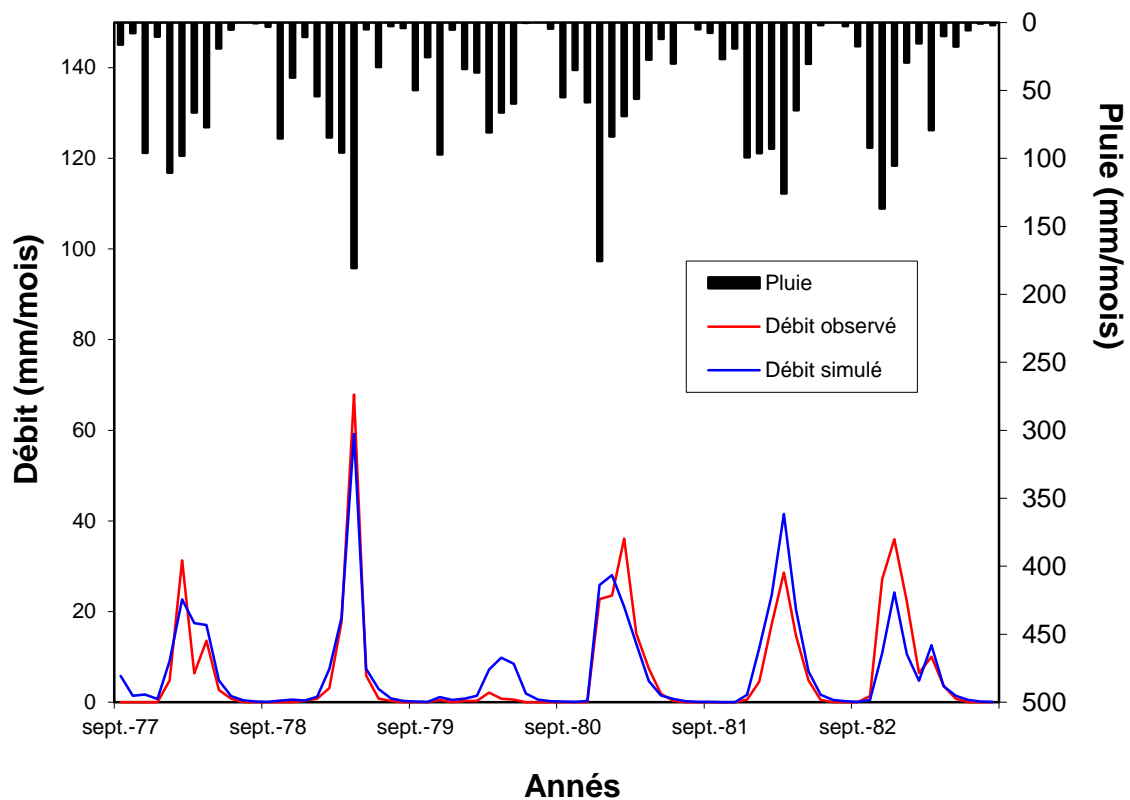


Figure IV.3: Résultats du calage du modèle GR2M (09/1977-08/1983)

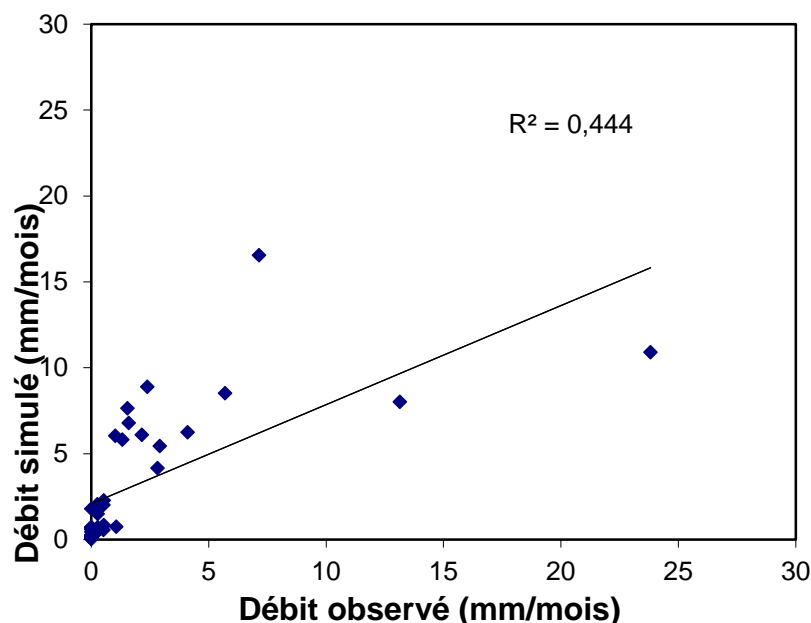
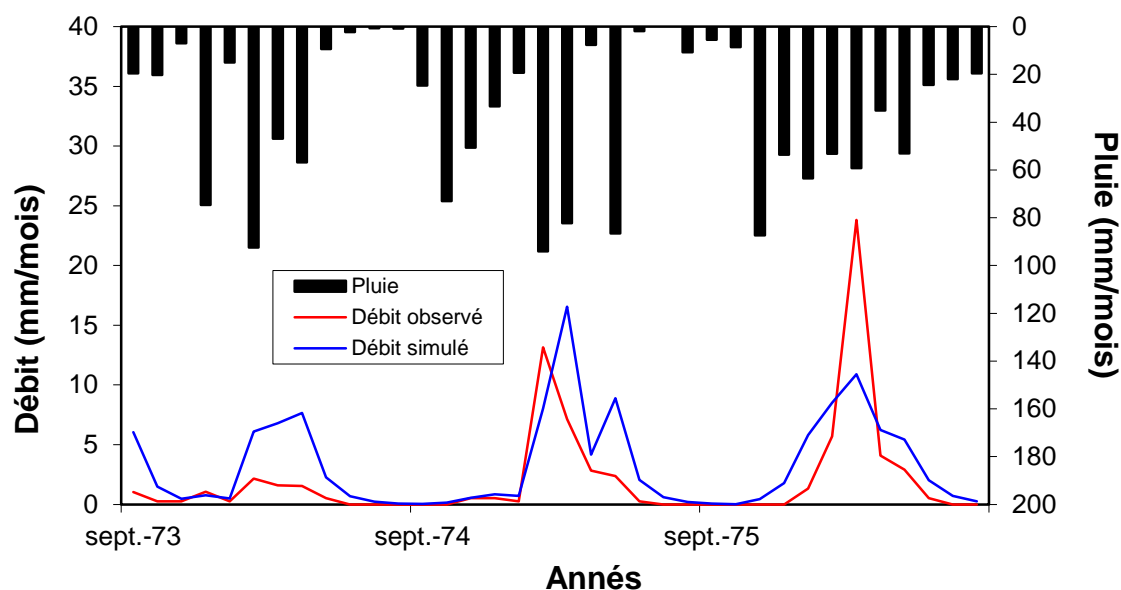


Figure IV.4: Résultats de la validation du modèle GR2M (09/1973-08/1976)

❖ **Interprétations des résultats du calage et validation de la période sèche**

Le calage du modèle au cours de la période (09/1977-08/1983) montre des résultats très satisfaisants avec un critère de Nash de 84,7 % et un R^2 de 83 %. La validation du modèle sur la période (09/1973-08/1976) montre une mauvaise représentation du fonctionnement hydrologique du bassin, le critère de Nash est très faible (44,8 %) et le R^2 est de 44 %. Ceci se traduit graphiquement par des pics assez loin de celles observés (Figure IV.4)

Calage et validation (09/1973-08/1983)

En appliquant le calage inversé pour la période sèche le calage du modèle a été effectué avec la série allant (09/1973-08/1979).

Tableau IV.5 : Résultats du calage du modèle GR2M (09/1973-08/1979)

Paramètres	X ₁ [mm]	X ₂ [mm]	Nash %	R ²
Valeurs	4,73	0,64	80,8	0.81

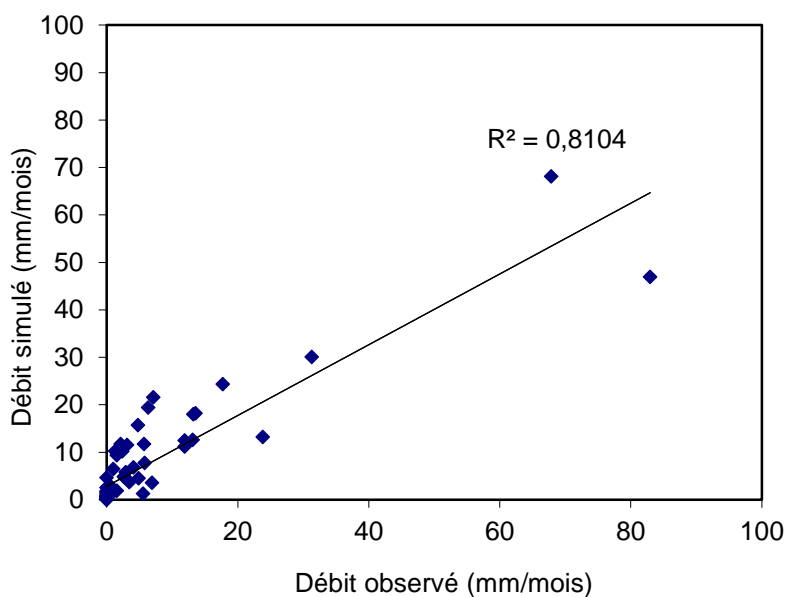
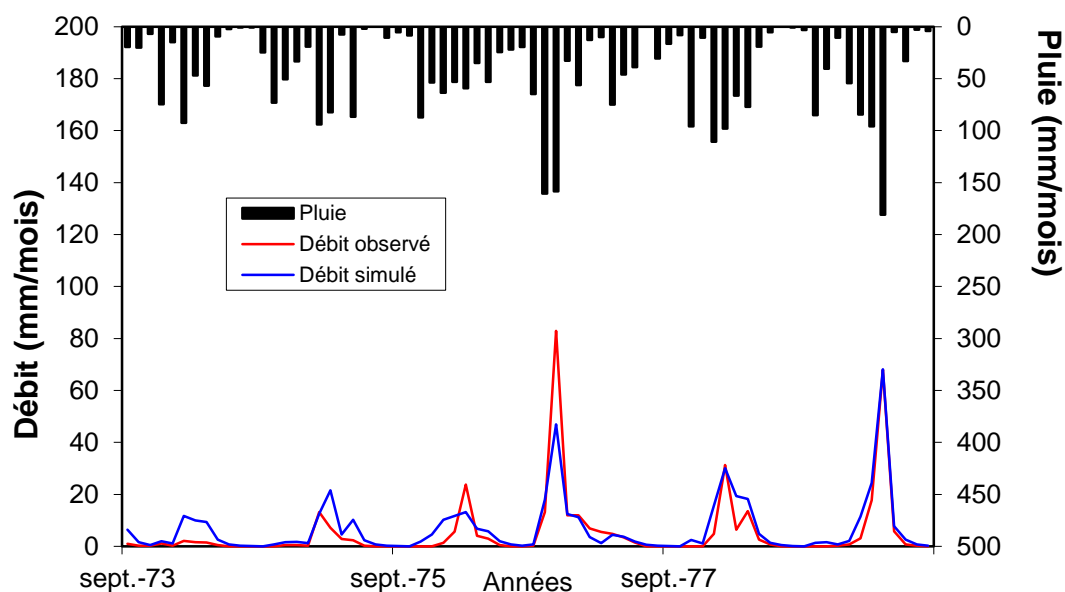


Figure IV.5: Résultats du calage du modèle GR2M (09/1973-08/1979)

CHAPITRE IV. Modélisation pluie-débit de l'oued Ressoul

La validation du modèle a été effectuée avec la série allant (09/1977-08/1980)

Tableau IV.6 : Résultats de validation du modèle GR2M (09/1979-08/1983)

Paramètres	X_1 [mm]	X_2 [mm]	Nash %	R^2
Valeurs	4,73	0,64	60,6	0.73

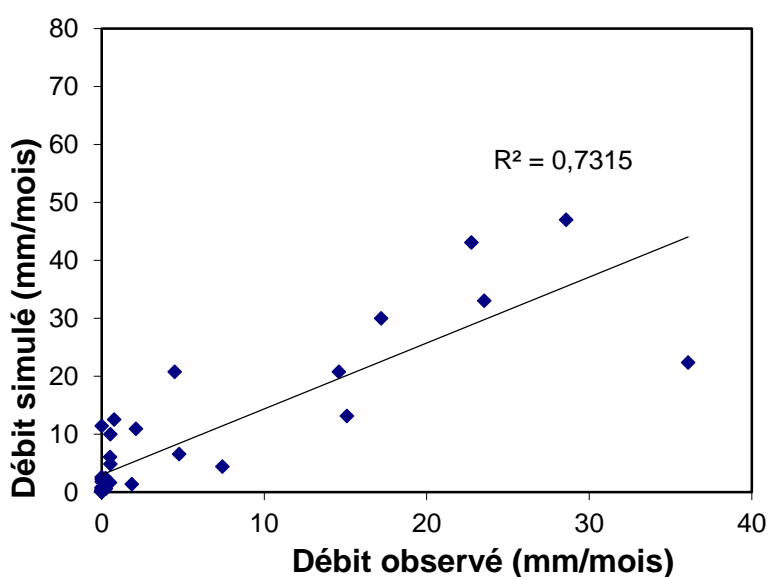
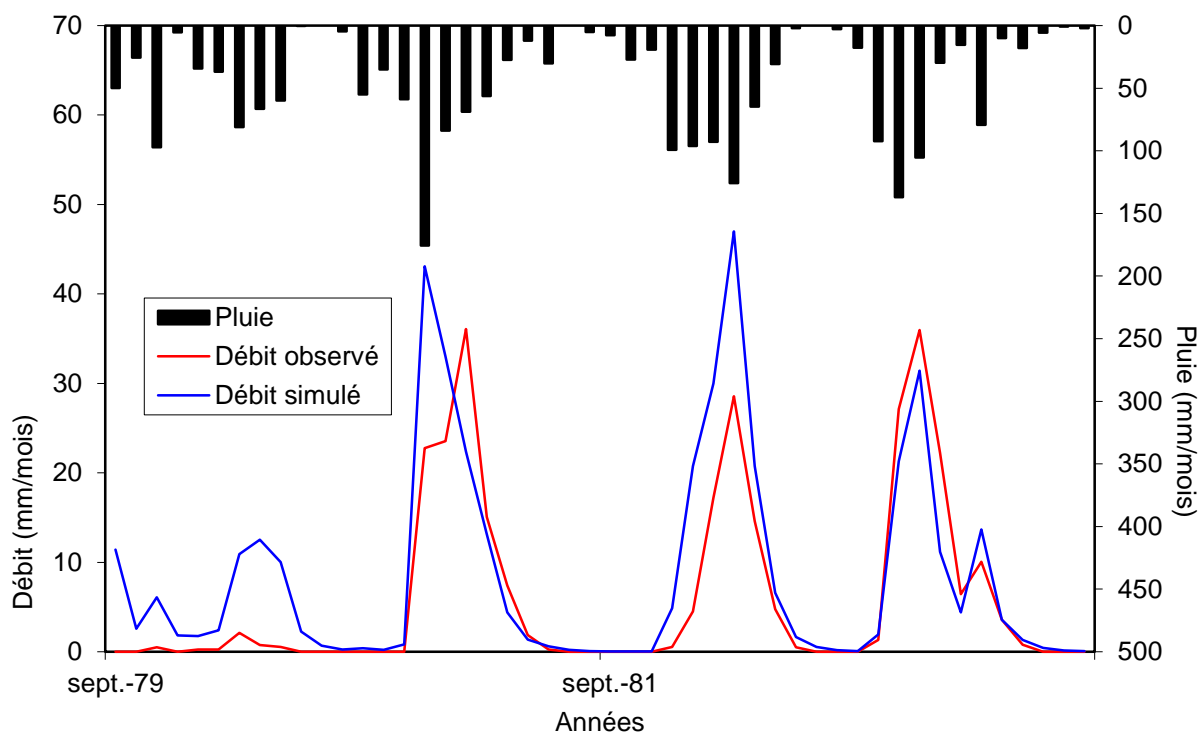


Figure IV.6: Résultats de la validation du modèle GR2M (09/1980-08/1983)

❖ **Interprétations des résultats du calage et validation de la période sèche**

Le calage du modèle au cours de la période (09/1973-08/1979) montre des résultats très satisfaisants avec un critère de Nash de 80,8 % et un R^2 de 82 %. La validation du modèle sur la période (09/1980-08/1983) montre une mauvaise représentation du fonctionnement hydrologique du bassin, le critère de Nash est faible (60,6 %) et le R^2 est de 73%.

IV. 2. 3. Calage et validation du période humide

Le calage du modèle a été effectué avec la série allant (09/1990-08/1996)

Tableau. IV.7: Résultats du calage de GR2M (09/1990-08/1994)

Paramètres	X ₁ [mm]	X ₂ [mm]	Nash %	R ²
Valeurs	4,69	0,62	68,7	0.87

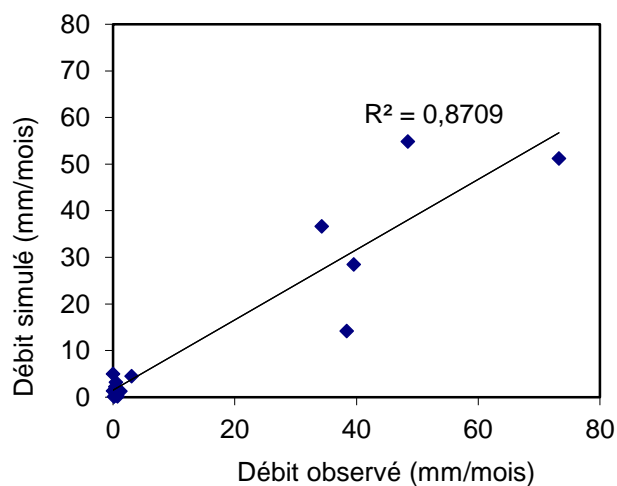
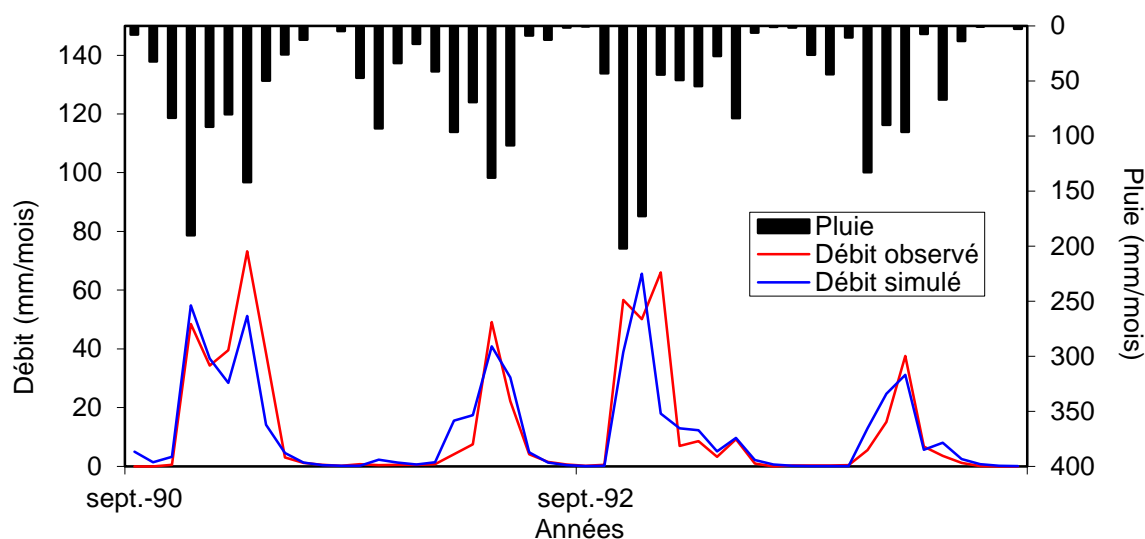


Figure IV.7: Résultats du calage du modèle GR2M (09/1991-08/1994)

CHAPITRE IV. Modélisation pluie-débit de l'oued Ressoul

La validation du modèle a été effectuée avec la série allant (09/1995-08/1996)

Tableau IV.8 : Résultats de validation du modèle GR2M (09/1995-08/1996)

Paramètres	X_1 [mm]	X_2 [mm]	Nash %	R^2
Valeurs	4,69	0,62	82,9	98

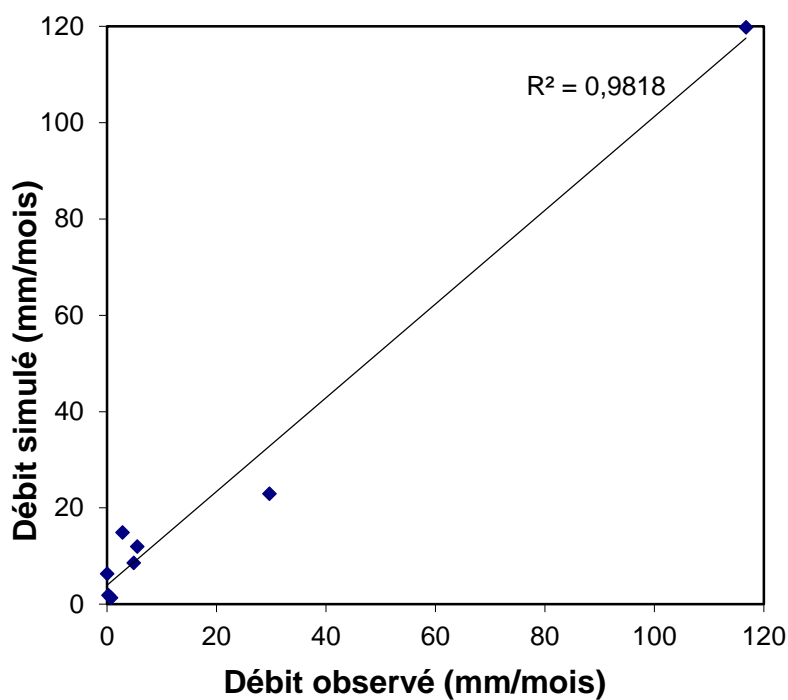
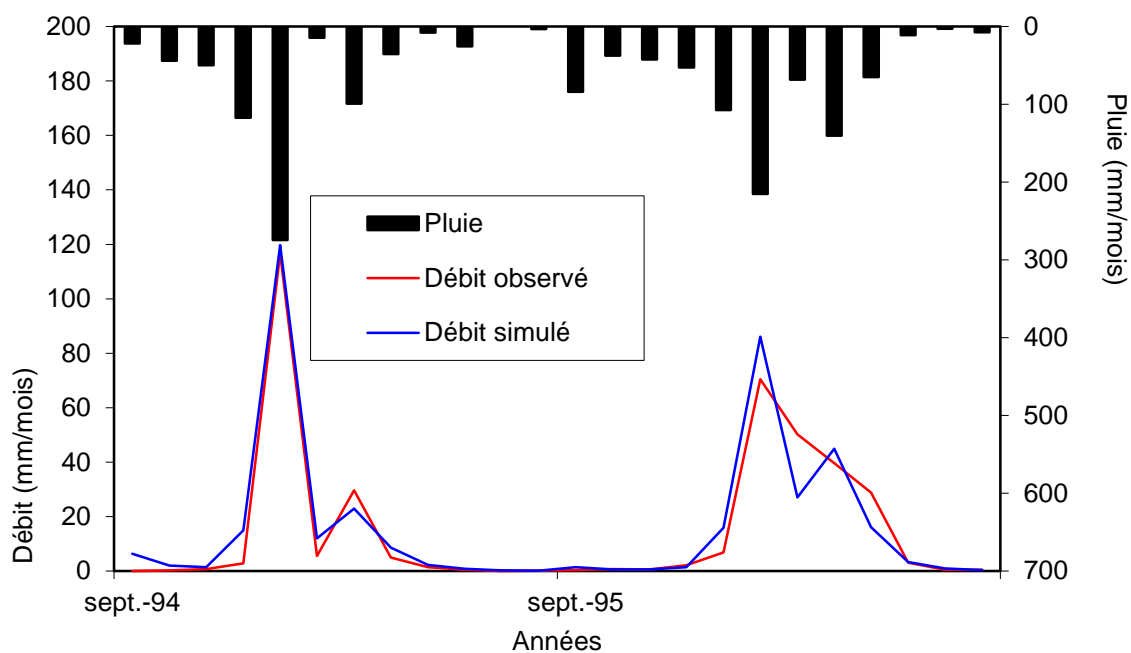


Figure IV.8: Résultats de la validation du modèle GR2M (09/1995-08/1996)

❖ Interprétations des résultats du calage et validation de la période humide

Le calage du modèle au cours de la période (09/1991-08/1994) montre des résultats acceptables avec un critère de Nash de 68,7 % et un R^2 de 87 %. La validation du modèle sur la période (09/1995-08/1996) montre des résultats très satisfaisants, le critère de Nash est (82,9 %) et le R^2 est de 98 %.

IV.3. Conclusion

Les résultats de la comparaison entre les débits observés et les débits simulés sont satisfaisants, avec une qualité allant de bonne à moyenne. Il convient de noter que le modèle GR2M a bien répondu lors de cette évaluation. Les valeurs du critère de Nash et du coefficient de détermination (R^2), à la fois lors du calage et de la validation, démontrent la performance et la robustesse du modèle GR2M sur le bassin versant d'Oued Ressoul. Par conséquent nous pouvons dire que la modélisation pluie-débit par l'utilisation du modèle GR2M, donne des résultats acceptables et très encourageants pour le bassin d'Oued.

On prend en considération que le modèle déficitaire répond moins bien avec le GR2M par rapport au modèle excédentaire.

CONCLUSION GENERALE

Les modèles pluie-débit sont des outils utilisés pour simuler les débits d'un cours d'eau en un point spécifique en se basant sur les données de précipitations enregistrées dans le bassin versant correspondant. Cette modélisation est effectuée à l'échelle du bassin versant, qui est l'entité principale pour la concentration des écoulements, et permet ainsi de simuler la transformation des précipitations en débits.

L'objectif principal de notre étude était de simuler cette transformation des précipitations en débits à l'échelle du bassin versant de l'Oued Ressoul, situé dans le nord-est de l'Algérie. Au cours de cette étude, nous avons obtenu les principaux résultats suivants :

- L'étude morphométrique a révélé que notre bassin versant a une forme de type chaîne et couvre une superficie de 101,23 km². Son relief est relativement accidenté, avec un dénivelé spécifique de 219,96 m.

- La température moyenne annuelle dans la région est de 17,70 °C, et les précipitations estimées s'élèvent à 597,82 mm. Les périodes hivernales et printanières sont humides, avec la majeure partie des écoulements se produisant à ce moment-là, tandis que les saisons automnales et estivales sont plus sèches.

- L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (ETP), calculée selon la méthode de Thornthwaite, est de 878,64 mm.

Afin de mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Ressoul, nous avons utilisé le modèle pluie-débit GR2M avec un pas de temps mensuel. Nous avons conclu que ce modèle simule efficacement la relation entre les précipitations et les débits dans notre bassin versant, comme en témoignent un coefficient de corrélation R^2 de 0,85 et un coefficient de Nash de 83,4 % obtenus lors du processus de calibration.

Les résultats de validation, comparant les débits observés et les débits simulés, sont satisfaisants, avec des performances allant de bonnes à moyennes. Le modèle GR2M s'est avéré répondre de manière adéquate, avec des valeurs du critère de Nash et des coefficients de corrélation dépassant les 70 % pour les différents pas de temps considérés, aussi bien lors du processus de calibration que lors de la validation. Ceci démontre la performance et la robustesse du modèle GR2M pour le bassin versant de l'Oued Ressoul, et confirme qu'il est le plus adapté et le plus performant pour notre étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

233 pages

Abbott, M.B. and Refsgaard, J.C. 1996, Distributed Hydrological Modeling. Kluwer Academic Publisher, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0257-2>.

ABED, B. 2013. Réorganisation des réseaux hydrographiques dans les modèles d'évolution des paysages, à grandes échelles spatiales et temporelles. 112 fig

AMBROISE B. 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du département « Science du sol » de l'Institut National de Recherches Agronomiques de Dijon, p198.

AMBROISE B. 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, Facteur, Modèles. H.G.A. (Ed.), Bucarest, 200 p.

ANDREASSIAN V. 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 p.

ANDREASSIAN V., HALL A., CHAHINIAN N., SCHAAKE J. 2006. Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. ANDRÉASSIAN, A. HALL, N. CHAHINIAN AND J. SCHAAKE (EDITORS), large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n° 307, pp. 1-5.

BELKACEMI F, 2020. Modélisation de la relation pluie-débit par les modèles conceptuels GR cas d'affluent Oued Seybouse (station Moulin Rochefort GUELMA) Mémoire de master université akli mohand oulhadj de bouira 94p.

BEVEN K.J 1992. The future of distributed modelling. Hydrol. Processes, n° 6, pp. 253- 254.

BEVEN K.J. 1989. Changing ideas in hydrology, the case of physically based models. Journal of hydrology, n° 105, pp. 157-172.

BONELL M. 1993. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. Journal of Hydrology. 150, 217-275p.

BOUREK R, 2010. 2010. Modélisation pluie - débit application au bassin versant de la macfaa (nw algérien). S.l. : unrsffe nouberk belkam tlemcen, 2010.

CERNESSON F. 1993. Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat, Université des sciences et technique du Languedoc. 240 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DUMAS A. 2006.** Méthode de maximisation : estimation des crues maximales probables (CMP). La Houille Blanche, n° 5, 74-79
- EDIJATNO 1991.** Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Univ. Louis Pasteur/ENGEEES, Strasbourg, 242 p.
- ESTUPINA BORRELL V. 2004.** Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair : Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse., P254.
- FORTIN J.P, MOUSSA R., BOCQUILLON C. & VILLENEUVE J.P.1995.** HYDROTEL, un modèle hydrologique pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. Revue des sciences de l'eau. 8(1), 31p
- FOUCHIER C. 2010.** Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse De Doctorat De L'université Montpellier II. Sciences Et Techniques Du Languedoc. Thèse préparée au sein du Groupe de Recherche en Hydrologie, Cemagref, Aix-en-Provence., P266.
- FOURMIGUE P., LAVABRE J. 2005.** Prévision de crues avec la modèle conceptuelle pluie débit GR3H. Revue des Sciences de l'Eau, n° 18(1), pp. 87-102.
- FOURMIGUE P., LAVABRE J. 2005.** Prévision de crues avec la modèle conceptuelle pluie débit GR3H. Revue des Sciences de l'Eau, n° 18(1), pp. 87-102.
- GAUME E. 2002.** Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologies. Mémo. H.D.R., Ecole National des Ponts et Chaussées. 269 p.
- GREGORIS Y., LAVABRE J. & DESCOUCHE C.2001.** Flash flood early warning: the AIGA method. <http://www.cosis.net/abstracts/PLC5/00102/PLC5-A-00102.pdf>.
- KABOUYA M. ET MICHEL, C. 1991.** Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. Revue des Sciences de l'Eau 4(4), 569-587.
- KABOUYA M., 1990.** Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie
- LINDSTRÖM, G., JOHANSSON, B., PERSSON, M., GARDELIN, M. ET BERGSTRÖM, S. 1997.** Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology, 201, 272-288.
- LIU Z. & TODINI E. 2002.** Towards a comprehensive physically based rainfall runoff model. Hydrology & Earth System Sciences. 6(5), 859-881.
- MAISON P. 2000.** Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant. Approche mécaniste simplifiée de la zone non saturée. Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse en Science de la terre et environnement, 303 p., 161 fig

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- MAKHLOUF Z. ET MICHEL, C., 1994.** A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.
- MATHEVET T. 2005.** Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 p.
- MATHEVET T. 2005.** Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- MEDANE K. 2012.** Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (Tafna new- algérien). Mémoire de magister Université abou bekr belkaid – Tlemcen. 121p
- MICHEL C., 1983.** Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*(1), 39-44.
- Michel 1989,** (Université Laval); Serge Belley (ENAP); Pierre Bernier (ENAP); ... gestion des risques, nous avons en mémoire la crise du verglas au Québec.
- MOUELHI S., MICHEL, C., PERRIN, C. ET ANDREASSIAN, V. 2006B.** Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.
- MOUELHI S. 2003.** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp
- Nascimento, 1995,** Appréciation l'aide d'un model empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation Pluit débit l'échelle d'un bassin versant 418p
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970** River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- LOUDIN L., ANDREASSIAN, V., PERRIN, C. ET ANCTIL, F. 2004.** Locating the sources of lowpass behavior within rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 40(11), W11101, doi: 10.1029/2004WR003291
- LOUDIN L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN, V., ANCTIL, F. ET LOUMAGNE, C. 2005A.** Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LOUDIN L., MICHEL, C. ET ANCTIL, F.2005B. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration input?

LOUDIN L.2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp

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

RADIA G. 2012. mémoire de magister hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : chouly) tafna-nw algérien université abou bekr belkaid – Tlemcen 156p.

REFSGAARD J. 1997. Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology 198, p. 69-97.

SANA B, FERAHI A. 2017, mémoire prepare pour l'obtention du diplôme de master en hydraulique, université de bouira 96p.

SEPTENTRIONA et MAKHLOUF Z. 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp

SINGH V.P 1995. Accuracy of kinematic and diffusion wave approximations for space independent flows on infiltrating surfaces. Hydrological Professes, Vol. 9, pp. 1-18.

Tangara, M., 2005. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris, Cemagref. 374 pp.

YANG X., PARENT E., MICHEL C., ROCHE P.A. 1991. Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits. La Houille Blanche (6), pp. 433-440.

ZAOUI R ,2022. Modélisation hydrologique pluie-débit appliqué au sous bassin de bassin versants d'oued Ressoul (Nord-Est Algérien) Mémoire de Master Université 08 Mai 1945 de Guelma 109p.

<https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre9/chapitre9.html>

https://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1583#:~:text=Formule%20de%20Thornthwaite,a%20%3A%200.016%20*%20I%20%2B%200.5