

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de génie civil et d'architecture

Département de l'hydraulique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Par

NOUREDDINE MAKHLOUFI

Thème :

UTILISATION DES MULTI-MODELES POUR AMELIORER LA MODELISATION HYDROLOGIQUE REGIONALISEE ET APPLICATION AU BASSIN DE CHELIFF

Soutenue le 19/06/2025, devant le jury composé de :

EZZIANE Karim	Professeur	UHB Chlef	Président
REMINI Boualem	Professeur	USD Blida1	Examineur
BENFETTA Hassan Noureddine	Professeur	UMS Mascara	Examineur
DJAFER KHODJA Hakim	MCA	UAMO Bouira	Examineur
HABIBI Brahim	MCA	UHB Chlef	Examineur
ELMEDDAHI Yamina	Professeure	UHB Chlef	Rapporteure

Remerciements

Ce travail n'aurait pas été achevé sans Allah nous facilitant la tâche. Louange à Allah, pour le succès.

Je remercie Mme **Elmeddahi** d'avoir accepté de diriger ce travail et pour ses conseils tout au long de son élaboration.

Un grand merci s'adresse aux membres de jury, présidé par le professeur **Ezziane**, d'avoir accepté d'examiner ce travail et d'être efforcé de fournir de précieux commentaires.

Je tiens à remercier mes collègues de l'Institut Technologique d'Izmir en Turquie, les professeurs **Alper Baba** et **Orhan Gündüz** pour nous avoir accueillis dans leur institut et nous avoir aidés à enrichir certains points de ce travail.

Je remercie profondément mes collègues les professeurs, spécialement Mr **Oudja**, Mr **Abaidia** et Mr **Zerouali** pour leurs encouragements et leur aide.

Merci à tous les membres de ma famille pour leurs encouragements et leur soutien.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A La mémoire de mon père

A ma petite et grande famille

A tous mes amis.

MAKHLOUFI Nouredine

ملخص

يواجه علماء المياه في جميع أنحاء العالم العديد من العوائق التي تعقد مهمة النمذجة الهيدرولوجية لإدارة الموارد المائية. هدفنا من خلال هذا العمل هو استكشاف واقتراح حلول لتحسين النمذجة الهيدرولوجية الإقليمية في حوض شلف من خلال مقارنة نموذجين واسعي الاستخدام نظام النمذجة الهيدرولوجية HEC-HMS و أداة تقييم التربة والمياه SWAT، ودراسة معلمتهما الحساسية ودراسة إقليمية معلمات الأحواض غير المقاسة. ولتحقيق هذه الغاية، اخترنا حوض شف العلوي والمتوسط كمنطقة للدراسة، باستخدام ست وعشرين محطة لرصد الأمطار منها محطات قياس التدفق تغطي فترة ست سنوات من عام 2007 إلى عام 2012. لاستكشاف أساليب التوزيع الإقليمي، أظهرت معايرة نموذج HEC-HMS والتحقق من صحته لجميع الأحواض الفرعية أداءً مُرضياً، مع تحسن طفيف في مرحلة التحقق. يتراوح المعامل الخطأ غير الخطي بين 0.61 و0.79، بينما يتراوح معامل R^2 بين 0.62 و0.79. ويستقر معامل التربيع الجذري المتوسط (RMSE) عند مستوى يتراوح بين 0.50 و0.60 في مرحلة المعايرة. تُظهر نتائج التوزيع الإقليمي أن أسلوب القرب المكاني يُقدم أداءً أفضل قليلاً من أسلوب التشابه الفيزيائي، حيث تجاوزت قيم المعامل NSE 0.75 أثناء التحقق. وقد وُجد أن المتوسط الحسابي للمعلمات أكثر فعالية من ترجيح المسافة العكسية. لأغراض مقارنة النماذج وحساسيتها، تم اختيار ثلاث محطات لقياس هطول الأمطار ومحطة قياس هيدرومترية واحدة لحوض وادي تكزال الفرعي على مدى عشر سنوات من عام 2003 إلى عام 2012. بالنسبة لنموذج HEC-HMS، وُجد أن المعلمات المتعلقة بزمن استجابة الحوض (زمن التأخير)، والتدفق الأساسي (ثابت الركود)، وسعة التخزين في المظلة (أقصى سعة تخزين) هي الأكثر حساسية. أما بالنسبة لنموذج SWAT، فقد أظهرت المعلمات المتعلقة بالجريان السطحي (CN2)، والتوصيل الهيدروليكي (CH_K2)، ومتوسط طول المنحدر (SLSUBBSN)، وعمق عتبة المياه في طبقة المياه الجوفية الضحلة المطلوبة لعودة المياه (GWQMN)، ومعامل تعويض تبخر التربة (ESCO)، ومعامل ألفا للتدفق الأساسي (ALPHA_BF) تأثيراً كبيراً على النتائج. يقدم HEC-HMS أداءً أفضل من حيث الدقة والموثوقية، مع قيم NSE تبلغ 0.68 لـ HEC-HMS و0.51 لـ SWAT في مرحلة المعايرة، و0.71 لـ HEC-HMS و0.60 لـ SWAT في مرحلة التحقق. أظهر هذا العمل أن استخدام النماذج المتعددة وتقنيات التقسيم الإقليمي يمكن أن يحسن بشكل كبير النمذجة الهيدرولوجية في المناطق شبه القاحلة، وخاصة في حوض شلف.

الكلمات المفتاحية: HEC-HMS، SWAT، الأحواض غير المقاسة، أكلة التدفقات، حساسية النماذج، حوض الشلف.

Abstract

Hydrologists around the world face many difficulties that complicate the task of hydrological modeling for water resources management. Our main objective through this work is to explore and propose solutions to improve regionalized hydrological modeling in the Cheliff basin by comparing two widely used models, HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) and SWAT (Soil and Water Assessment Tool), studying their sensitive parameters and studying the regionalization of ungauged basin parameters. For this, we have chosen the Upper and Middle Cheliff basin as a study area, using twenty-six rainfall stations in which eight hydrometric stations covering a period of six years from 2007 to 2012. For the exploration of regionalization methods, the calibration and validation of the HEC-HMS model for all sub-basins showed a satisfactory performance slightly better in the validation phase. NSE varies between 0.61 and 0.79. R^2 is between 0.62 and 0.79. RMSE is stable around 0.50 to 0.60 in the calibration phase. The regionalization results show that the spatial proximity method offers slightly better performance than the physical similarity, with NSE values exceeding 0.75 during validation. The arithmetic mean of the parameters was found to be more effective than the inverse distance weighting. For the model comparison and model sensitivity part, three rainfall stations and one hydrometric station were selected for the Oued Tikzal sub-basin over a ten-year period from 2003 to 2012. For HEC-HMS, the parameters related to basin response time (Lag time), base flow (Recession Constant) and canopy storage capacity (Max storage) were found to be the most sensitive. For SWAT, the parameters related to runoff (CN2), hydraulic conductivity (CH_K2), average slope length, (SLSUBBSN), depth of water threshold in the shallow aquifer required for water return (GWQMN), soil evaporation compensation factor (ESCO) and base flow alpha factor (ALPHA_BF) showed significant influence on the results. HEC-HMS offers better performance in terms of accuracy and reliability, with NSE values of 0.68 for HEC-HMS and 0.51 for SWAT in the calibration phase, and 0.71 for HEC-HMS and 0.60 for SWAT in the validation phase. This work demonstrated that the use of multi-models and regionalization techniques can significantly improve hydrological modeling in semi-arid regions, particularly in the Cheliff basin.

Keywords: HEC-HMS, SWAT, ungauged basins, regionalization of flows, model sensitivity, Cheliff basin.

Résumé

Les hydrologues à travers le monde font face à de nombreux obstacles qui complexifient la tâche de la modélisation hydrologique pour la gestion des ressources en eau. Notre but à travers ce travail est d'explorer et de proposer des solutions pour améliorer la modélisation hydrologique régionalisée dans le bassin de Cheliff par la comparaison entre deux modèles largement utilisés, HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) et SWAT (Soil and Water Assessment Tool), l'étude de leurs paramètres sensibles et l'étude de la régionalisation des paramètres des bassins non jaugés. Pour cela nous avons choisis le bassin du Haut et Moyen Cheliff comme zone d'étude, par l'emploi de vingt-six stations pluviométriques dont huit hydrométriques couvrant une période de six ans de 2007 à 2012. Pour l'exploration des méthodes de régionalisation, la calibration et la validation du modèle HEC-HMS pour tous les sous bassins ont montré une performance satisfaisante légèrement meilleure en phase de validation. NSE varie entre 0.61 et .79. R^2 est compris entre 0.62 et 0.79. RMSE est stable autour de 0.50 à 0.60 en phase de calibration. Les résultats de la régionalisation montrent que la méthode de proximité spatiale offre des performances légèrement supérieures à la similitude physique, avec des valeurs de NSE dépassant 0.75 lors de la validation. La moyenne arithmétique des paramètres s'est avérée plus efficace que la pondération par la distance inverse. Pour la partie de la comparaison des modèles et la sensibilité des modèles, trois stations pluviométriques et une hydrométrique ont été choisies pour le sous bassin de Oued Tikzal sur une période de dix ans de 2003 à 2012. Pour HEC-HMS, les paramètres liés au temps de réponse du bassin (Lag time), au débit de base (Recession Constant) et à la capacité de stockage de la canopée (Max storage) se sont révélés les plus sensibles. Pour SWAT, les paramètres liés au ruissellement (CN2), à la conductivité hydraulique (CH_K2), à la longueur moyenne des pentes, (SLSUBBSN), à la profondeur du seuil de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire pour le retour d'eau (GWQMN) , au facteur de compensation de l'évaporation du sol (ESCO) et au facteur alpha du débit de base (ALPHA_BF) ont montré une influence significative sur les résultats. HEC-HMS offre de meilleures performances en termes de précision et de fiabilité, avec des valeurs de NSE de 0.68 pour HEC-HMS et 0.51 pour SWAT en phase de calibration, et de 0.71 pour HEC-HMS et 0.60 pour SWAT en phase de validation. Ce travail a permis de démontrer que l'utilisation de multi-modèles et de techniques de régionalisation peut significativement améliorer la modélisation hydrologique dans les régions semi-arides, en particulier dans le bassin du Cheliff.

Mots-clés : HEC-HMS, SWAT, bassins non jaugés, régionalisation des débits, sensibilité des modèles, bassin de Cheliff.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
ملخص	I
Abstract	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations, sigles et acronymes	X
Valorisation des travaux de thèse	XI
Organigramme de la thèse de doctorat	XII
Introduction générale	1
Chapitre I Synthèse bibliographique	
I.1 Introduction	4
I.2 Le cycle hydrologique	4
I.3 La modélisation hydrologique	7
I.4 La modélisation hydrologique pluie-débit	8
I.4.1 Le bassin versant	10
I.4.2 Les modèles hydrologiques	11
I.4.2.1 Les composantes d'un modèle hydrologique	12
I.4.2.2 Classification des modèles hydrologiques	14
I.4.2.3 Critères de sélection d'un modèle hydrologique	15
I.4.2.4 Limites des modèles hydrologiques	16
I.4.2.5 Applications des modèles hydrologiques	16
I.4.2.6 Calibration et validation des modèles hydrologiques pluie-débit	17
I.4.2.7 Analyse des performances des modèles hydrologiques	18
I.4.2.7.1 Le critère de Nash-Sutcliffe (NSE)	18
I.4.2.7.2 La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	19
I.4.2.7.3 Le coefficient de détermination (R^2)	19
I.4.2.7.4 Le pourcentage de biais (PBIAS)	20
I.4.2.7.5 Le ratio de l'écart type des résidus (RSR)	20
I.4.2.8 Classification des performances des critères	21
I.4.2.9 Exemples de modèles hydrologiques couramment utilisés	22
A. Le modèle HEC-HMS	22
B. Le modèle SWAT	24
C. Le modèle HBV	24
D. Le modèle MIKE SHE	24
E. Le modèle TOPMODEL	25
F. Le modèle GR (Génie rural)	27
G. Le modèle IHACRES	28
I.4.2.10 Sensibilité des modèles hydrologiques aux paramètres	29
I.5 Régionalisation des débits dans les bassins non jaugés	31
I.5.1 Les bassins non jaugés	31
I.5.2 Les méthodes de régionalisation	32
I.5.2.1 Méthodes basées sur la distance	32
A. La proximité spatiale	32
B. La similarité physique	33
I.5.2.2 Méthode de régression	34
I.5.2.3 Méthode de calibration régionale	34
I.5.2.4 Méthode de similarité de signature hydrologique	34
I.5.2.5 Méthodes de similarité intégrée	35
I.5.3 L'utilisation de la régionalisation dans les études antérieures	35
I.5.4 Régionalisation à donneurs multiples	35
I.6 Conclusion	37
Chapitre II Description de la zone d'étude et analyse des données	
II.1 Introduction	39
II.2 Description de la zone d'étude	39

Table des matières

II.2.1 Présentation du bassin de Cheliff	39
II.2.2 Présentation du bassin haut et moyen Cheliff	41
II.2.2.1 La couverture végétale	43
II.2.2.2 Le relief	44
II.2.2.3 Le réseau hydrographique	45
II.2.2.4 Les types de sols	46
II.2.2.5 La pluviométrie	47
II.2.2.6 L'évapotranspiration	48
II.3 Analyse et traitement des données	48
II.3.1 Collecte des données	49
II.3.2 Comblement des lacunes	50
II.3.2.1 Méthode de la moyenne arithmétique	51
II.3.2.2 Méthode du rapport normal (normal ratio)	51
II.3.2.3 Méthode de pondération par la distance inverse (inverse distance weighting - IDW)	51
II.3.3 Homogénéisation des séries chronologiques	52
II.3.3.1 Méthodes graphiques	52
A. Méthode de doubles cumules	52
B. Méthode de cumul des résidus	53
II.3.3.2 Méthodes numériques	53
A. Test de Pettitt	53
B. Test de Mann-Kendall	54
C. Test de Buishand	55
II.3.4 Répartition mensuelle des pluies	57
II.3.5 Paramètres statistiques des séries de pluie	57
II.3.6 Détermination de la pluviométrie moyenne dans les sous-bassins	59
II.3.7 Evolution des débits mensuels.....	60
II.4 Conclusion	61
Chapitre III Régionalisation des débits d'un bassin non jaugé	
III.1 Introduction	62
III.2 Méthodologie	63
III.2.1 Équations utilisées	63
III.2.2 Calibration et validation du modèle HEC-HMS	64
III.2.2.1 Calibration du modèle	64
III.2.2.2 Validation du modèle	64
III.2.3 Sélection des bassins donneurs	64
III.2.3.1 Proximité spatiale	64
III.2.3.2 Similarité physique	65
III.2.4 Régionalisation des débits	65
III.2.4.1 Moyenne des hydrogrammes	65
III.2.4.2 Moyenne des paramètres	66
III.2.5 Evaluation des performances	66
III.3 Résultats	67
III.3.1 Calibration et validation du modèle HEC-HMS pour tous les sous-bassins	67
III.3.2 Régionalisation des débits de l'Oued Tikzal	72
III.3.2.1 Sélection des bassins donneurs	72
a. Proximité spatiale	72
b. Similarité physique	72
III.3.2.2 Régionalisation par la moyenne des hydrogrammes	73
III.3.2.3 Régionalisation par la moyenne des paramètres	73
III.3.2.4 Comparaison des méthodes de régionalisation	74
III.4 Discussions	75
III.4.1 Performance du modèle HEC-HMS	75
III.4.1.1 Calibration et validation du modèle	75
III.4.1.2 Analyse des hydrogrammes	75
III.4.2 Régionalisation par la moyenne des hydrogrammes	75

Table des matières

III.4.2.1 Comparaison entre proximité spatiale (PS) et similarité physique (SP)	76
III.4.2.2 Comparaison entre les techniques de moyenne	76
III.4.3 Régionalisation par la moyenne des paramètres	76
III.4.3.1 Comparaison entre proximité spatiale (PS) et similarité physique (SP)	76
III.4.3.2 Comparaison entre les techniques de moyenne	76
III.4.4 Comparaison avec d'autres études	77
III.4.5 Récapitulation.....	77
III.5 Conclusion	78
Chapitre IV Modélisation et comparaison des modèles hydrologiques HEC-HMS et SWAT	
IV.1 Introduction	80
IV.2 Description des modèles hydrologiques utilisés	81
IV.2.1 Description du modèle hydrologique HEC-HMS	82
IV.2.1.1 Les données d'entrée du modèle HEC-HMS	83
IV.2.1.2 Lancement de la simulation	87
IV.2.1.3 Visualisation des résultats	88
IV.2.1.4 Calibration du modèle HEC-HMS	89
IV.2.2 Description du modèle hydrologique SWAT	90
IV.2.2.1 Les données d'entrée du modèle SWAT	91
IV.2.2.2 Calibration du modèle SWAT	93
IV.3 Evaluation de la performance des modèles HEC-HMS et SWAT	94
IV.4 Résultats de la modélisation	95
IV.4.1 Résultats de la modélisation par le modèle HEC-HMS	95
IV.4.1.1 Analyse de la sensibilité du modèle HEC-HMS	95
IV.4.1.2 Calibration et validation du modèle HEC-HMS au pas de temps mensuel	97
IV.4.1.3 Évaluation de la performance du modèle HEC-HMS	98
IV.4.2 Résultats de la modélisation par le modèle SWAT	99
IV.4.2.1 Les données d'entrée du modèle SWAT	99
IV.4.2.2 Analyse de la sensibilité du modèle SWAT	104
IV.4.2.3 Calibration et validation du modèle SWAT au pas de temps mensuel	107
IV.4.2.4 Evaluation de la performance du modèle SWAT	109
IV.5 Discussions des résultats de la modélisation par les modèles HEC-HMS et SWAT	110
IV.6 Comparaison des deux modèles HEC-HMS et SWAT	111
IV.7 Comparaison avec d'autres études	112
IV.8 Conclusion	114
Conclusion générale et perspectives	115
Références bibliographiques	118
Annexe 01 Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations	126
Annexe 02 Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus).....	138
Annexe 03 Répartition mensuelle des précipitations (2003-2012)	146

Liste des figures

Figure I.1 Le cycle de l'eau.....	5
Figure I.2 Schématisation du cycle hydrologique.....	7
Figure I.3 Principe de la modélisation hydrologique pluie-débit.....	9
Figure I.4 Le bassin versant topographique et le bassin versant réel.....	10
Figure I.5 : Les composantes d'un modèle hydrologique.....	13
Figure I.6 La classification des modèles hydrologiques.....	15
Figure I.7 Structure du modèle HBV suivant.....	24
Figure I.8 Architecture du modèle MIKE SHE.....	25
Figure I.9 Schéma du processus hydrologique de TOPMODEL.....	26
Figure I.10 Structure du modèle GR4J.....	28
Figure I.11 Structure du modèle IHACRES.....	29
Figure I.12 Principe de la régionalisation.....	31
Figure I.13 Les bassins similaires selon l'approche de la proximité spatiale et les bassins similaires selon l'approche de la similitude physique.....	34
Figure II.1 Le bassin hydrographique Cheliff-Zahrez.....	40
Figure II.2 Situation géographique du bassin de Cheliff.....	41
Figure II.3 Situation géographique du bassin Haut et Moyen Cheliff.....	42
Figure II.4 Couverture végétale du bassin haut et moyen Cheliff.....	43
Figure II.5 Carte des aspects du bassin haut et moyen Cheliff.....	44
Figure II.6 Carte des pentes du bassin haut et moyen Cheliff.....	45
Figure II.7 Réseau hydrographique du bassin d'Oued Cheliff.....	45
Figure II.8 Hydrographie du bassin du haut et moyen Cheliff.....	46
Figure II.9 Les types de sols du bassin haut et moyen Cheliff.....	47
Figure II.10 Polygone de Thiessen des sous bassins étudiés.....	59
Figure II.11 Répartition mensuelle des débits.....	60
Figure III.1 La méthodologie suivie pour la régionalisation des débits de Oued Tikzal.....	66
Figure III.2 Graphiques des débits observés et simulés de tous les sous bassins par le modèle HMC-HMS pour la phase de calibration.....	70
Figure III.3 Graphiques des débits observés et simulés de tous les sous bassins par le modèle HMC-HMS pour la phase de validation.....	71
Figure IV.1 Structure du modèle hydrologique HEC-HMS.....	89
Figure IV.2 Structure du modèle SWAT.....	93
Figure IV.3 Tracé en pointillé des paramètres sensibles du modèle HEC-HMS de l'Oued Tikzal.....	97
Figure IV.4 Sous-bassins créés par le modèle SWAT.....	100
Figure IV.5 Carte du modèle numérique de terrain (MNT) de l'Oued Tikzal.....	101
Figure IV.6 Carte des pentes de l'Oued Tikzal.....	102
Figure IV.7 Carte des sols de l'Oued Tikzal.....	103
Figure IV.8 Carte d'occupation du sol de l'Oued Tikzal.....	104
Figure IV.9 Valeurs de P-Value et t-Stat des paramètres du modèle SWAT. De l'Oued Tikzal.....	106

Liste des figures

Figure IV.10 Tracé en pointillé des paramètres sensibles du modèle SWAT de l'Oued Tikzal.....	107
Figure IV.11 Tracé de la bonne estimation des débits simulés par le modèle SWAT de l'Oued Tikzal...	109
Figure IV.12 Débits observés et simulés des deux modèles HEC-HMS et SWAT (Calibration et validation).....	112
Figure IV.13 Diagrammes de dispersion du coefficient de détermination R^2 pour les périodes de la calibration et la validation.....	113

Liste des tableaux

Tableau I.1 Classification de la qualité des résultats selon les critères de performance.....	21
Tableau II.1 Les sous-bassins du Haut et Moyen Cheliff.....	41
Tableau II.2 Caractéristiques géographiques des stations pluviométriques et hydrométriques.....	50
Tableau II.3 Résultats des tests statistiques.....	56
Tableau II.4 Paramètres statistiques des pluies mensuelles (2007-2012).....	58
Tableau III.1 Paramètres calibrés du modèle HEC-HMS pour les sous-bassins donneurs et le sous-bassin cible (Oued Tikzal).....	68
Tableau III.2 Résultats des critères de performance pour la calibration et la validation du modèle HEC-HMS.....	68
Tableau III.3 Classement des sous-bassins donneurs selon la proximité spatiale et la similarité physique.....	72
Tableau III.4 Résultats des critères de performance pour la régionalisation par la moyenne des hydrogrammes.....	73
Tableau III.5 Résultats des critères de performance pour la régionalisation par la moyenne des paramètres.....	74
Tableau IV.1 Sélection d'une méthode de perte pour une simulation événementielle ou continue.....	84
Tableau IV.2 Les paramètres à calibrer du modèle HEC-HMS.....	96
Tableau IV.3 Valeurs des paramètres calibrés pour le modèle HEC-HMS.....	98
Tableau IV.4 Valeurs des coefficients de performance pour le modèle HEC-HMS (débits mensuels).....	98
Tableau IV.5 Les paramètres à calibrer du modèle SWAT.....	105
Tableau IV.6 Valeurs des paramètres calibrés pour le modèle SWAT de l'Oued Tikzal.....	108
Tableau IV.7 Valeurs des coefficients de performance pour le modèle SWAT (débits mensuels).....	110

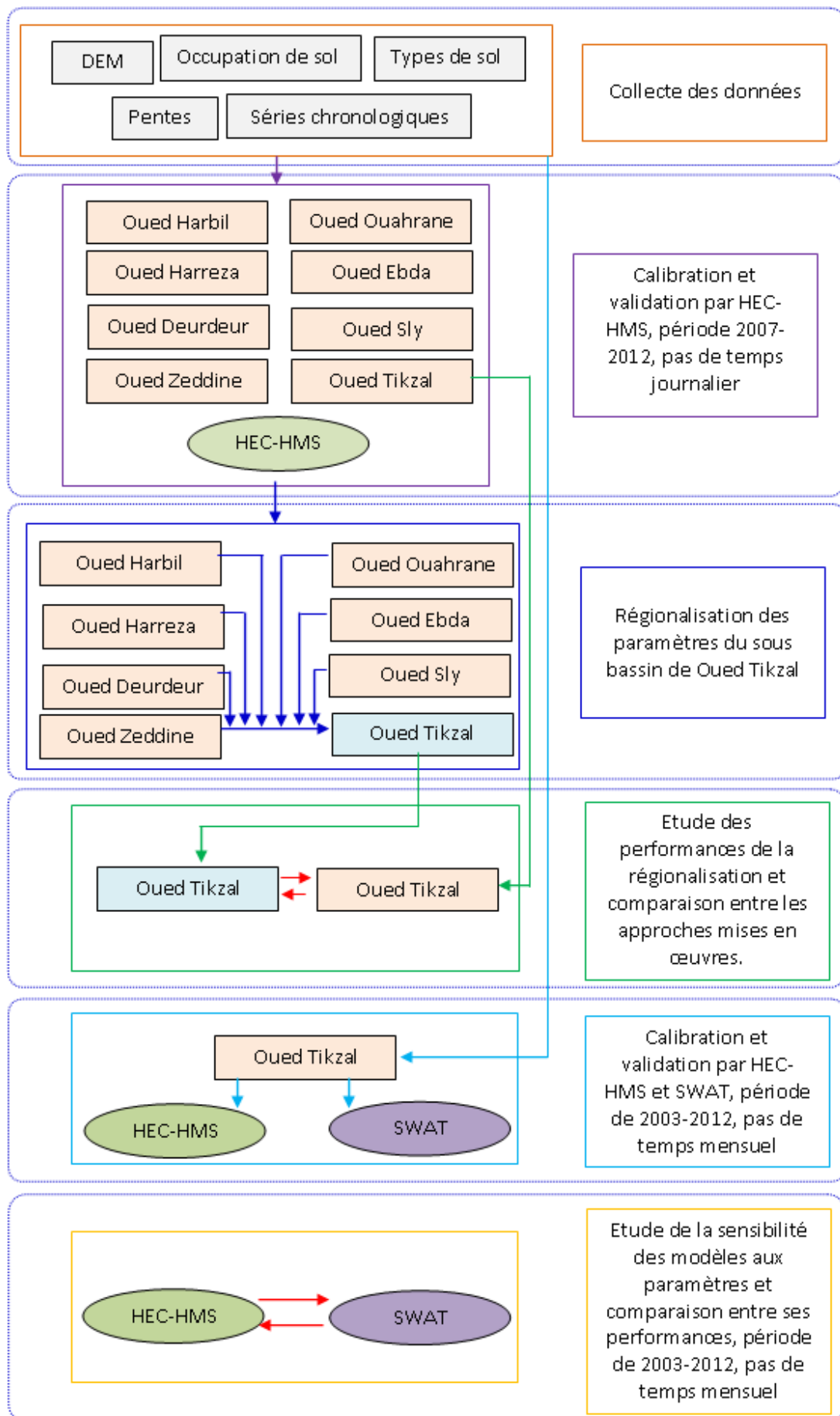
Liste des abréviations, sigles et acronymes

ANRH	Agene nationale des ressources hydriques
Cemagref	Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du génie Rural, des Eaux et Forêts
DSMW	Carte numérique des sols du monde
ETP	Evapotranspiration potentielle
GR4J	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IDW	Moyenne par pondération de la distance inverse
IHACRES	Identification of Hydrological And Catchment Response System
MNT	Modèle numérique de terrain
NSE	Critère de performance Nash-Sutcliffe
PBIAS	Pourcentage de biais
PS	Proximité spatiale
PUB	Prediction in Ungauged Basins
RMSE	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
RSR	Ratio de l'écart type des résidus
SIG	systèmes d'information géographique
SP	Similarité physique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Procedures
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USACE	United States Army Corps of Engineers

Valorisation des travaux de thèse

- Deux communications nationales (Université de Souk-Ahras, Université de Médéa)
- Deux communications internationales (Université de Tébessa, Université de Mascara)
- Article scientifique de catégorie B (Base de données Gruyter) THE USE OF THE HEC-HMS MODEL TO IMPROVE REGIONALIZED HYDROLOGICAL MODELING AND ITS APPLICATION TO THE CHELIFF BASIN, ALGERIA
- Mémoire avec 83 références.
- Encadrement de mémoires de master :
 - Hebal Samiya, Harrat Amina. Etude des performances épuratoires de la STEP de tissemilt. 2017/2018
 - MEDROUB Abdelaziz, BERRADIA Moura. Protection de oued fouda centre contre les inondations. 2017/2018
 - Zenanda Abdelouahid. Protection de la ville de Chellalet El Adhaoura contre les crues (Wilaya de Médéa). 2019/2020
 - Zabel Ibrahim, Youcef Achira Farouk. Contribution à la modélisation hydrologique pluie-débit au bassin versant oued Harreza. 2020/2021
 - Eudjal Nadjet, El khedim Souad. Contribution à la modélisation hydrologique pluie-débit au bassin versant Oued Ouahrane. 2020/2021
 - Laribi Abdelkrim, Mennad Mouadh. Modélisation de la relation pluie-débit par l'application du modèle hydrologique Hec-Hms dans les bassins versants Ghrib et Deurduer. 2021/2022
 - Mehidi Abdelmoumen, Merouane Mohamed. Modélisation de la relation pluie-débit par l'application du modèle hydrologique Hec-Hms dans les bassins versants Harbil et Harreza. 2021/2022
 - Ben Yahia djalloul Ahmed, Djafer Rachida. Modélisation de la relation pluie-débit par l'application du modèle hydrologique Hec-Hms dans les bassins versants Deurdeur et Zeddine. 2021/2022
 - Lahlouh Omar, Ben doukha Oualid. Utilisation des modèles du génie rural pour la simulation des débits des bassins versants. Cas du bassin du chéiff. 2022/2023
 - Abdi Mohammed Larbi, Rahmoun Imed Eddine. Etude des performances du modèle hydrologique Hec-HMS. Application sur le bassin du chéiff. 2022/2023
 - Rasselkaf Ibteissam, Negadi Zohra. Utilisation du modèle hydrologique SWAT pour la simulation des débits liquides du sous bassin de Oued Zeddine. Bassin versant de Chéiff. 2023/2024

Organigramme de la thèse de doctorat



Introduction générale

Introduction générale

La gestion durable des ressources en eau représente un enjeu planétaire critique, exacerbé par les défis du changement climatique, la croissance démographique et la pression croissante sur les écosystèmes aquatiques (Vörösmarty et al., 2000). Dans un contexte où les ressources en eau deviennent de plus en plus limitées et irrégulières, une compréhension approfondie des processus hydrologiques est essentielle pour évaluer l'efficacité des stratégies de gestion, anticiper les impacts des changements environnementaux et soutenir une prise de décision éclairée (IPCC, 2021). La modélisation hydrologique, en tant qu'outil scientifique, joue un rôle central dans cette démarche. Cependant, la complexité des systèmes hydrologiques, associée à des défis tels que le manque de données, la variabilité climatique et la diversité des bassins versants, rend cette tâche particulièrement complexe (Sivapalan et al., 2003).

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte en explorant les défis et les opportunités liés à la modélisation hydrologique, avec un accent particulier sur les régions semi-arides et les pays en développement. Ces zones, souvent caractérisées par des conditions hydrologiques extrêmes et un accès limité aux données hydrométriques, nécessitent des approches innovantes pour surmonter les obstacles liés à la modélisation (McMillan et al., 2012). L'objectif principal de cette recherche est de contribuer à l'amélioration des méthodes de modélisation hydrologique, en se concentrant sur trois aspects clés : la sélection des modèles, la sensibilité aux paramètres et les techniques de régionalisation pour les bassins non jaugés. Ces approches sont essentielles pour extrapoler les connaissances des bassins jaugés vers ceux non jaugés, une problématique centrale dans les régions où les données sont rares (Blöschl et al., 2013).

L'Algérie, située dans une région semi-aride, est l'un des pays les plus vulnérables en matière de ressources hydriques. Cette vulnérabilité est exacerbée par une succession de périodes de sécheresse persistantes, particulièrement intenses dans la région Nord-Ouest du pays au cours des dernières décennies (Meddi et al., 2010). La faiblesse des ressources en eau, associée à des incertitudes croissantes liées au changement climatique, souligne l'urgence d'améliorer les outils de modélisation hydrologique pour une gestion rationnelle et durable de l'eau. Une modélisation hydrologique régionalisée et adaptée aux spécificités locales est donc un enjeu majeur pour anticiper les impacts du changement climatique et planifier des mesures efficaces de gestion des ressources en eau, tant en termes de qualité que de quantité (Oudin et al., 2008).

Le bassin du Cheliff, situé dans le nord-ouest de l'Algérie, est un cas d'étude représentatif des défis hydrologiques rencontrés dans les régions semi-arides. Ce bassin, caractérisé par une forte

Introduction générale

variabilité spatio-temporelle des précipitations et des débits, est confronté à des problèmes récurrents de sécheresse et de surexploitation des ressources en eau. Dans ce contexte, la modélisation hydrologique devient un outil indispensable pour comprendre les dynamiques hydrologiques, évaluer les impacts du changement climatique et soutenir une gestion durable des ressources en eau.

Cependant, la modélisation hydrologique dans cette région se heurte à plusieurs défis majeurs. Premièrement, le choix du modèle hydrologique approprié est crucial pour obtenir des résultats fiables. Les modèles tels que HEC-HMS et SWAT, largement utilisés dans diverses régions géographiques, présentent des performances variables en fonction des caractéristiques du bassin et des conditions climatiques (Ismail et al., 2020 ; Fanta et Sime, 2022). Deuxièmement, la sensibilité des modèles aux paramètres nécessite une calibration minutieuse pour garantir la précision des simulations (Doliso et Hatiye, 2021). Enfin, l'absence de données hydrométriques dans de nombreux bassins non jaugés constitue un obstacle majeur, nécessitant le recours à des techniques de régionalisation pour extrapoler les paramètres hydrologiques (Merz et Blöschl, 2004).

Ce travail vise à répondre à ces défis en proposant une approche intégrée pour améliorer la modélisation hydrologique dans les régions semi-arides, en particulier dans le bassin du Cheliff. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

Évaluer les performances des modèles hydrologiques : Comparer les modèles HEC-HMS et SWAT dans le contexte du bassin du Cheliff, en mettant l'accent sur leur capacité à simuler les débits et à répondre aux défis spécifiques des régions semi-arides.

Analyser la sensibilité des modèles aux paramètres : Identifier les paramètres clés influençant les résultats des simulations et proposer des méthodes de calibration adaptées aux conditions locales.

Explorer les techniques de régionalisation : Appliquer et comparer des méthodes de régionalisation pour estimer les débits dans les bassins non jaugés, en utilisant des approches basées sur la similarité, la régression et les signatures hydrologiques.

Proposer des recommandations pour une gestion durable : Formuler des recommandations pratiques pour améliorer la modélisation hydrologique et soutenir une gestion durable des ressources en eau dans les régions semi-arides.

Introduction générale

Ce travail est organisé en quatre chapitres principaux, chacun contribuant à la réalisation des objectifs définis :

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique : Ce chapitre présente une synthèse des connaissances actuelles sur la modélisation hydrologique, en mettant l'accent sur la modélisation pluie-débit, la typologie des modèles hydrologiques, la sensibilité aux paramètres et les techniques de régionalisation pour les bassins non jaugés. Il fournit également un aperçu des défis spécifiques aux régions semi-arides et aux pays en développement.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude et analyse des données : Ce chapitre décrit en détail le bassin du Cheliff, incluant ses caractéristiques morphométriques, climatiques et hydrologiques. Une analyse des données disponibles pour la modélisation est également présentée, mettant en lumière les défis liés au manque de données et à la variabilité climatique.

Chapitre 3 : Régionalisation des débits dans un sous-bassin non jaugé : Ce chapitre explore l'application de deux techniques de régionalisation pour estimer les débits dans un sous-bassin non jaugé du bassin du Cheliff. Les résultats sont comparés et discutés, en mettant en évidence les avantages et les limites des différentes approches.

Chapitre 4 : Modélisation hydrologique avec HEC-HMS et SWAT et comparaison : Ce chapitre présente une analyse comparative des performances des modèles HEC-HMS et SWAT dans le bassin du Cheliff. La sensibilité des modèles aux paramètres est également étudiée, avec un accent sur les méthodes de calibration et de validation.

Conclusion et perspectives : Ce travail met en lumière les résultats les plus significatifs obtenus et propose des perspectives de recherche pour améliorer la modélisation hydrologique régionalisée, en particulier dans les contextes où les données sont limitées. Les recommandations formulées visent à soutenir une gestion plus durable et résiliente des ressources en eau dans les régions semi-arides et les pays en développement.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

L'hydrologie est une discipline scientifique qui étudie une phase spécifique du cycle de l'eau, débutant lorsque celle-ci atteint la surface terrestre. Elle englobe l'analyse des eaux superficielles à travers des principes et des méthodes variés, adaptés aux spécialités des ingénieurs qui y contribuent. Deux approches philosophiques distinctes caractérisent cette discipline :

- La recherche mathématique, qui s'appuie sur des outils statistiques ;
- La méthode naturaliste, fondée sur l'observation et l'intuition, validées par l'expérience.

L'hydrologie se distingue par sa nature interdisciplinaire. Elle intègre des connaissances issues de l'hydraulique, des sciences physiques (météorologie, physique du globe, etc.), des sciences naturelles (géologie, géomorphologie, etc.), des mathématiques (statistiques, calcul opérationnel, informatique, etc.) et des technologies modernes (appareils de mesure, télédétection, etc.) ([Laborde, 2009](#)).

Aujourd'hui, l'hydrologie occupe une place centrale dans le domaine de l'ingénierie, notamment pour l'exploitation et la gestion des ressources en eau naturelles. La réalisation d'études hydrologiques, plus ou moins approfondies, est une étape indispensable avant la mise en œuvre de tout projet ou aménagement hydraulique ([Laborde, 2009](#)).

Ce chapitre vise à présenter les principales caractéristiques de la modélisation hydrologique, en mettant l'accent sur :

- La modélisation pluie-débit ;
- La régionalisation des débits pour les bassins versants non jaugés ;
- La sensibilité des modèles hydrologiques à leurs paramètres lors de la phase de calibration ;
- L'analyse des performances des modèles hydrologiques.

I.2 Cycle hydrologique

Le cycle de l'eau, ou cycle hydrologique, décrit les mouvements et les transformations des particules d'eau à travers l'atmosphère, la surface du sol et le sous-sol. Chaque particule d'eau participe à une partie de ce cycle, avec des durées variables (Figure I.1).

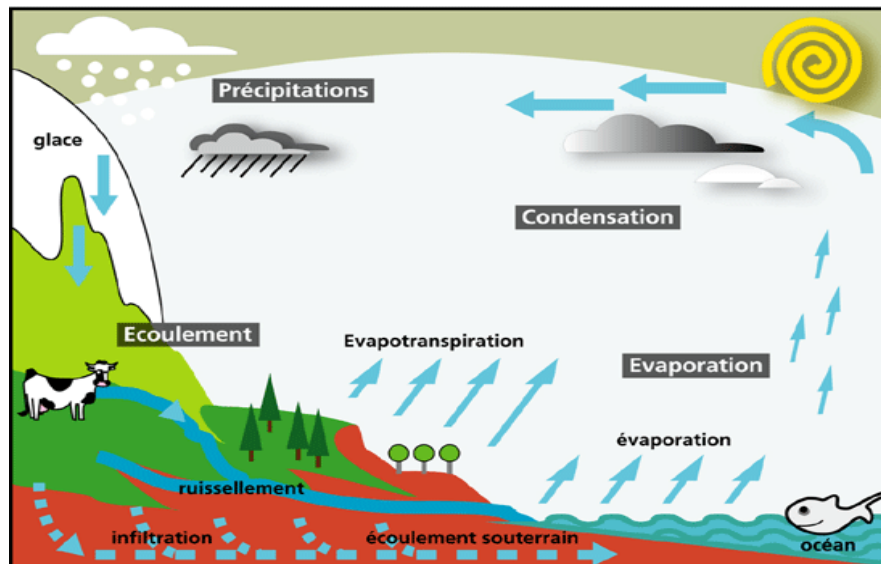


Figure I.1 Cycle de l'eau (Source : <https://www.activeau.fr>)

Chaque étape du cycle implique un transport d'eau, un stockage temporaire et, parfois, un changement d'état. La Figure I.2 illustre schématiquement les états et les transformations du cycle hydrologique. Les quantités d'eau transitant par chaque étape peuvent être estimées à l'aide d'une équation appelée "bilan hydrologique" (Équation I.1), qui représente l'équilibre entre les entrées et les sorties d'eau dans un système défini spatialement et temporellement.

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (\text{I.1})$$

Où :

- **P** : Volume des précipitations (mm) ;
- **R** : Ruissellement de surface (mm) ;
- **G** : Écoulement souterrain (mm) ;
- **E** : Évaporation (mm) ;
- **T** : Transpiration (mm) ;
- **ΔS** : Variation des ressources en eau (mm).

La Figure I.2 illustre une schématisation simplifiée du cycle hydrologique, mettant en évidence les principaux processus et composants impliqués dans le mouvement et la transformation de l'eau à travers différents réservoirs naturels. Voici une interprétation détaillée des éléments représentés :

1. Atmosphère :

L'atmosphère joue un rôle central dans le cycle hydrologique. Elle reçoit l'eau sous forme de vapeur par le processus d'évaporation (des plans d'eau, des océans et des sols) et de transpiration (des

plantes). Cette vapeur d'eau se condense ensuite pour former des nuages, qui précipitent sous forme de pluie, neige ou autres formes de précipitations.

2. **Évaporation :**

Ce processus représente la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau, principalement sous l'effet de l'énergie solaire. L'évaporation se produit à la surface des océans, des lacs, des rivières et des sols humides.

3. **Énergie solaire :**

Le soleil est la source d'énergie principale qui alimente le cycle hydrologique. Il provoque l'évaporation de l'eau et influence les conditions météorologiques, permettant ainsi le transport de l'eau dans l'atmosphère.

4. **Plans d'eau :**

Les plans d'eau (lacs, rivières, étangs, etc.) sont des réservoirs importants dans le cycle hydrologique. Ils reçoivent l'eau des précipitations et du ruissellement, et contribuent à l'évaporation et à l'infiltration vers les nappes souterraines.

5. **Ruissellement :**

Le ruissellement désigne le mouvement de l'eau à la surface du sol, provenant des précipitations ou de la fonte des neiges. Il transporte l'eau vers les cours d'eau, les lacs et les océans, jouant un rôle clé dans la redistribution de l'eau à l'échelle des bassins versants.

6. **Océans :**

Les océans constituent le plus grand réservoir d'eau sur Terre. Ils sont à la fois une source majeure d'évaporation et un réceptacle final pour les eaux de ruissellement et les écoulements fluviaux. Les océans jouent un rôle crucial dans la régulation du climat et du cycle hydrologique global.

Cette figure met en lumière les interactions dynamiques entre les différents réservoirs d'eau (atmosphère, plans d'eau, océans) et les processus clés (évaporation, ruissellement) qui permettent la circulation continue de l'eau à travers le cycle hydrologique. Elle souligne également l'importance de l'énergie solaire comme moteur principal de ce cycle.

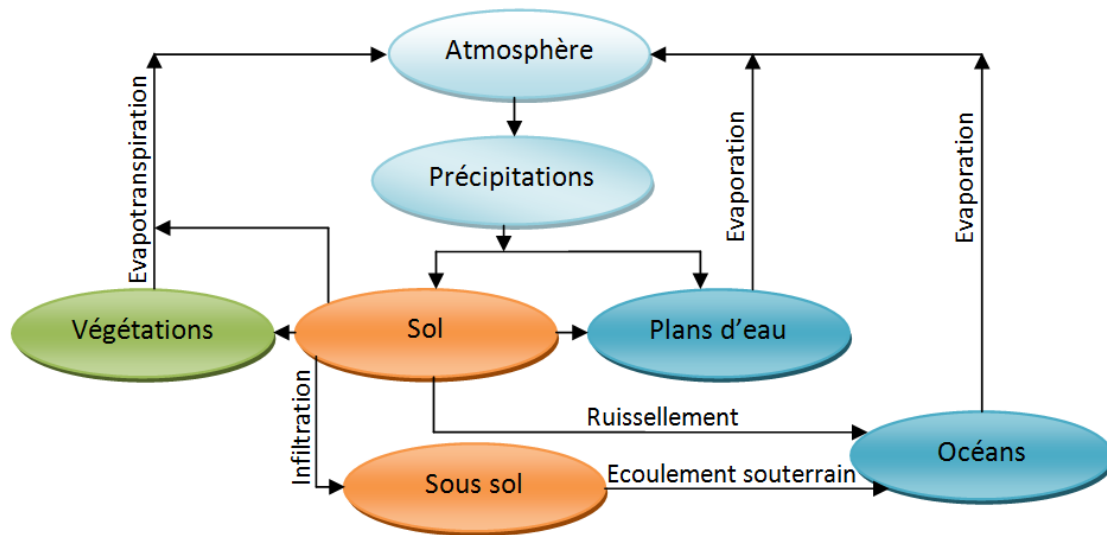


Figure I.2 Schématisation du cycle hydrologique

I.3 Modélisation hydrologique

La définition de l'hydrologie varie selon les époques et les perspectives des hydrologues. Dans les dictionnaires, elle est souvent décrite comme la science des eaux, étudiant leurs caractéristiques et propriétés à travers des éléments physiques, météorologiques, géologiques et chimiques. L'hydrologie se concentre principalement sur le cycle de l'eau, illustré dans la Figure I.1. Selon **Dooge (1988)** et **Perrin (2000)**, l'importance de l'hydrologie réside dans la résolution de l'équation du bilan hydrologique.

L'hydrologie continentale peut être définie comme la science qui étudie la circulation, la distribution, la dynamique et les caractéristiques de l'eau sur Terre à travers le cycle hydrologique. **Perrin (2000)** souligne que l'hydrologie est une discipline pluridisciplinaire, englobant l'hydrologie de surface, la glaciologie, l'hydrogéologie, la physico-chimie, ainsi que l'étude de l'érosion et du transport solide (sédiments). Elle est également liée, de manière directe ou indirecte, à des domaines tels que la météorologie, l'hydraulique, la géographie, la géologie, la biologie et l'écologie (**Bodian, 2011**).

Selon **Loumagne (2001)**, la modélisation hydrologique a pour objectif d'approfondir la compréhension des processus de surface du cycle de l'eau en simulant le comportement d'un hydro-système et en exploitant les résultats obtenus. De nombreuses recherches se sont ainsi focalisées sur l'analyse des comportements hydrologiques à l'aide d'outils de modélisation. Ces outils intègrent des facteurs complexes du cycle de l'eau et décrivent le fonctionnement d'un bassin versant à travers une représentation plus ou moins simplifiée de la réalité (**Bodian, 2011**).

I.4 Modélisation hydrologique pluie-débit

La modélisation pluie-débit est une branche essentielle des sciences hydrologiques qui se concentre sur l'étude du cycle hydrologique. Son objectif principal est de développer des outils permettant de quantifier les volumes d'eau, tels que les débits d'écoulement des bassins versants en réponse aux précipitations enregistrées (Mouelhi, 2003). Cette approche est particulièrement utile pour la gestion des ressources en eau, la prévision des crues, et la planification des aménagements hydrauliques.

La modélisation pluie-débit repose sur une représentation mathématique qui résume les étapes de la transformation de la pluie en débit sur un pas de temps donné (journalier, mensuel, annuel ou pluriannuel). Un modèle hydrologique est ainsi constitué d'un ensemble d'équations mathématiques qui décrivent l'état d'un bassin versant et l'évolution du cycle de l'eau en fonction de conditions météorologiques spécifiques. Ces équations intègrent des paramètres physiques, hydrologiques et climatiques pour simuler les processus hydrologiques tels que l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et l'écoulement souterrain.

L'objectif principal d'un modélisateur hydrologique est de concevoir un outil simple, robuste et efficace, capable d'estimer les débits des bassins versants de manière à ce qu'ils soient aussi proches que possible des débits observés aux stations hydrométriques représentatives de ces bassins (Figure I.3). Cette démarche implique une calibration et une validation du modèle à l'aide de données historiques pour garantir sa fiabilité et sa précision.

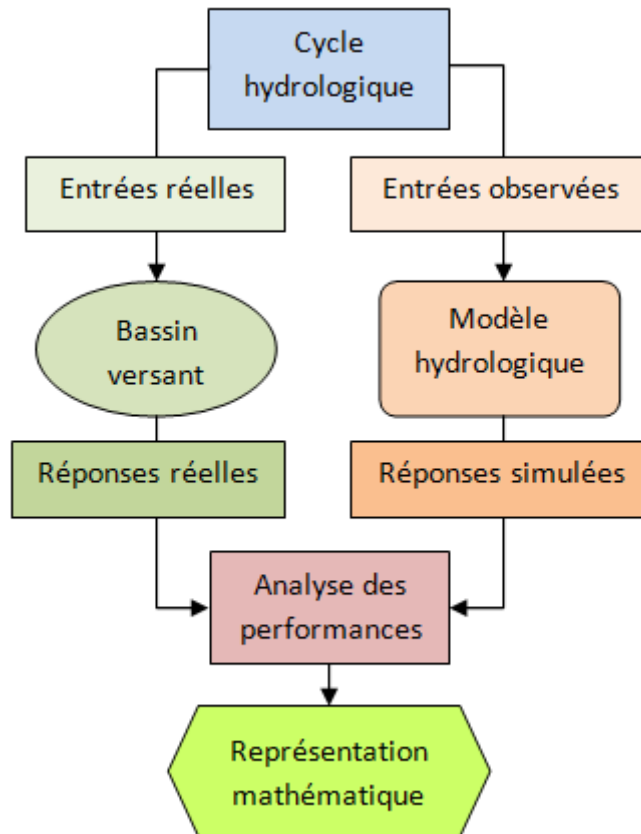


Figure I.3 Principe de la modélisation hydrologique pluie-débit

Trois approches principales sont utilisées dans la modélisation hydrologique :

A. **Approche débit-débit** : Cette méthode utilise des relations statistiques ou empiriques entre les débits observés à différents points du bassin versant. Elle est souvent employée pour extrapoler les débits dans des zones non jaugées.

B. **Approche pluie-débit** : Cette méthode, la plus étudiée, vise à convertir les précipitations en débits à l'échelle d'un bassin versant. Elle cherche à établir un lien direct entre les pluies et les débits observés, en tenant compte des processus hydrologiques intermédiaires tels que l'infiltration, le stockage et le ruissellement.

C. **Approche mixte** : Cette approche combine les deux précédentes, utilisant à la fois des données de débit et de précipitation pour améliorer la précision des simulations.

Selon **Perrin (2000)**, la méthode pluie-débit permet de mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant, la nature et le rôle des processus impliqués, leur importance relative, ainsi que les interactions spatiales et temporelles entre ces processus. Par exemple, elle permet d'identifier les zones contributives au ruissellement, d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les

régimes hydrologiques, ou encore de simuler les effets de l'aménagement du territoire sur les écoulements.

I.4.1 Bassin versant

Le bassin versant, souvent qualifié de "système hydrologique", représente une surface élémentaire hydrologiquement fermée. Il draine l'ensemble des précipitations tombées sur cette surface vers une section droite d'un cours d'eau, appelée exutoire. La surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de cette section constitue le bassin versant. La délimitation du bassin versant est définie par la ligne de partage des eaux, qui correspond généralement à la ligne des crêtes pour les bassins versants géographiques. Cette ligne sépare chaque bassin versant des bassins adjacents. Sur une carte topographique, cette limite est tracée à partir de l'exutoire en suivant des segments perpendiculaires aux courbes de niveau, passant par les crêtes et revenant à l'exutoire (Touaibia, 2015).

Cependant, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines, notamment lorsque le sol perméable recouvre un substratum imperméable. Dans ce cas, le bassin versant réel diffère du bassin versant topographique. Le bassin versant réel prend en compte les écoulements souterrains et les interactions entre les couches géologiques, ce qui peut modifier les limites hydrologiques (Roche, 1963).

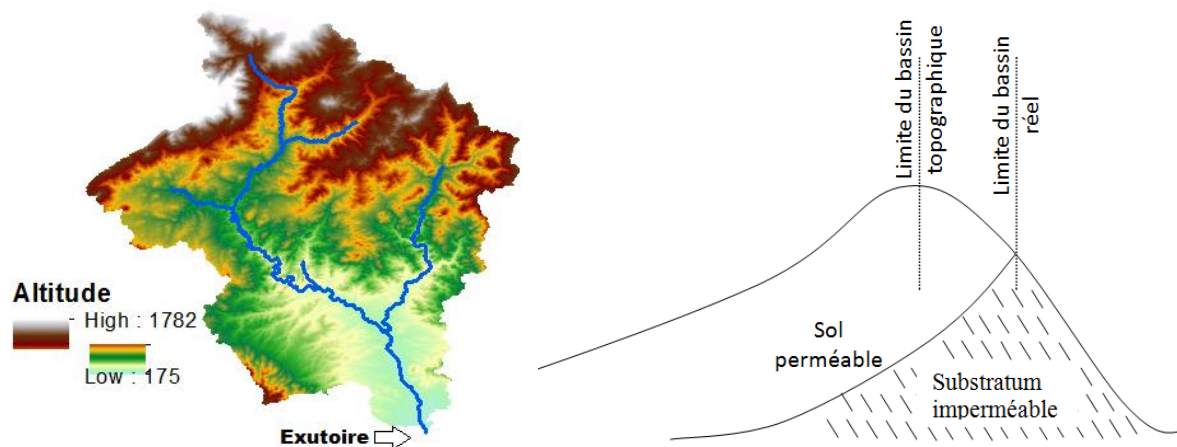


Figure I.4 Bassin versant topographique et bassin versant réel (Roche, 1963)

La description complète d'un bassin versant est complexe et nécessite une analyse comparative des cartes topographiques, géologiques et hydrographiques.

Pour simplifier cette description, plusieurs paramètres sont utilisés pour caractériser la forme et le fonctionnement du bassin versant :

a) **Aire du bassin :**

C'est un paramètre fondamental, car l'intensité de nombreux phénomènes hydrologiques (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) dépend de la superficie du bassin.

b) **Périmètre du bassin :**

Il permet de délimiter le bassin et de distinguer les bassins topographiques des bassins réels, chaque bassin réagissant de manière spécifique à son climat.

c) **Caractéristiques de forme :**

- **Coefficient de compacité :** Indique la forme du bassin (allongé ou ramassé).
- **Rectangle équivalent :** Simplifie la représentation du bassin pour les calculs hydrologiques.
- **Hypsométrie :** Décrit la répartition des altitudes dans le bassin.
- **Indices de pente :** Influencent la vitesse d'écoulement et le temps de réponse du bassin.

d) **Caractéristiques du réseau hydrographique :**

- **Ordre du réseau :** Hiérarchise les cours d'eau en fonction de leur importance.
- **Densité de drainage :** Mesure la densité du réseau hydrographique.
- **Profil en long :** Décrit la variation de l'altitude le long du cours d'eau.

e) **Caractéristiques géologiques :**

Elles fournissent des informations sur la perméabilité du bassin, l'érosion et le transport solide.

f) **Couvert végétal :**

Il influence la vitesse d'écoulement, l'évapotranspiration et la capacité de rétention du bassin. Ces caractéristiques peuvent être analysées et modélisées à l'aide de logiciels de systèmes d'information géographique (SIG) tels qu'ArcGIS ou QGIS. Ces outils permettent de collecter, organiser, gérer, analyser et diffuser des informations géographiques, facilitant ainsi la compréhension et la gestion des bassins versants.

I.4.2 Modèles hydrologiques

L'analyse des phénomènes physiques, chimiques, hydrodynamiques, biologiques et hydrologiques conduit souvent à l'étude des relations entre différentes variables caractérisant ces phénomènes. Ces relations sont formalisées dans des modèles hydrologiques, qui sont des ensembles d'équations mathématiques représentant la transformation de l'eau au sein du cycle hydrologique à l'échelle d'un bassin versant. Ces modèles prennent en compte plusieurs facteurs influençant positivement ou négativement les processus hydrologiques.

Trois approches principales sont utilisées dans la modélisation hydrologique :

A. Approche débit-débit :

Cette méthode repose sur des relations statistiques ou empiriques entre les débits observés à différents points du bassin. Elle est souvent utilisée pour extrapoler les débits dans des zones non jaugées.

B. Approche pluie-débit :

C'est la méthode la plus étudiée. Elle vise à convertir les précipitations en débits à l'échelle du bassin versant en établissant un lien direct entre les pluies et les débits observés. Cette approche permet de comprendre le fonctionnement du bassin, la nature des processus hydrologiques impliqués (infiltration, ruissellement, évapotranspiration), ainsi que leur importance relative.

C. Approche mixte :

Cette méthode combine les deux approches précédentes, utilisant à la fois des données de débit et de précipitation pour améliorer la précision des simulations.

Selon **Perrin (2000)**, l'approche pluie-débit permet de mieux comprendre les interactions spatiales et temporelles entre les processus hydrologiques, ainsi que leur impact sur les écoulements. Elle est essentielle pour la prévision des crues, la gestion des ressources en eau et l'évaluation des impacts des changements climatiques ou des aménagements territoriaux.

I.4.2.1 Composantes d'un modèle hydrologique

Un modèle hydrologique est généralement structuré autour de cinq composantes principales, illustrées dans la Figure I.5 :

a. Variables d'entrée :

Ce sont les séries chronologiques nécessaires au fonctionnement du modèle, telles que les précipitations, les températures, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'occupation du sol, etc. Ces données représentent les conditions météorologiques et environnementales du bassin versant.

b. Variables de sortie :

Elles constituent la réponse du modèle, généralement sous forme de séries chronologiques de débits (liquides ou solides), de qualité des eaux, ou d'autres indicateurs hydrologiques.

c. Variables d'état :

Elles décrivent l'état interne du système hydrologique, comme le stockage d'eau dans les réservoirs

souterrains ou de surface, les taux d'infiltration, ou les processus de routage. Ces variables permettent de suivre l'évolution dynamique du système.

d. **Paramètres du modèle :**

Ce sont les coefficients ou les constantes qui doivent être calibrés pour adapter les lois du modèle aux caractéristiques spécifiques du bassin versant étudié. La calibration est une étape cruciale pour assurer la précision et la fiabilité du modèle.

e. **Performances du modèle :**

Elles mesurent l'écart entre les variables d'entrée et de sortie, permettant d'évaluer la qualité des simulations. Les indicateurs de performance (comme le coefficient de Nash-Sutcliffe ou l'erreur quadratique moyenne) sont utilisés pour valider le modèle.

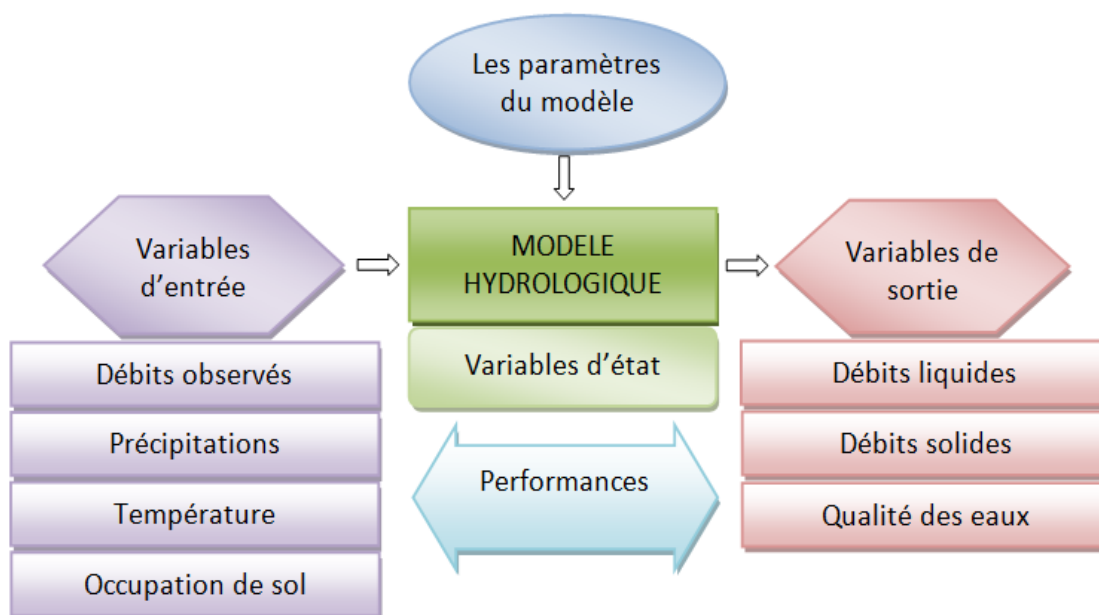


Figure I.5 : Composantes d'un modèle hydrologique

Les modèles hydrologiques pluie-débit permettent de transformer les séries chronologiques météorologiques en séries de débits. Cette transformation repose sur deux fonctions principales :

- **Fonction de production :**

Elle détermine la pluie nette, c'est-à-dire la fraction des précipitations qui contribue directement à l'écoulement, après soustraction des pertes par infiltration, évapotranspiration, etc.

- **Fonction de transfert :**

Elle transforme la pluie nette en un hydrogramme de débit, en simulant les processus de routage et de propagation de l'eau à travers le bassin versant.

I.4.2.2 Classification des modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques peuvent être classés selon plusieurs critères, comme le montre la Figure I.6. Voici les principales classifications :

a. **Classification selon l'objet étudié :**

- **Modèles déterministes** : Ces modèles reposent sur des lois physiques ou des relations mathématiques précises pour décrire les processus hydrologiques. Ils sont utilisés lorsque les phénomènes étudiés sont bien compris et observables.

- **Modèles probabilistes** : Ils intègrent des lois de probabilité pour tenir compte des incertitudes et de la variabilité naturelle des processus hydrologiques. Ils sont particulièrement utiles pour les études de risques (crues, sécheresses, etc.).

b. **Classification selon la représentation des processus hydrologiques :**

- **Modèles de type "Boîte noire"** : Ces modèles traitent les relations pluie-débit comme des séries chronologiques sans expliciter les processus physiques sous-jacents. Ils sont souvent basés sur des méthodes statistiques ou empiriques.

- **Modèles conceptuels (ou à réservoirs)** : Ces modèles représentent le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés (exemple : modèle GR4J). Ils simplifient les processus hydrologiques tout en conservant une représentation physique réaliste.

- **Modèles à base physique** : Ces modèles, comme SWAT (Soil and Water Assessment Tool), décrivent les processus hydrologiques en détail, en s'appuyant sur des équations physiques. Ils sont particulièrement adaptés pour simuler les interactions complexes entre les différents composants du bassin versant.

c. **Classification selon l'approche spatiale :**

- **Modèles globaux** : Ils considèrent le bassin versant comme une entité unique, sans tenir compte des variations spatiales internes. Ces modèles sont simples et rapides à mettre en œuvre.

- **Modèles distribués** : Ils prennent en compte les variabilités spatiales du bassin versant en le divisant en sous-unités (exemple : HEC-HMS, SWAT). Ces modèles sont plus complexes mais permettent une représentation plus précise des processus hydrologiques.

d. **Classification selon l'approche temporelle :**

- **Modèles événementiels** : Ils sont utilisés pour simuler des événements hydrologiques spécifiques (comme une crue) sur une durée limitée. Les conditions initiales (comme l'humidité du sol) jouent un rôle crucial dans ces modèles.

- **Modèles continus** : Ils simulent les processus hydrologiques sur de longues périodes, en tenant compte des variations temporelles des conditions initiales (comme l'ETP). Ces modèles sont adaptés pour l'étude des impacts climatiques ou des aménagements à long terme.

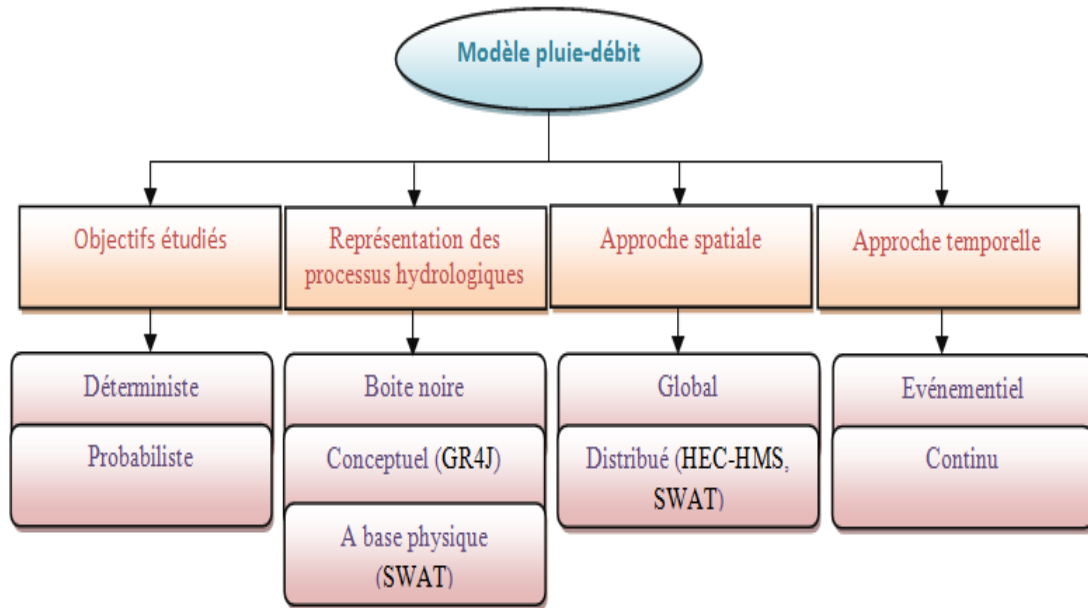


Figure I.6 Classification des modèles hydrologiques

La classification des modèles hydrologiques permet de choisir l'outil le plus adapté en fonction des objectifs de l'étude, des caractéristiques du bassin versant et des données disponibles. Chaque type de modèle présente des avantages et des limites, et leur combinaison peut offrir une meilleure compréhension des processus hydrologiques.

I.4.2.3 Critères de sélection d'un modèle hydrologique

La fiabilité des résultats d'une étude hydrologique repose sur plusieurs facteurs liés à la variabilité spatiale et temporelle. Le choix du modèle hydrologique doit être adapté aux objectifs spécifiques de l'étude. Voici les principaux éléments à considérer lors de la sélection d'un modèle hydrologique:

A. Adéquation aux objectifs de l'étude : Le modèle doit être aligné sur les objectifs clairement définis de l'étude. Par exemple, s'agit-il de prévoir des crues, d'évaluer les ressources en eau, ou d'analyser l'impact de changements environnementaux ?

B. Disponibilité et qualité des données : La quantité, la qualité et l'accessibilité des données (précipitations, débits, topographie, etc.) sont des facteurs déterminants dans le choix du modèle. Un modèle sophistiqué nécessite des données précises et complètes.

C. Échelle spatiale et temporelle : Le modèle doit correspondre à l'échelle spatiale (bassin versant, région) et temporelle (horaire, journalier, mensuel, annuel) requise par l'étude. Par exemple, un modèle conçu pour des prévisions journalières ne sera pas adapté à une analyse annuelle.

Il est crucial de choisir un modèle en fonction des besoins spécifiques en matière de gestion des ressources en eau et de compréhension des processus hydrologiques. Les contraintes pratiques, telles que la disponibilité des données météorologiques, hydrologiques, topographiques et pédologiques, doivent également être prises en compte.

I.4.2.4 Limites des modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques peuvent être confrontés à plusieurs limitations, notamment :

A. **Erreurs et incertitudes des données d'entrée** : Les séries chronologiques ou les cartes caractérisant les bassins versants peuvent contenir des erreurs, des lacunes ou des incertitudes, ce qui affecte la précision des résultats.

B. **Hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations** : La variabilité spatiale et temporelle des précipitations complique la quantification des apports en eau dans les bassins versants.

C. **Diversité des caractéristiques des bassins versants** : Les différences significatives entre les bassins (topographie, sols, végétation, etc.) influencent leur réponse hydrologique, rendant la modélisation plus complexe.

D. **Limites dans la représentation des processus hydrologiques** : Certains modèles ne prennent pas en compte tous les processus hydrologiques, ce qui peut réduire leur capacité à simuler fidèlement la réalité.

I.4.2.5 Applications des modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont des outils essentiels pour analyser et prédire les comportements hydrologiques des bassins versants. Leurs principales applications incluent ([BAAhmed, 2015](#)) :

a) **Simulation des débits** : Ils permettent de combler les lacunes dans les séries de données, de reconstituer des débits historiques ou de réaliser des tests statistiques.

b) **Prédétermination des débits de crue et d'étiage** : Ces modèles aident à estimer la fréquence et la durée des débits extrêmes (crues ou étiages), ce qui est crucial pour la conception d'ouvrages hydrauliques (barrages, réservoirs) ou pour la gestion des risques d'inondation.

c) **Prévision des crues et des étiages** : Ils permettent d'anticiper les débits critiques (de quelques heures à quelques jours à l'avance), en tenant compte de l'état actuel du bassin. Cela facilite la gestion des ressources en eau et la prévention des risques.

d) **Évaluation des impacts des aménagements** : Les modèles hydrologiques sont utilisés pour prédire les modifications de la réponse hydrologique d'un bassin suite à des aménagements

(construction de barrages, changements d'usage des sols) ou à des changements environnementaux (climat, végétation).

I.4.2.6 Calibration et validation des modèles hydrologiques pluie-débit

Pour évaluer et identifier les paramètres des modèles hydrologiques, des techniques de calibration ont été développées. Ces méthodes dépendent de la disponibilité d'informations précises sur les propriétés du système étudié et sur la nature des interactions entre les variables. La calibration d'un modèle hydrologique consiste à ajuster ses paramètres, qui ne sont pas directement mesurables sur le terrain, afin que les résultats simulés correspondent aux données historiques observées. L'objectif est de rapprocher le comportement du modèle de celui du bassin versant réel. Pour les modèles pluie-débit, il est indispensable de disposer de données de débit observées pour mener à bien ce processus (Allali, 2023).

En pratique, il existe deux principales méthodes de calibration :

A. **Calibration manuelle** : Cette méthode consiste à ajuster manuellement les paramètres du modèle et à évaluer l'écart entre les résultats simulés et les observations. Plusieurs essais sont effectués jusqu'à ce que les paramètres produisent des résultats satisfaisants par rapport aux objectifs fixés. Cette approche repose souvent sur une analyse graphique des simulations.

B. **Optimisation automatique** : Cette technique utilise des algorithmes numériques pour trouver les valeurs optimales des paramètres en minimisant ou maximisant une fonction objectif. L'algorithme explore différentes combinaisons de paramètres pour identifier celle qui répond le mieux au critère défini.

Une troisième approche combine ces deux méthodes : on peut commencer par une calibration manuelle pour affiner les paramètres initiaux, puis utiliser une optimisation automatique pour finaliser le processus.

La validation est une étape cruciale qui permet de vérifier la capacité du modèle à reproduire les résultats sur une série de données indépendantes, non utilisées lors de la calibration. Cette étape est essentielle pour évaluer la robustesse et la représentativité du modèle, mais elle nécessite la disponibilité de données supplémentaires.

I.4.2.7 Analyse des performances des modèles hydrologiques

La calibration des modèles hydrologiques est souvent associée à l'évaluation des incertitudes. Quatre types d'incertitudes sont généralement identifiés dans l'application des modèles hydrologiques (Amiar, 2021) :

- a. **Incertaince liée à la nature** : Elle découle de la variabilité spatio-temporelle des processus naturels, qui sont souvent complexes et difficiles à modéliser avec précision.
- b. **Incertaince liée aux données** : Les données disponibles, souvent limitées en nombre et en qualité, peuvent ne pas refléter la variabilité et la complexité des phénomènes hydrologiques. Des erreurs aléatoires ou systématiques peuvent survenir lors de l'acquisition ou de l'interpolation des données.
- c. **Incertaince liée aux paramètres du modèle** : Les incertitudes sur les données influencent directement les paramètres du modèle, notamment lors de leur optimisation pendant la calibration.
- d. **Incertaince liée à la structure du modèle** : Cette incertaince provient de l'incapacité du modèle à représenter fidèlement les processus physiques réels, tels que le ruissellement ou l'infiltration.

La transformation des précipitations en débit à l'exutoire d'un bassin versant est modélisée à l'aide d'un modèle pluie-débit, qui peut fonctionner à différentes échelles temporelles (journalière, mensuelle, annuelle, etc.). Une fois le modèle structuré, il est confronté aux données observées pour évaluer sa performance et identifier ses limites. Les données permettent d'ajuster les paramètres du modèle et d'analyser sa capacité à reproduire les processus hydrologiques.

Plusieurs indicateurs de performance sont utilisés dans la littérature pour évaluer les modèles hydrologiques. Parmi les plus couramment employés, on trouve des coefficients statistiques qui mesurent l'adéquation entre les simulations et les observations. Ces indicateurs sont essentiels pour juger de la fiabilité et de la précision du modèle.

I.4.2.7.1 Critère de Nash-Sutcliffe (NSE)

Le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) est une mesure largement utilisée en modélisation hydrologique pour évaluer la performance d'un modèle par rapport aux données observées. Développé en 1970 par Nash et Sutcliffe, cet indicateur normalisé compare la variance résiduelle du modèle à la variance des données mesurées. Les valeurs du NSE varient de $-\infty$ à 1. Une valeur de 1 indique une parfaite adéquation entre les valeurs simulées et observées, signifiant que le modèle

reproduit fidèlement les données. En revanche, une valeur inférieure à 0 suggère que le modèle est moins performant que la simple moyenne des observations (Fanta & Sime, 2022).

Le NSE est particulièrement utile pour des simulations continues à long terme et permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les tendances des variables de sortie, telles que les débits, les sédiments, les nutriments ou les pesticides. Sa robustesse et sa popularité en font un outil de référence pour comparer les performances de différents modèles. De plus, il peut intégrer l'incertitude liée aux mesures (Moriasi et al., 2016).

Mathématiquement, le NSE est exprimé par l'équation suivante :

$$\text{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{sim},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \right] \quad (\text{I.2})$$

Où $Q_{\text{obs},i}$ est le débit observé, $Q_{\text{sim},i}$ est le débit simulé, $\overline{Q_{\text{obs}}}$ est le débit moyen observé.

I.4.2.7.2 Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est un indicateur clé pour évaluer la précision des modèles prédictifs. Elle mesure l'écart entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs observées, en tenant compte de l'amplitude des erreurs. Plus la valeur de la RMSE est faible, plus le modèle est précis. Cet indicateur est particulièrement utile pour identifier les écarts importants entre les simulations et les observations.

La formule de la RMSE est donnée par :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{sim},i})^2}{N}} \quad (\text{I.3})$$

Où $Q_{\text{obs},i}$ est le débit observé, $Q_{\text{sim},i}$ est le débit simulé, N est le nombre de données observées.

I.4.2.7.3 Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination (R^2) est un indicateur statistique utilisé pour évaluer la qualité d'un modèle de régression. Il mesure la proportion de la variance de la variable dépendante (par exemple, le débit) qui est expliquée par les variables indépendantes du modèle. Le R^2 varie entre 0 et 1, où une valeur de 1 indique que le modèle explique parfaitement la variabilité des données, tandis qu'une valeur de 0 signifie qu'il n'explique aucune variabilité.

La formule du R^2 est la suivante :

$$R^2 = \left[\frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}}) \times (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2}} \right]^2 \quad (I.4)$$

Où $Q_{obs,i}$ et $Q_{sim,i}$ sont, respectivement, les débits observé et simulé. $\overline{Q_{obs}}$ et $\overline{Q_{sim}}$ sont, respectivement, les débits moyens observe et simulé.

I.4.2.7.4 Pourcentage de biais (PBIAS)

Le pourcentage de biais (PBIAS) mesure la tendance moyenne du modèle à surestimer ou sous-estimer les valeurs observées. Une valeur de PBIAS égale à 0 indique l'absence de biais, tandis que des valeurs positives indiquent une sous-estimation et des valeurs négatives une surestimation ([Barbosa et al., 2019](#)).

La formule du PBIAS est :

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) (100)}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (I.5)$$

Où $Q_{obs,i}$ et $Q_{sim,i}$ sont, respectivement, les débits observé et simulé.

I.4.2.7.5 Ratio de l'écart type des résidus (RSR)

Le ratio de l'écart type des résidus (RSR) est une mesure de la précision relative du modèle. Il est calculé en divisant la RMSE par l'écart type des valeurs observées. Le RSR est une valeur sans dimension qui varie de 0 à l'infini, où une valeur proche de 0 indique une excellente performance du modèle ([Barbosa et al., 2019](#)).

La formule du RSR est :

$$RSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (I.6)$$

Où :

- $Q_{obs,i}$: débit observé à l'instant i ;
- $Q_{sim,i}$: débit simulé à l'instant i ;

- Q_{obs} : débit moyen observé.

I.4.2.8 Classification des performances des critères

La qualité des résultats d'un modèle hydrologique est évaluée en fonction de plages de valeurs spécifiques pour chaque critère de performance. Le tableau ci-dessous présente une classification des performances basée sur les valeurs des indicateurs couramment utilisés, tels que le NSE, la RMSE, le R^2 , le PBIAS et le RSR. Ces plages de valeurs permettent de déterminer si les résultats sont très bons, bons, satisfaisants ou non satisfaisants (Moriassi et al., 2016 ; Barbosa et al., 2019).

Tableau I.1 Classification de la qualité des résultats selon les critères de performance

Critère	Très bon	Bon	Satisfaisant	Non satisfaisant
NSE	$0.80 < NSE \leq 1$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$NSE \leq 0.50$
R^2	$0.85 < R^2 \leq 1$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$
PBIAS (%)	$PBIAS < \pm 5$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$PBIAS \geq \pm 15$
RSR	$0.00 < RSR \leq 0.50$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$RSR > 0.70$

Note : Les plages de valeurs pour la RMSE ne sont pas standardisées et dépendent du contexte de l'étude. Elles doivent être définies en fonction des caractéristiques du bassin versant et des données disponibles. Pour nos résultats une valeur de RMSE de l'ordre de 10% de la moyenne serait satisfaisante.

Les plages de performances sont expliquées par :

A. NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) :

- Très bon : Un NSE supérieur à 0.80 indique une excellente adéquation entre les valeurs simulées et observées.
- Bon : Un NSE entre 0.70 et 0.80 reflète une bonne performance du modèle.
- Satisfaisant : Un NSE entre 0.50 et 0.70 est acceptable, mais le modèle peut nécessiter des améliorations.
- Non satisfaisant : Un NSE inférieur ou égal à 0.50 suggère que le modèle ne reproduit pas correctement les observations.

B. R^2 (Coefficient de détermination) :

- Très bon : Un R^2 supérieur à 0.85 indique que le modèle explique une grande partie de la variabilité des données.

- Bon : Un R^2 entre 0.75 et 0.85 montre une bonne capacité du modèle à expliquer les données.
- Satisfaisant : Un R^2 entre 0.60 et 0.75 est acceptable, mais des améliorations peuvent être nécessaires.
- Non satisfaisant : Un R^2 inférieur ou égal à 0.60 indique une faible capacité du modèle à expliquer la variabilité.

C. PBIAS (Pourcentage de biais) :

- Très bon : Un PBIAS inférieur à ± 5 % indique un biais négligeable.
- Bon : Un PBIAS entre ± 5 % et ± 10 % montre un biais modéré.
- Satisfaisant : Un PBIAS entre ± 10 % et ± 15 % est acceptable, mais révèle un biais significatif.
- Non satisfaisant : Un PBIAS supérieur ou égal à ± 15 % indique un biais important.

D. RSR (Ratio de l'écart type des résidus) :

- Très bon : Un RSR inférieur ou égal à 0.50 indique une excellente précision du modèle.
- Bon : Un RSR entre 0.50 et 0.60 montre une bonne précision.
- Satisfaisant : Un RSR entre 0.60 et 0.70 est acceptable, mais la précision peut être améliorée.
- Non satisfaisant : Un RSR supérieur à 0.70 suggère une faible précision du modèle.

I.4.2.9 Exemples de modèles hydrologiques couramment utilisés

Plusieurs modèles hydrologiques ont été largement employés dans des études antérieures, notamment en Algérie, et ont démontré des résultats satisfaisants. Voici une présentation de trois modèles fréquemment utilisés : HEC-HMS, SWAT et HBV.

A. Modèle HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) est un outil open source développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine en 1998. Il s'agit d'un modèle hydrologique semi-distribué et conceptuel, conçu pour simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant en réponse à des précipitations spécifiques. Principalement utilisé pour des analyses événementielles, il repose sur des approches empiriques pour modéliser les processus hydrologiques. Le modèle HEC-HMS sera approfondi dans la suite de ce travail.

B. Modèle SWAT

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un outil semi-distribué basé sur des principes physiques, développé par le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA). Il est conçu pour évaluer et prédire la circulation de l'eau, le transport des sédiments et la productivité agricole, y compris dans des bassins versants non jaugés. Le modèle SWAT est particulièrement adapté pour des simulations à long terme et sera également détaillé ultérieurement dans ce travail.

C. Modèle HBV

Le modèle HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) a été développé par l'Institut météorologique et hydrologique suédois (SMHI). Ce modèle conceptuel semi-distribué permet de diviser un bassin versant en sous-bassins, eux-mêmes segmentés en zones homogènes en fonction de critères tels que la végétation, la superficie des lacs et l'altitude. Le modèle HBV utilise des données horaires de température et de précipitation, ainsi que des estimations mensuelles de l'évapotranspiration potentielle, pour simuler les débits horaires. Il intègre également des caractéristiques topographiques, comme la superficie et l'altitude, pour une représentation spatiale détaillée du bassin ([Ouachani et al., 2007](#)). La figure I.7 illustre la structure générale du modèle HBV.

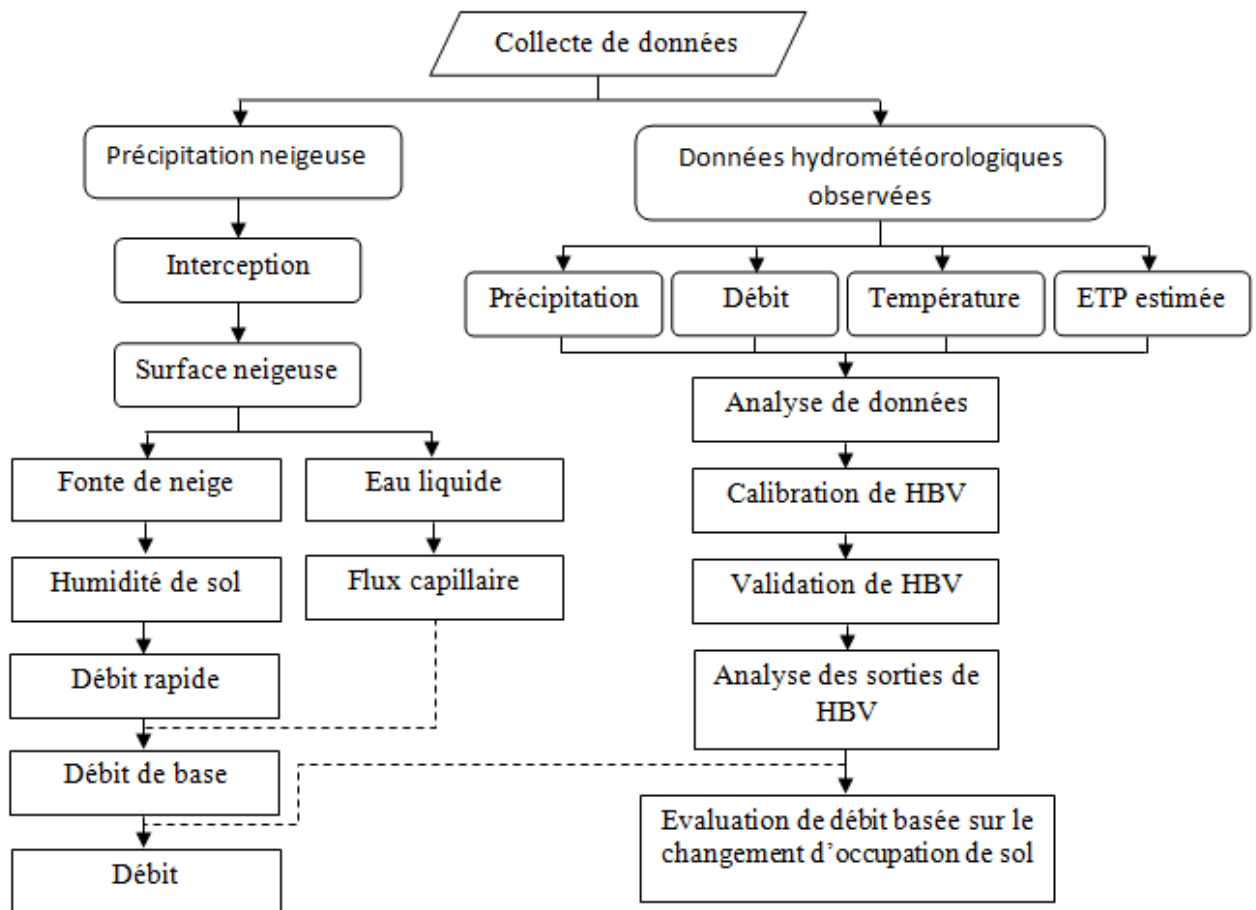


Figure I.7 Structure du modèle HBV suivant (Soomro et al., 2021)

D. Modèle MIKE SHE

Le modèle MIKE SHE, développé par l'Institut Hydraulique Danois (DHI), est un outil hydrologique distribué qui s'appuie sur des principes physiques pour simuler de manière détaillée les différents processus du cycle hydrologique. Lorsqu'il est correctement calibré, ce modèle permet d'obtenir des résultats quantitatifs précis pour des phénomènes tels que les précipitations, l'infiltration, l'évaporation, l'évapotranspiration, l'interception par la végétation, ainsi que les écoulements de surface et souterrains dans les zones saturées et non saturées. Contrairement à de nombreux autres modèles hydrologiques, MIKE SHE est capable de simuler à la fois l'écoulement direct (issu des précipitations) et l'écoulement de base (provenant des eaux souterraines), offrant ainsi une représentation complète du flux hydrologique global.

En plus de ces fonctionnalités, MIKE SHE intègre des données relatives aux différents types de sols et d'occupation des sols, ce qui permet une modélisation plus réaliste des interactions entre les composantes du cycle de l'eau. Le modèle est également capable de simuler le transport de polluants, tels que les pesticides et les nutriments, ainsi que le déplacement des sédiments. Il prend

en compte les interactions dynamiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et peut être utilisé pour évaluer des problèmes de qualité de l'eau. Ces caractéristiques en font un outil précieux pour l'évaluation de scénarios de gestion des ressources en eau, notamment dans des contextes où les enjeux environnementaux et agricoles sont complexes.

Le modèle, MIKE SHE se distingue par sa capacité à modéliser de manière intégrée l'ensemble des processus hydrologiques, tout en tenant compte des spécificités locales telles que la variabilité des sols, de la végétation et des activités humaines. Cette approche globale en fait un modèle particulièrement adapté pour des études approfondies sur la gestion durable des ressources en eau et l'impact des changements climatiques ou anthropiques sur les systèmes hydrologiques.

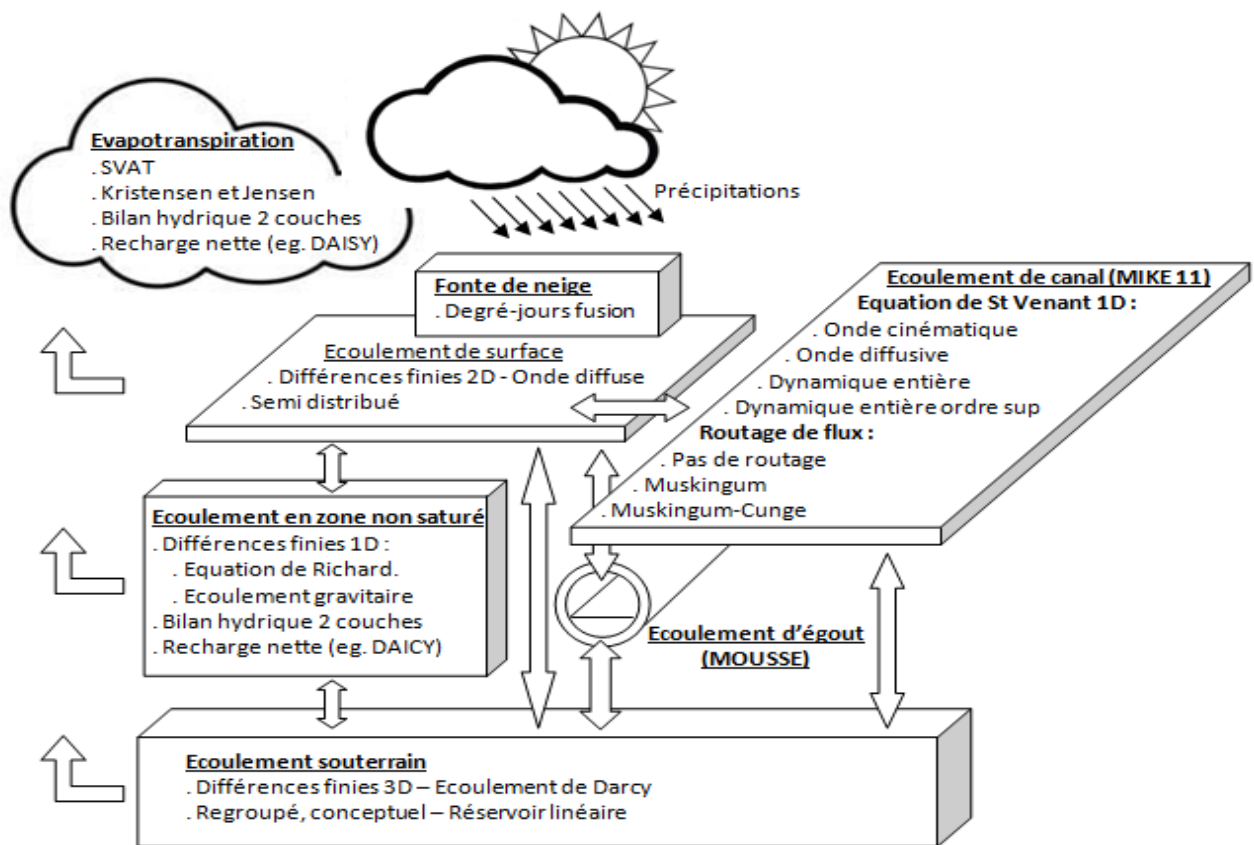


Figure I.8 Architecture du modèle MIKE SHE (Qiang, 2019)

E. Modèle TOPMODEL

TOPMODEL est un modèle hydrologique semi-distribué de type pluie-débit, qui s'appuie sur des concepts théoriques pour simuler les processus de ruissellement en utilisant des données topographiques. Ce modèle est souvent qualifié de "physique" car ses paramètres peuvent être

définis et interprétés théoriquement, bien qu'il conserve une structure conceptuelle. Il se distingue par son approche de zone contributive variable, qui permet de modéliser les variations spatiales des écoulements en fonction des caractéristiques du bassin versant. TOPMODEL peut être appliqué à un seul bassin versant ou à plusieurs sous-bassins, en utilisant des données d'élévation sous forme de grilles (MNT, Modèle Numérique de Terrain) pour représenter la topographie de la zone étudiée (Devi et al., 2015).

Le modèle est structuré autour de deux composantes principales : un compartiment de stockage et un compartiment de routage. Le compartiment de stockage représente trois réservoirs conceptuels qui simulent le stockage de l'eau dans le sol, tandis que le compartiment de routage repose sur une fonction de zone-distance et deux paramètres de vitesse pour décrire le transfert de l'eau à travers le bassin. L'un des éléments clés de TOPMODEL est l'utilisation de l'indice topographique, dérivé du MNT, qui permet d'évaluer la propension d'une cellule ou d'une zone à générer du ruissellement en fonction de sa position topographique et de sa capacité à retenir l'eau. Cet indice est essentiel pour anticiper le comportement hydrologique du bassin et pour comprendre la répartition spatiale des zones saturées.

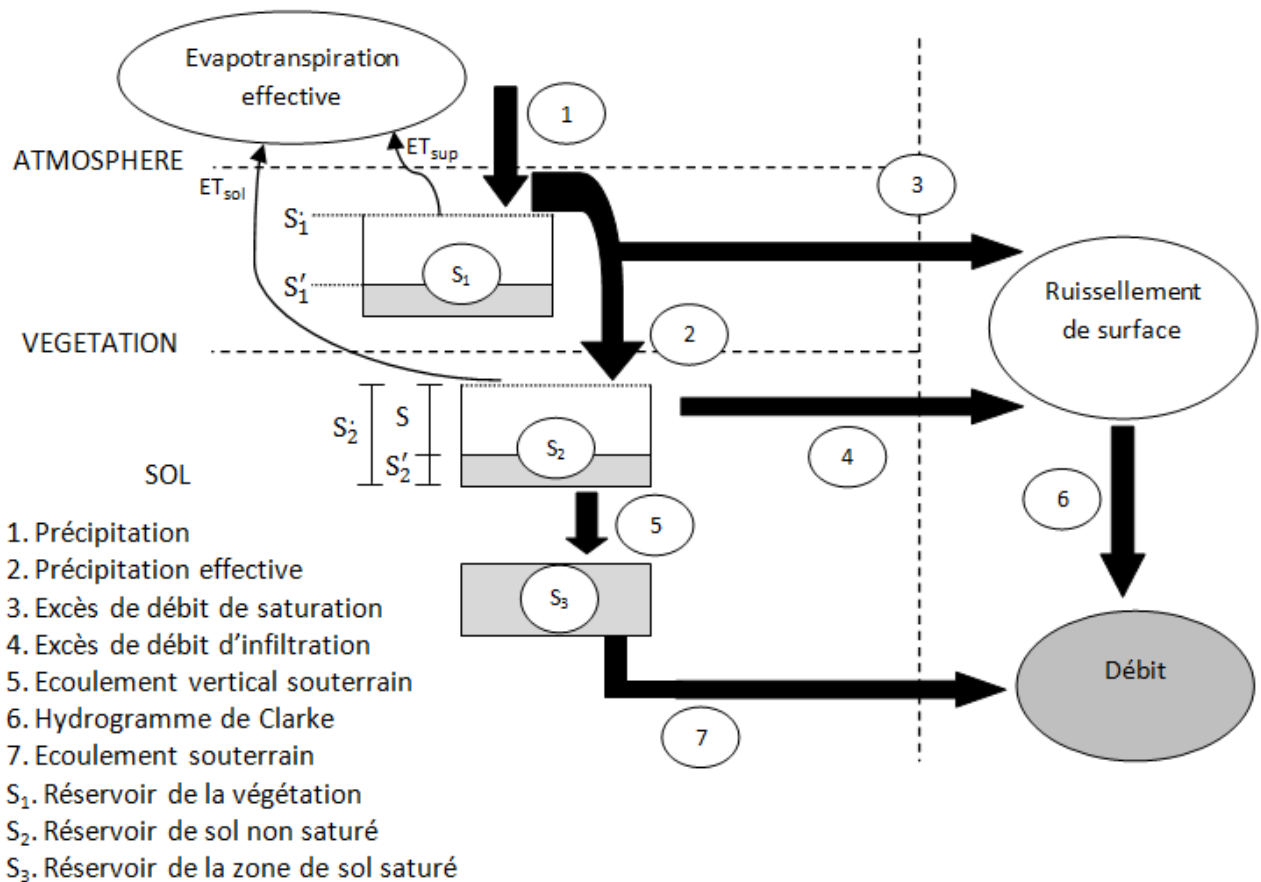


Figure I.9 Schéma du processus hydrologique de TOPMODEL (Salviano, et al., 2021)

F. Modèle GR (Génie rural)

Au début des années 1980, Cemagref (Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du génie Rural, des Eaux et Forêts) a mis au point des modèles hydrologiques (du Génie Rural GR) qui permettent de suivre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire. Même s'ils peuvent parfois être comparés à des modèles conceptuels en raison de leur structure à réservoirs, ces modèles sont en réalité des modèles empiriques : ils ont été construits à partir de grands jeux de données et ont progressivement découvert la structure qui permet de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant.

Les modèles GR ont été créés en fonction de différentes périodes de fonctionnement : annuelle (GR1A), mensuelle (GR2M) et journalière (GR4J). Pour fonctionner, ces modèles nécessitent uniquement des données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle, qui peuvent être une courbe moyenne annuelle.

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle global de prédiction des précipitations et des débits à quatre paramètres.

Parmi ces modèles, le GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est particulièrement reconnu pour sa capacité à prédire les débits à partir des précipitations (Figure I.10). Comme son nom l'indique, il repose sur quatre paramètres principaux, ce qui en fait un modèle à la fois simple et efficace. Depuis sa première version, le GR4J a connu plusieurs améliorations successives grâce aux travaux de chercheurs. Ces évolutions ont permis d'optimiser ses performances et d'élargir ses domaines d'application.

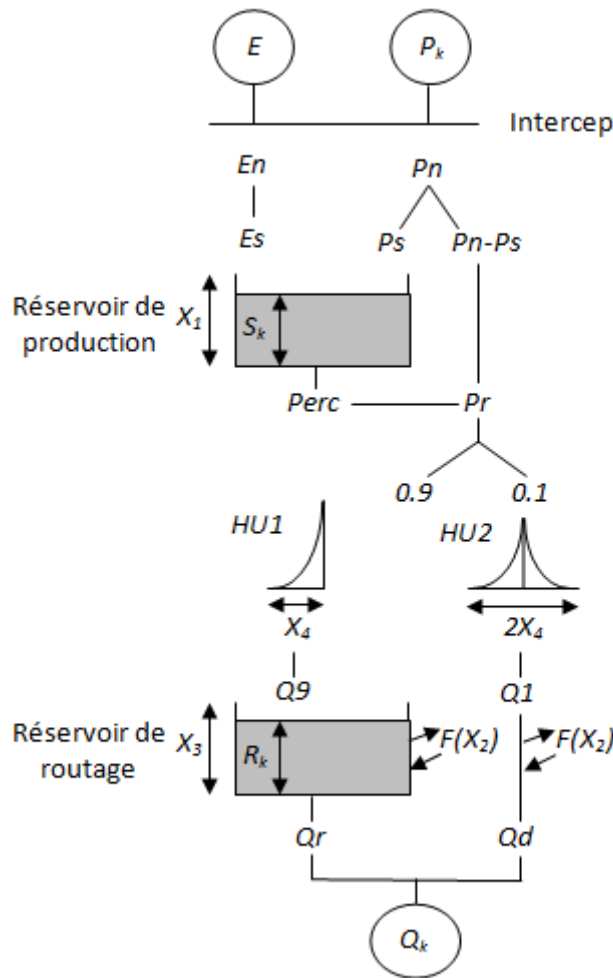


Figure I.10 Structure du modèle GR4J (Perrin et al., 2007)

G. Modèle IHACRES

Le modèle IHACRES (Identification of Hydrological And Catchment Response System) est un outil conceptuel intégré largement utilisé pour simuler les processus pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Sa popularité s'explique par sa simplicité d'utilisation et le faible volume de données d'entrée requis, tout en maintenant des liens pertinents entre ses paramètres et les caractéristiques physiques du bassin étudié (Fattahi et al., 2022). Cette particularité en fait un modèle particulièrement adapté pour les études hydrologiques dans des contextes où les données sont limitées.

Le modèle IHACRES est structuré autour de deux modules principaux : un module non linéaire et un module linéaire. Le module non linéaire a pour fonction de transformer les données d'entrée, telles que les précipitations et la température, en une estimation des précipitations effectives. Ces précipitations effectives sont ensuite traitées par le module linéaire, qui les convertit en un hydrogramme de débit à l'exutoire du bassin. Cette approche en deux étapes permet de

capturer à la fois les processus de transformation des précipitations en écoulement et les dynamiques temporelles des débits.

L'un des avantages majeurs du modèle IHACRES réside dans sa capacité à reproduire le comportement hydrologique d'un bassin versant avec un nombre limité de paramètres, tout en conservant une certaine représentativité physique. Cela en fait un outil de choix pour des applications variées, allant de la recherche académique à la gestion opérationnelle des ressources en eau. De plus, sa flexibilité et sa simplicité permettent une mise en œuvre rapide, même dans des régions où les données hydrométéorologiques sont peu disponibles.

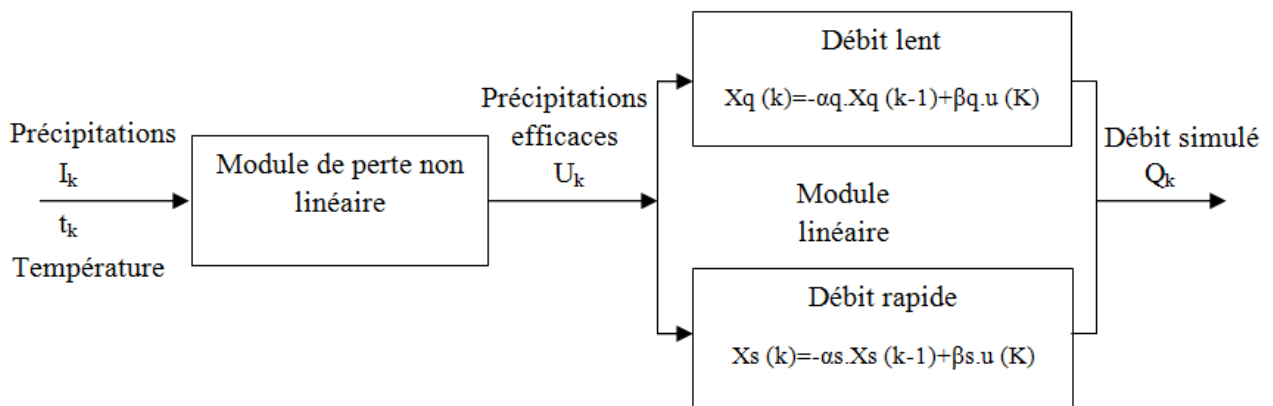


Figure I.11 Structure du modèle IHACRES (Allali, 2023)

I.4.2.10 Sensibilité des modèles hydrologiques aux paramètres

Les utilisateurs de modèles hydrologiques sont souvent confrontés à la complexité de déterminer les paramètres à ajuster pour que les résultats du modèle reflètent au mieux les conditions réelles du terrain, du sous-sol et des processus hydrologiques. Cette tâche devient particulièrement ardue lorsque le modèle comporte un grand nombre de paramètres, que ce soit en raison de la prise en compte de nombreux sous-processus ou de la structure complexe du modèle. Dans de tels cas, l'analyse de sensibilité (AS) joue un rôle crucial dans les études de modélisation hydrologique. Elle permet d'identifier les valeurs optimales des paramètres, d'évaluer les variations qualitatives et quantitatives des résultats du modèle, et de prévoir l'évolution du système en réponse à des changements tels que les contraintes hydrologiques, climatiques ou les conditions aux limites (Kumar et al., 2020 ; Rossi et al., 2008).

L'analyse de sensibilité est une méthode numérique qui explore les relations entre les entrées et les sorties d'un modèle. Elle vise à étudier l'effet des variations des données d'entrée sur les résultats

du modèle. En établissant des intervalles de variation plausibles pour chaque paramètre, elle permet d'évaluer et de classer leur impact sur les sorties du modèle (**Rouhier, 2018**). Bien que l'analyse de sensibilité soit essentielle en modélisation hydrologique, il n'existe pas de définition universelle. Elle est souvent définie comme la fluctuation des réponses de sortie causée par la variation d'une ou plusieurs entrées ou paramètres du modèle. Cependant, cette définition est partielle, car l'analyse de sensibilité ne se limite pas à l'étude de la sensibilité des paramètres. Son application reste encore limitée dans la conception et l'étude des modèles hydrologiques, ce qui explique l'absence de consensus sur sa définition.

L'analyse de sensibilité permet de :

- Identifier les lacunes dans la structure et la formulation du modèle ;
- Recommander des simplifications du modèle et une réduction du nombre de paramètres ;
- Analyser le contenu informationnel des observations disponibles.

Ainsi, elle aide à identifier les paramètres ayant une influence significative sur les résultats du modèle, ce qui améliore l'efficacité de la calibration. Plus un paramètre est sensible, plus il sera optimisé rapidement et précisément. Il est également important de noter que l'analyse de sensibilité prend en compte l'impact des paramètres et des incertitudes liées aux forçages du modèle. Traditionnellement, la calibration des modèles hydrologiques était effectuée manuellement, une méthode laborieuse et chronophage. Aujourd'hui, l'analyse de sensibilité peut être classée en deux stratégies : locale et globale, utilisant des procédures de calibration automatique (**Devak et Dhanya, 2017**). Les méthodes locales évaluent l'impact des paramètres en les faisant varier individuellement autour d'un cas de base, tandis que les méthodes globales font varier tous les paramètres simultanément sur toute leur plage possible.

Bien que l'utilisation de l'analyse de sensibilité en modélisation hydrologique reste limitée (**Blasone et al., 2007**), son intérêt ne cesse de croître. Elle permet notamment :

- D'illustrer et d'évaluer l'impact des contraintes sur les modèles conceptuels et la fiabilité des résultats prédictifs ;
- De mesurer l'effet des variations des paramètres et de déterminer leur plage de variation optimale ;
- D'analyser les relations entre les paramètres ;
- De fournir une vision éclairée sur l'utilisation des résultats du modèle.

I.5 Régionalisation des débits dans les bassins non jaugés

La prévision des débits dans les bassins versants non jaugés, également appelée régionalisation des débits, est un outil essentiel pour la gestion des ressources en eau. Dans de nombreuses régions du monde, l'absence de stations de mesure ou les lacunes dans les enregistrements de données rendent difficile la calibration des modèles hydrologiques. De plus, les modifications des propriétés des bassins versants, telles que l'urbanisation, compliquent la prévision des écoulements dans ces bassins. La régionalisation des paramètres est une technique efficace pour transférer les informations des bassins jaugés (bassins avec données disponibles) vers les bassins non jaugés, permettant ainsi de prédire les débits dans ces derniers (Makhloufi et al., 2023).

Cette méthode repose sur l'utilisation des paramètres de modèles hydrologiques calibrés dans des bassins jaugés (appelés bassins "donneurs") pour simuler les processus pluie-débit dans des bassins non jaugés. Elle permet de générer des séries chronologiques de ruissellement dans des bassins dépourvus de données, en s'appuyant sur les similarités hydrologiques entre les bassins. La régionalisation est donc une approche clé pour pallier le manque de données et améliorer la gestion des ressources en eau dans les régions non instrumentées.

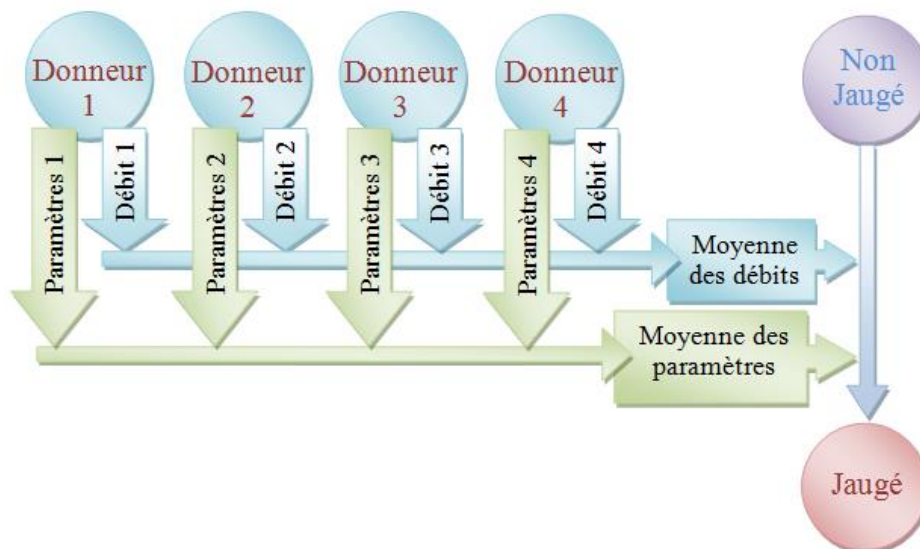


Figure I.12 Principe de la régionalisation

I.5.1 Bassins non jaugés

Comment évaluer le comportement hydrologique d'un bassin versant en l'absence de données hydrométriques ? Cette question est au cœur des préoccupations des hydrologues, car de nombreux bassins versants ne disposent pas de stations de mesure ou présentent des lacunes dans leurs séries

chronologiques de débits. Pourtant, comprendre le comportement hydrologique de ces bassins est essentiel pour prédire les crues, gérer les étiages, dimensionner des infrastructures ou évaluer la disponibilité future de l'eau. La modélisation hydrologique est souvent utilisée pour répondre à ces enjeux, mais elle nécessite généralement des données de débit pour calibrer les paramètres du modèle. Pour étudier les écoulements dans des bassins non jaugés (sans données hydrométriques), il est nécessaire de s'appuyer sur les données disponibles dans des bassins jaugés (avec données hydrométriques), appelés bassins "donneurs" (Rouhier, 2018).

La simulation des bassins non jaugés représente un défi majeur, en particulier dans les pays en développement où les données sont souvent limitées. Pour relever ce défi, la communauté scientifique a lancé l'initiative PUB (Prediction in Ungauged Basins) entre 2003 et 2012, sous l'égide de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (IAHS). Cette initiative a permis de développer des méthodes innovantes pour prédire les débits dans les bassins non jaugés et a marqué une avancée significative dans le domaine de l'hydrologie (Artigue, 2012).

I.5.2 Méthodes de régionalisation

La régionalisation des débits consiste à transférer les connaissances hydrologiques acquises dans des bassins jaugés vers des bassins non jaugés. Plusieurs approches peuvent être utilisées, classées en différentes catégories.

I.5.2.1 Méthodes basées sur la distance

A. Proximité spatiale

Les méthodes de proximité spatiale reposent sur l'hypothèse que des bassins versants géographiquement proches présentent un comportement hydrologique similaire. Cette approche, simple à mettre en œuvre, suppose qu'un bassin jaugé et un bassin non jaugé situés à proximité l'un de l'autre partagent des caractéristiques physiques comparables et réagissent de manière similaire aux événements météorologiques. Pour appliquer cette méthode, les paramètres d'un modèle hydrologique calibré sur un bassin jaugé sont transférés à un bassin non jaugé voisin. La performance du modèle sur le bassin non jaugé est ensuite évaluée à l'aide d'indices de performance, tels que le Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Breton-Dufour, 2017 ; Yang et al., 2023).

La distance entre les bassins est souvent calculée à l'aide de la distance euclidienne entre les centroïdes des bassins, définie par l'équation suivante :

$$d = \sqrt{(X_G - X_U)^2 + (Y_G - Y_U)^2} \quad (\text{I.7})$$

Où :

- d est la distance entre les centroïdes des bassins,
- (X_G, Y_G) et (X_U, Y_U) sont les coordonnées des centroïdes des bassins jaugés et non jaugés respectivement (**Breton-Dufour, 2017**).

B. Similarité physique

Chaque bassin versant possède des caractéristiques physiques uniques, telles que le type de sol, l'occupation du sol, la surface, la pente ou l'altitude moyenne, qui influencent sa réponse hydrologique. Les méthodes de similarité physique postulent que des bassins présentant des caractéristiques physiques similaires réagissent de manière hydrologiquement comparable aux précipitations. La similarité est évaluée en calculant une distance normalisée dans un espace multidimensionnel, où chaque dimension correspond à un descripteur physique du bassin (par exemple, l'altitude, le type de sol, etc.) (**Yang et al., 2023**).

Un indice de similarité (θ) est utilisé pour quantifier la similarité entre les bassins. Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\theta = \sum_{i=1}^K \frac{|CD_i^G - CD_i^U|}{\Delta CD_i} \quad (\text{I.8})$$

Où : CD_i^G représentent les valeurs du descripteur i pour un bassin jaugé, CD_i^U représentent les valeurs du descripteur i pour un bassin non jaugé, k représente le nombre de descripteurs physiques pris en considération, et ΔCD_i représente la plage de valeurs disponibles pour le descripteur physique i , c'est-à-dire la valeur maximale moins la valeur (**Breton-Dufour, 2017**).

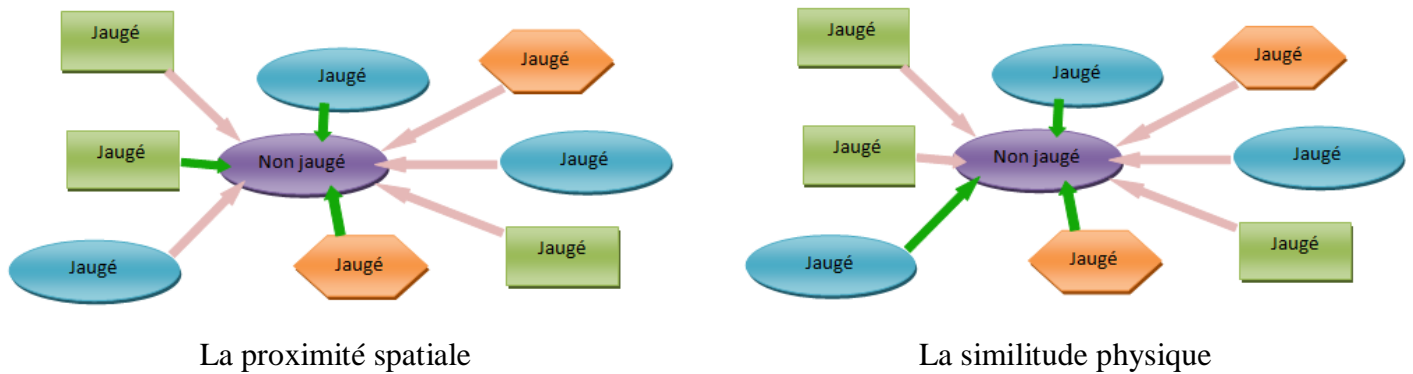


Figure I.13 Bassins similaires selon l'approche de la proximité spatiale et bassins similaires selon l'approche de la similitude physique

I.5.2.2 Méthode de régression

La méthode de régression établit une relation entre les paramètres calibrés sur des bassins jaugés et les descripteurs physiques ou attributs de ces bassins (Li & Zhang, 2016). Une fois cette relation établie, les paramètres pour les bassins non jaugés sont estimés en fonction de leurs attributs physiques. Par exemple, Kokkonen et al (2003) ont montré que le paramètre de séchage du modèle IHACRES (Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data) était négativement corrélé à la distance moyenne d'écoulement de surface, tandis que la constante de temps du réservoir lent était liée à la pente topographique dans le bassin versant de Coweeta, en Caroline du Nord (Parajka et al., 2013; Yang et al., 2023).

I.5.2.3 Méthode de calibration régionale

La calibration régionale consiste à calibrer simultanément un modèle hydrologique sur plusieurs bassins versants d'une même région pour obtenir un ensemble de paramètres généralisables. Contrairement à la méthode de régression, où les paramètres sont d'abord estimés individuellement puis reliés aux caractéristiques du bassin, la calibration régionale intègre ces deux étapes en une seule. Les coefficients des relations entre les paramètres et les descripteurs du bassin sont calibrés directement, ce qui permet une meilleure généralisation des résultats (Li & Zhang, 2016; Parajka et al., 2013).

I.5.2.4 Méthode de similarité de signature hydrologique

Cette méthode repose sur le transfert des paramètres d'un bassin jaugé vers un bassin non jaugé présentant une signature hydrologique similaire. Les signatures hydrologiques sont des indicateurs statiques (débit moyen, fréquence des crues) ou dynamiques (indice de débit de base, taux de

variation du débit) qui caractérisent le comportement hydrologique d'un bassin. En identifiant des bassins avec des signatures comparables, cette méthode permet de transférer les paramètres de manière plus précise (Makhloufi et al., 2023).

I.5.2.5 Méthodes de similarité intégrée

Les méthodes de similarité intégrée combinent plusieurs approches de régionalisation, telles que la proximité spatiale et la similarité physique, pour améliorer la précision des prédictions. En utilisant une combinaison de critères, ces méthodes permettent de tirer parti des avantages de chaque approche tout en minimisant leurs limites. Par exemple, une méthode peut intégrer à la fois la distance géographique et les caractéristiques physiques pour identifier les bassins donneurs les plus pertinents (Li & Zhang, 2016).

I.5.3 Utilisation de la régionalisation dans les études antérieures

Plusieurs recherches à travers le monde ont mis en œuvre et comparé des techniques de régionalisation pour différentes régions en utilisant une variété de modèles hydrologiques. Diverses méthodes ont été mises en œuvre dans diverses régions, et de nombreuses conclusions ont été obtenues selon lesquelles les études dans des régions particulières et le choix de certains modèles hydrologiques ont un impact sur les performances des méthodes de régionalisation, par exemple (Salinas et al., 2013; Reichl et al., 2009; Samuel et al., 2011; Viglione et al., 2013; Pool et al., 2019) (Makhloufi et al., 2023). Peu de recherches ont utilisé des modèles hydrologiques pour étudier plusieurs bassins algériens non jaugés. Le modèle GR2M a été employé par Zamoum & Souag-Gamane (2019) afin de fournir des données mensuelles continues sur le débit des cours d'eau dans les bassins versants non jaugés du nord de l'Algérie. Ils ont utilisé deux méthodes de classification : l'analyse en composantes principales (ACP) et les cartes auto-organisatrices (SOM). La méthode simple utilisée par Ammari et al (2017) a été employée pour simuler les débits dans les sites fluviaux jaugés et non jaugés du bassin versant côtier algérien (Makhloufi et al., 2023).

I.5.4 Régionalisation à donneurs multiples

La régionalisation à donneurs multiples est une approche qui consiste à utiliser plusieurs bassins donneurs pour transférer les paramètres vers un bassin non jaugé. Cette méthode a été largement étudiée et s'est avérée plus efficace que l'utilisation d'un seul donneur. Des chercheurs tels que (Arsenault & Brissette, 2014; Oudin et al., 2008; Reichl et al., 2009; Samuel et al., 2011; Zhang & Chiew, 2009) ont démontré que cette approche améliore significativement la précision des prédictions.

Il existe dans ce cas, différentes approches pour réaliser la moyenne des hydrogrammes générés ou les paramètres des bassins donateurs, mais les deux méthodes les plus couramment utilisées sont (Makhloufi et al., 2023):

Moyenne arithmétique : Cette méthode calcule la moyenne des paramètres des bassins donateurs. L'équation suivante représente la moyenne arithmétique des paramètres régionalisés :

$$P_{\text{Arith}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (\text{I.9})$$

Où : P_{Arith} représente la moyenne arithmétique des paramètres transférés au bassin non jaugé, n est le nombre des donateurs, P_i est le paramètre du bassin donneur i .

Pondération de la distance inverse (IDW) : Cette méthode attribue un poids à chaque bassin donneur en fonction de sa distance au bassin cible. Les poids sont calculés comme l'inverse de la distance, ce qui donne plus d'importance aux bassins les plus proches. L'équation suivante représente la pondération de la distance inverse (Setianto & Triandini, 2013):

$$w_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \quad (\text{I.10})$$

Où w_i représente la pondération de la distance inverse, n est le nombre des donateurs, d_i est la distance du bassin donneur i au bassin cible donnée par l'équation I.7. Les paramètres régionalisés seront donc donnés par l'équation I.11 ci-dessous.

$$P_{\text{IDW}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \left(\frac{1}{d_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \quad (\text{I.11})$$

Où ; P_{Arith} représente la moyenne par la pondération de la distance inverse des paramètres transférés au bassin non jaugé, n est le nombre des donateurs, P_i est le paramètre du bassin donneur i (Breton-Dufour, 2017; Samuel et al., 2011; Zhang & Chiew, 2009).

I.6 Conclusion

L'efficacité d'une étude hydrologique dépend fortement de la maîtrise des conditions et des procédures appliquées, notamment en ce qui concerne les bassins versants étudiés, les données utilisées, les modèles hydrologiques choisis et les outils de calcul employés. La modélisation hydrologique occupe ainsi une place centrale pour les chercheurs en hydrologie et les concepteurs d'ouvrages hydrauliques, car elle permet de simuler et de prédire les processus hydrologiques avec une précision accrue.

L'un des enjeux majeurs en hydrologie, en particulier dans les pays en développement, est la régionalisation des débits dans les bassins non jaugés. Cette approche vise à pallier les lacunes dans les séries chronologiques de débit et à répondre à l'absence de stations hydrométriques dans de nombreuses régions. En transférant les connaissances acquises dans des bassins jaugés vers des bassins non jaugés, la régionalisation permet de générer des données hydrologiques fiables, essentielles pour la gestion durable des ressources en eau.

La réussite de cette démarche repose sur une compréhension approfondie des techniques de modélisation, une définition claire des objectifs, et une maîtrise des modèles hydrologiques, notamment en ce qui concerne leur sensibilité aux paramètres et leurs performances. Une analyse rigoureuse de ces aspects permet d'obtenir des résultats fiables, qui contribuent à une gestion optimisée des ressources en eau et soutiennent leur développement durable.

Dans ce chapitre, les concepts clés de la modélisation pluie-débit, de la sensibilité des paramètres des modèles hydrologiques et de la régionalisation des débits dans les bassins non jaugés ont été présentés. Ces outils et méthodes sont indispensables pour relever les défis actuels en hydrologie, notamment dans un contexte de changement climatique et de pression accrue sur les ressources en eau. En combinant une approche scientifique rigoureuse et des techniques de pointe, il est possible de mieux comprendre et gérer les systèmes hydrologiques, tout en favorisant une utilisation durable de l'eau pour les générations futures.

Chapitre II

Description de la zone d'étude et analyse des données

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du bassin de Cheliff, en mettant l'accent sur les sous-bassins du haut et moyen Cheliff, qui constituent la zone d'étude de ce travail. L'objectif est de localiser cette zone et d'en décrire les caractéristiques géographiques, météorologiques, hydrographiques et morphométriques. Ces informations sont essentielles pour différencier les sous-bassins étudiés et définir les paramètres d'entrée des modèles hydrologiques utilisés. Les caractéristiques des stations hydrométriques et pluviométriques employées dans cette étude sont également détaillées. Les données des séries chronologiques, ainsi que les cartes raster des caractéristiques physiques et de l'occupation des sols, sont analysées afin de fournir une base solide pour les études hydrologiques.

II.2 Description de la zone d'étude

La description de la zone d'étude représente une étape fondamentale dans les études hydrologiques, car elle permet de fournir des informations précises sur la localisation géographique et les caractéristiques physiques de la région. Ces données sont essentielles pour mieux comprendre les différents types de bassins et leurs réactions aux variables d'entrée, telles que les précipitations et les débits. Une connaissance approfondie de la zone d'étude est donc indispensable pour la modélisation hydrologique et la gestion efficace des ressources en eau.

II.2.1 Présentation du bassin de Cheliff

Le bassin hydrographique Cheliff-Zahrez s'étend sur une superficie d'environ 56 227 km², représentant plus de 22 % de la superficie de l'Algérie du Nord (Figure II.1). Cette zone est délimitée naturellement par la mer Méditerranée au nord, la région Oranie – Chott Chergui à l'ouest, la région Algéroise – Hodna – Sommam à l'est, et le Sahara au sud.

Le bassin de Cheliff est l'un des trois principaux sous-bassins de cette région hydrographique. Il est le plus vaste en Algérie, couvrant plus de 77 % de la superficie totale du bassin Cheliff-Zahrez. Ce bassin est bordé au nord par les monts du Dahra et au sud par l'Atlas saharien. Il englobe la vallée du Cheliff au nord, les hauts plateaux de Saïda à Tiaret, les plaines de Nahr Ouassel et Ain Ouassera au sud, ainsi que le massif de l'Ouarsenis au centre.

L'Oued Cheliff, qui s'étend sur 800 km, traverse le plus grand bassin versant du pays, le bassin de Cheliff, avec une superficie de 43 750 km². Cet oued est unique en Algérie, car il prend sa source dans l'Atlas saharien, près d'Aflou dans les monts du djebel Amour. Le long de son

cours, deux barrages ont été construits : le barrage de Bougezoul, qui régule les crues provenant du haut bassin de l'Oued Cheliff, et le barrage de Ghrib, dont le comblement de la retenue est ralenti par la décantation des eaux du premier barrage.

L'Oued Cheliff traverse neuf wilayas : Laghouat, Djelfa (oued Touil), Tiaret, Tissemsilt (côté ouest), Nahr Ouassel (oued Mina-haut), Médéa, Aïn Defla (oued Cheliff), Chlef (oued Fodda - oued Sly), Relizane (oued Rhiou, oued Mina-bas), et Mostaganem (début).

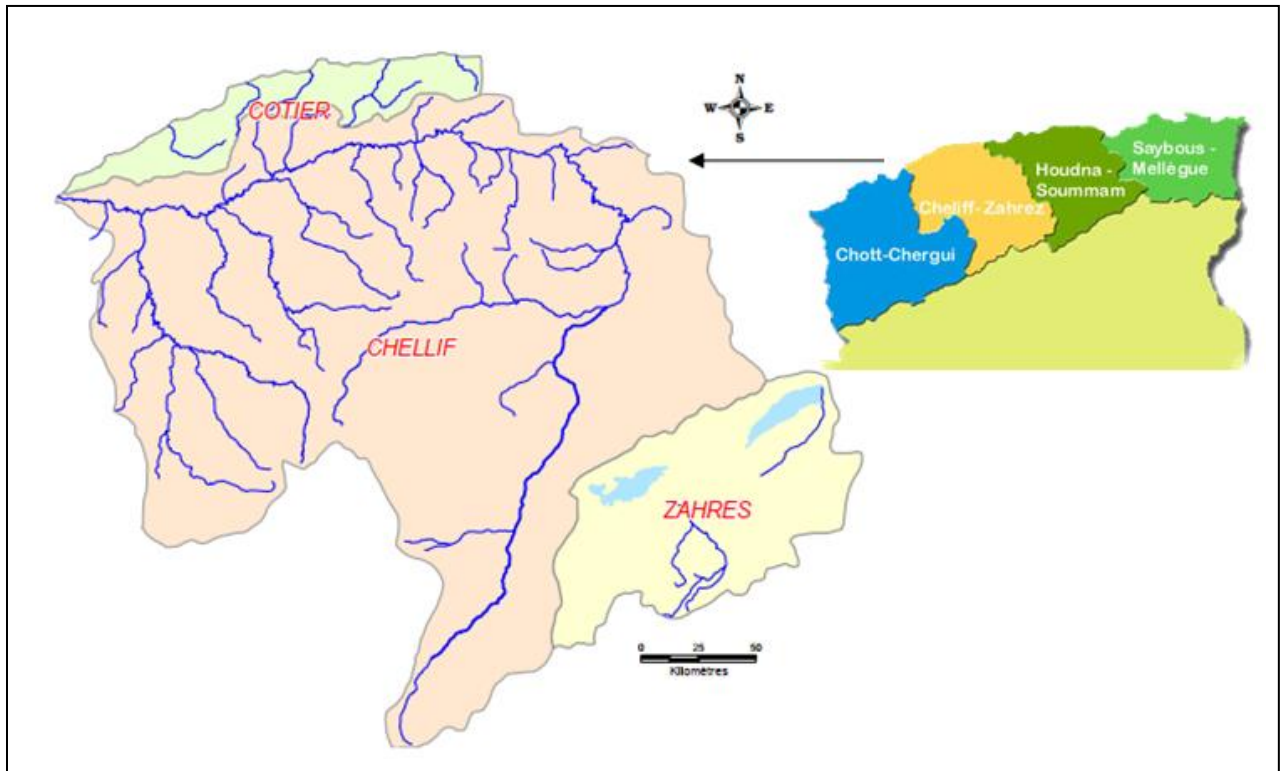


Figure II.1 Le bassin hydrographique Cheliff-Zahrez (Source: Catalogue de ABH_CZ, 2004)

Le bassin de Cheliff est divisé en trois parties principales :

- **Le haut et moyen Cheliff** (10 930 km²) ;
- **Le bas Cheliff et la Mina** (13 150 km²) ;
- **Le Cheliff en amont de Boughzoul** (19 990 km²).

Il est situé entre les méridiens 0°12' et 3°87' Est et entre les latitudes 33°91' et 36°58' Nord (Figure II.2). Le bassin est délimité au nord par la mer Méditerranée, au sud par les hautes plaines, à l'est par le bassin Algérois, et à l'ouest par le bassin Oranais.

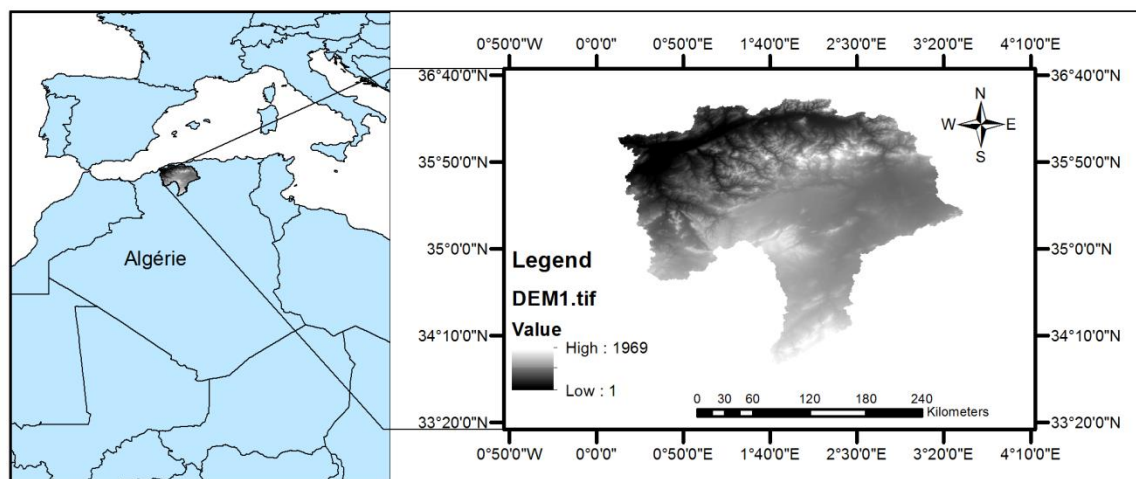


Figure II.2 Situation géographique du bassin de Cheliff

II.2.2 Présentation du bassin haut et moyen Cheliff

Les sous-bassins étudiés dans le cadre de cette étude sont situés dans le bassin versant du Haut et Moyen Cheliff, qui couvre une superficie de 10 930 km². Ce bassin comprend au total onze sous-bassins (Tableau II.1).

Le bassin versant du Haut et Moyen Cheliff s'étend de l'étranglement qui le sépare du sous-bassin en amont de Boughzoul jusqu'au seuil de Boukadir, où prennent naissance les bassins du Bas Cheliff et de l'oued Mina. Le bassin du Haut et Moyen Cheliff est localisé entre les longitudes 1° et 3°90' Est et les latitudes 35° et 36°50' Nord (Amiar, 2021) (Figure II.3).

Tableau II.1 Les sous-bassins du Haut et Moyen Cheliff (Mehaiguene, 2013)

Code	Sous-bassin	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Altitude moyenne (m)	Classe de relief
0113	Oued Cheliff Djellil	1012.66	171.43	900	Très fort
0114	Oued Cheliff Ghrib	1378.63	175.67	870	Très fort
0115	Oued Cheliff Harbil	780.17	165.34	600	Assez fort
0116	Oued Deurdeur	850.95	179.27	980	Très fort
0117	Oued Cheliff Harreza	756.70	142.46	575	Très fort
0118	Oued Ebda	661.45	139.10	610	Très fort
0119	Oued Rouina Zeddine	891.46	164.97	640	Très fort
0120	Oued Cheliff Tikzal	587.69	151.33	370	Assez fort
0121	Oued Fodda	1161.32	212.75	785	Très fort
0122	Oued Ras Ouahrane	1438.45	224.52	375	Assez fort
0123	Oued Sly	1404.07	225.00	710	Très fort

Le Haut et Moyen Cheliff comprend une plaine située à environ 200 km d'Alger et à 35 km de la mer Méditerranée. Ses limites sont définies au nord par les monts de Medjadja, à l'est par le seuil d'Oum Drou, au sud par les monts de l'Ouarsenis, et à l'ouest par le seuil de Boukadir (Amiar, 2021).

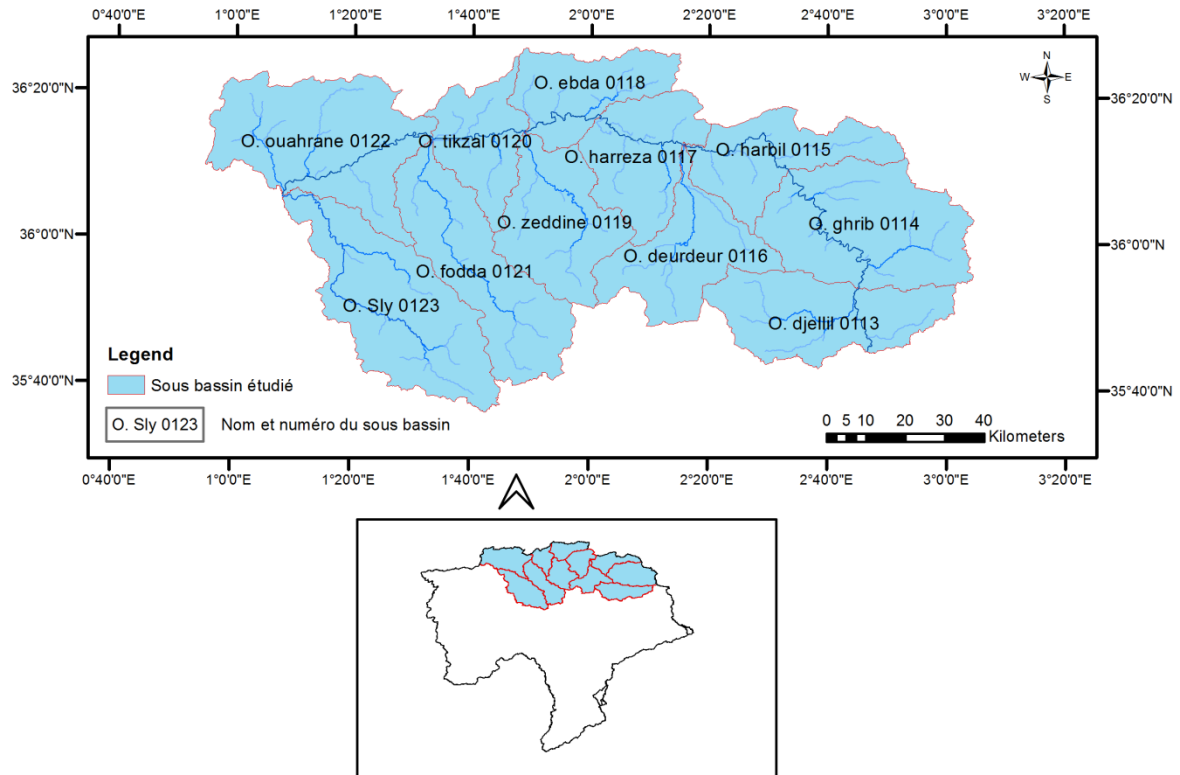


Figure II.3 Situation géographique du bassin Haut et Moyen Cheliff

En raison du manque de données disponibles pour les trois sous-bassins de l'Oued Fouda, de l'Oued Ghrîb et de l'Oued Djellîl, l'étude a été limitée aux huit sous-bassins restants. Il s'agit des sous-bassins suivants :

- Oued Harbil (code 0115) ;
- Oued Deurdeur (code 0116) ;
- Oued Harreza (code 0117) ;
- Oued Ebda (code 0118) ;
- Oued Rouina Zeddine (code 0119) ;
- Oued Tikzâl (code 0120) ;
- Oued Ras Ouahrane (code 0122) ;
- Oued Sly (code 0123).

II.2.2.1 Couverture végétale

La couverture végétale et l'occupation du sol jouent un rôle déterminant dans la régulation du ruissellement superficiel, la protection contre l'érosion, le taux d'évaporation et la capacité de rétention d'un bassin versant. La végétation offre une protection mécanique directe en atténuant la force des eaux de surface et en favorisant leur infiltration. Plus la couverture végétale est dense, plus elle résiste efficacement à l'écoulement, réduisant ainsi les risques d'érosion et améliorant la rétention hydrique (ABH_CZ, 2004).

La figure II.4 illustre la couverture végétale dans la zone d'étude, élaborée à l'aide du logiciel ArcMap à partir d'une image mondiale de l'occupation du sol.

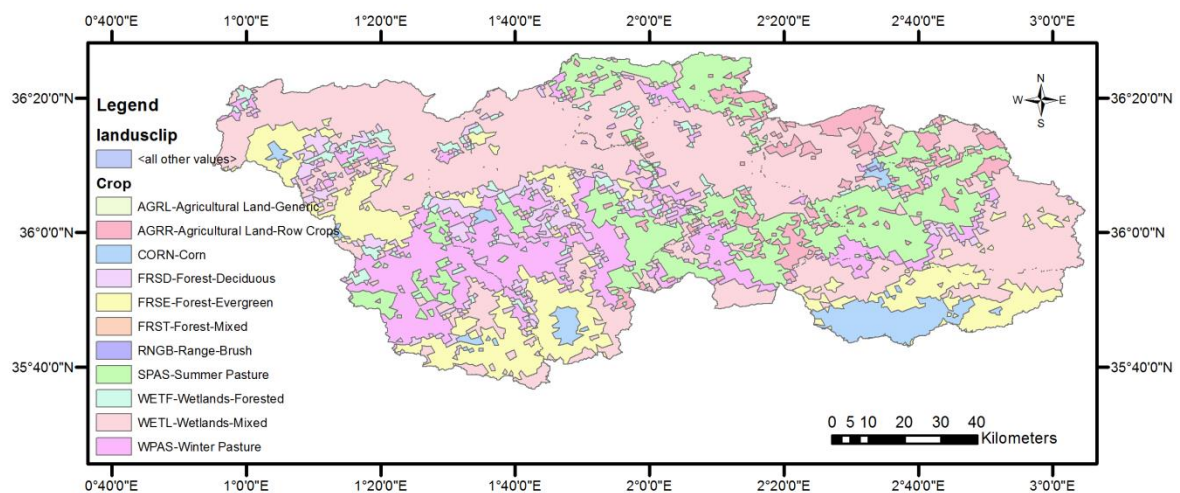


Figure II.4 Couverture végétale du bassin haut et moyen Cheliff

Nous avons enregistré l'existence des types végétation dans la zone d'étude suivants :

- AGRL : Terres agricoles – génériques.
- AGRR : Terres agricoles – Grandes cultures.
- CORN : maïs.
- FRSD : Forêt décidue.
- FRSE : Forêt à feuilles persistantes.
- FRST : Forêt mixte.
- RNGB : Gamme-Brosse.
- SPAS: Pâturage d'été.
- WETF: Zones humides et boisées.

- WETL: Zones humides mixtes.
- WPAS: Pâturage d'hiver.

II.2.2.2 Relief

Le bassin du Haut et Moyen Cheliff présente un relief varié. Les montagnes, dont l'altitude dépasse les 1000 mètres, se situent au sud et à l'est du bassin. Du nord-est jusqu'au centre du bassin versant, on trouve des vallées caractérisées par de faibles altitudes et des pentes très douces. Le reste de la zone est constitué de plaines aux pentes plus ou moins prononcées (Figures II.5 et II.6).

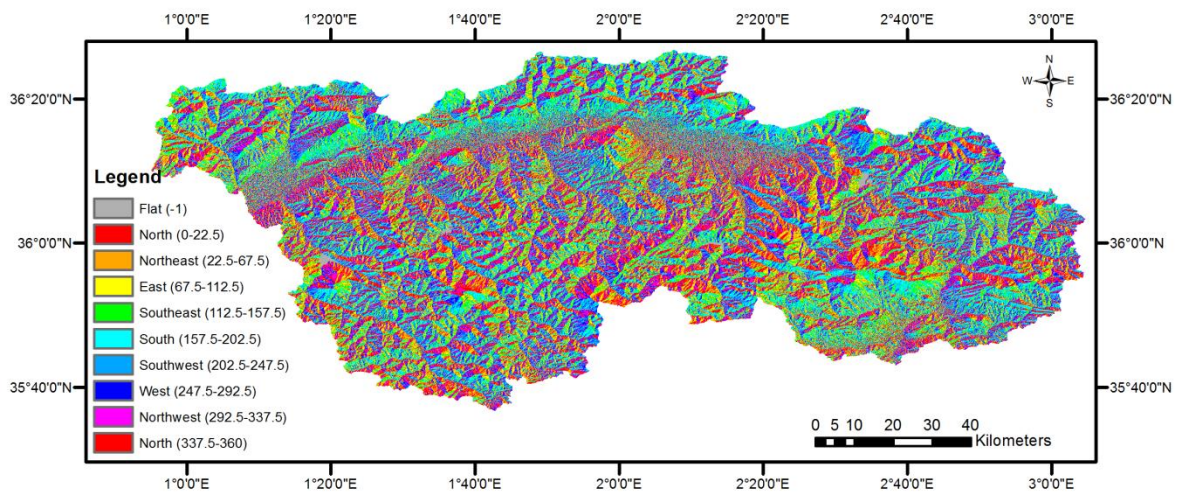


Figure II.5 Carte des aspects du bassin haut et moyen Cheliff

La pente joue un rôle crucial dans le processus d'érosion. La vitesse de ruissellement est grandement influencée par son inclinaison, ce qui accélère à son tour le transport des sédiments. Cela renforce la puissance d'arrachement des particules et accroît ainsi l'impact de détérioration du sol. La figure II.6 présente la carte des pentes de la zone du haut et moyen Cheliff.

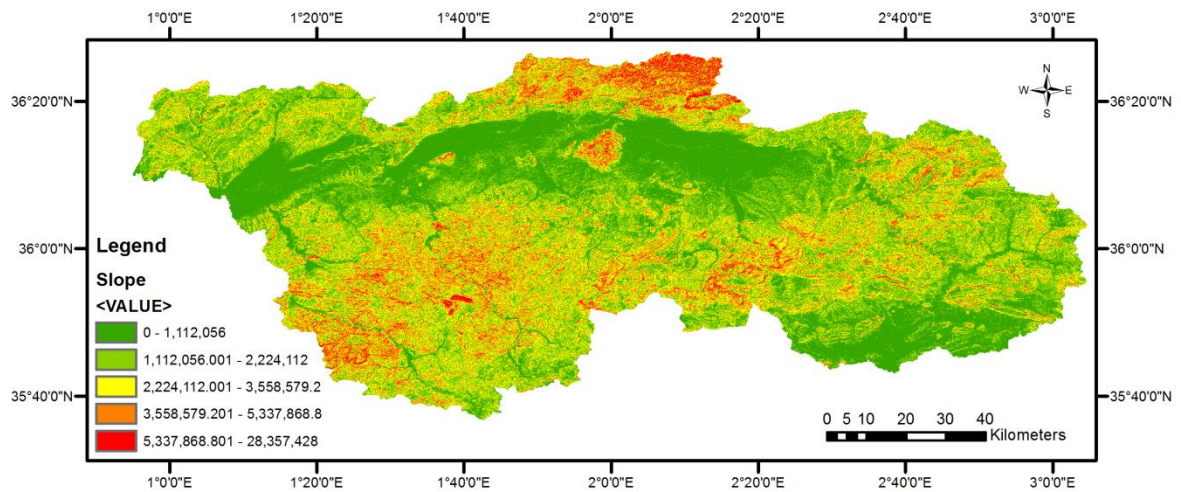


Figure II.6 Carte des pentes du bassin haut et moyen Cheliff

II.2.2.3 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de l'Oued Cheliff se forme à la confluence de deux cours d'eau principaux : l'Oued Touil et le Nahr Ouassel. Il suit initialement une direction Sud-Nord, traversant la chaîne montagneuse de la wilaya de Médéa au niveau de Boughari. Par la suite, il prend une orientation Sud-Est/Nord-Ouest, franchissant le massif de Gantass. Enfin, il adopte un écoulement oblique d'Est en Ouest, traversant successivement quatre wilayas : Aïn Defla, Chlef, Relizane et Mostaganem, avant de se déverser dans la mer Méditerranée par une large vallée située dans la wilaya de Mostaganem (Figure II.7).

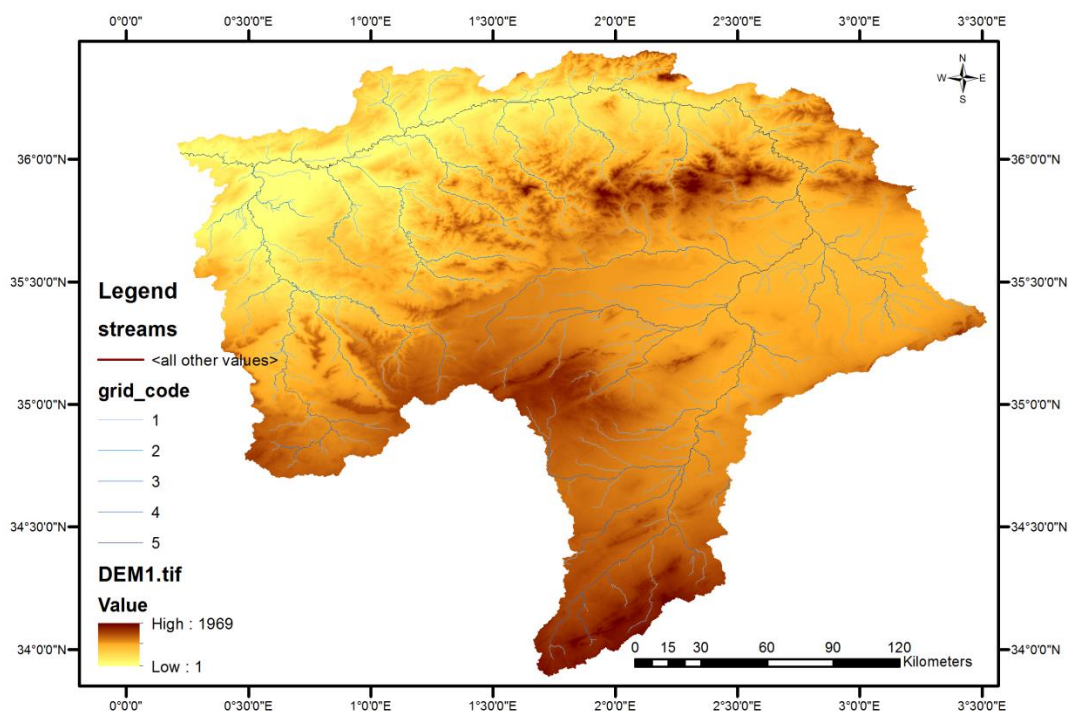


Figure II.7 Réseau hydrographique du bassin d'Oued Cheliff

La partie supérieure et moyenne de l'Oued Cheliff s'écoule dans une vallée parallèle à la mer sur la majeure partie de son cours. Cette vallée est délimitée au sud par le massif des Ouarsenis et au nord par la chaîne côtière des monts du Dahra et du Zaccar. La distance en ligne droite entre Boughzoul et l'embouchure du Cheliff est d'environ 250 km, avec une dénivellation d'environ 625 m. Tout au long de son parcours, l'Oued Cheliff ne reçoit que peu d'affluents majeurs sur sa rive droite, à l'exception de l'Oued Ebda et de l'Oued Ras Ouahrane. En revanche, sur sa rive gauche, il est alimenté par les eaux de plusieurs cours d'eau, notamment l'Oued Chorfa (via le barrage Ghrib), l'Oued Deurdeur, l'Oued Harreza, l'Oued Rouina, l'Oued Zeddine, l'Oued Fodda ainsi que l'Oued Sly (Figure II.8) (Mehaiguen, 2013).

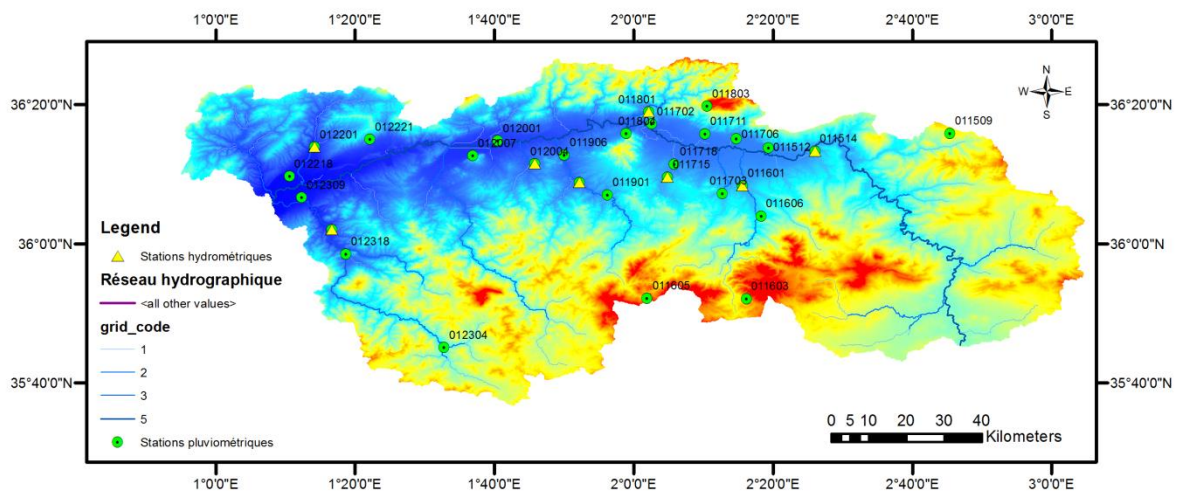


Figure II.8 Hydrographie du bassin du haut et moyen Cheliff

II.2.2.4 Types de sols

Pour la modélisation des débits, nous avons pris en compte les types de sol fournis par la carte des sols de la FAO. Neuf types de sol ont été identifiés dans notre zone d'étude, comme illustré dans la Figure II.8.

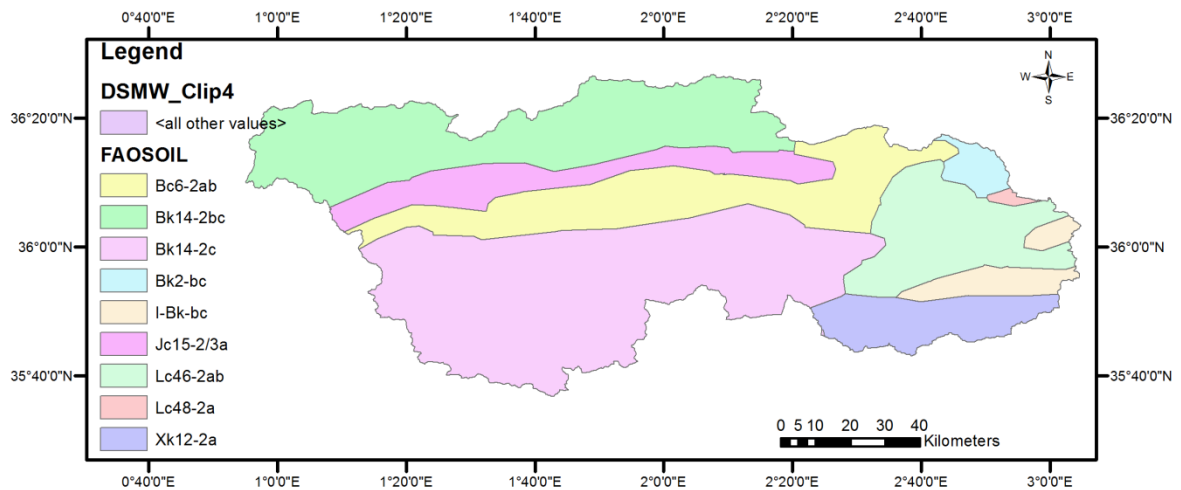


Figure II.9 Types de sols du bassin haut et moyen Cheliff

Les types de sols observés dans la zone d'étude, selon la carte des sols de la FAO, sont les suivants :

- Bc6-2ab : Calcaire du Crétacé et du Miocène, flysch de l'Éocène, et dépôts alluviaux, lagunaires et lacustres du Pliocène et du Quaternaire.
- Bk14-2bc : Calcaire du Crétacé supérieur et du Miocène, et dépôts alluviaux, lagunaires et lacustres du Pliocène et du Quaternaire.
- Bk14-2c : Calcaire du Crétacé et du Miocène, et flysch de l'Éocène.
- Bk2-bc : Calcaire et marne du Crétacé.
- I-Bk-bc : Calcaire du Crétacé, flysch de l'Éocène, et calcaire et marne du Miocène.
- Jc15-2/3a : Dépôts alluviaux récents.
- Lc46-2ab : Calcaire du Crétacé supérieur.
- Lc48-2a : Dolomie et calcaire du Crétacé.
- Xk12-2a : Calcaire et dolomie du Mésozoïque, et marne argileuse du Néogène.

II.2.2.5 Pluviométrie

Il est essentiel de considérer les variations annuelles et saisonnières des précipitations pour comprendre l'écoulement saisonnier et le comportement hydrologique annuel d'un bassin versant. Plus précisément, le fonctionnement d'un cours d'eau est étroitement lié à la pluviométrie, à sa répartition saisonnière, ainsi qu'à ses variations spatiales et temporelles.

Selon les recherches de [Achite et Meddi \(2005\)](#), une carte des précipitations moyennes a été élaborée. Cette carte, basée sur des séries chronologiques de longue durée couvrant la période de

1968 à 2002, met en lumière les principales caractéristiques de la distribution des précipitations dans la zone d'étude. Dans le bassin du Haut et Moyen Cheliff, les versants sud des monts du Dahra et du Zaccar sont particulièrement pluvieux, avec une moyenne annuelle dépassant 600 mm. En revanche, dans la plaine du Haut et Moyen Cheliff, les précipitations sont plus faibles, variant entre 300 mm et 400 mm, tandis que dans le sud du bassin, elles excèdent 500 mm (Rata, 2020).

II.2.2.6 Evapotranspiration

Le phénomène de l'évapotranspiration comprend à la fois l'évaporation directe, qui se produit à partir des sols humides et des plans d'eau, et la transpiration des végétaux. Selon la carte d'évapotranspiration publiée par le service de l'ANRH en collaboration avec Jean Pierre Laborde, les valeurs les plus élevées d'évapotranspiration ont été observées dans la vallée du Haut et Moyen Cheliff. La station d'Aïn Defla enregistre une valeur maximale de 1570 mm, tandis que les stations de Theniet El Had et Miliana, situées dans les piémonts du bassin, présentent des valeurs plus faibles. Dans la période choisie pour les données de précipitations, le potentiel annuel total d'évapotranspiration varie entre 1200 mm et 1600 mm, ce qui représente plus du double des précipitations totales. En saison froide, l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle diminue progressivement jusqu'à atteindre des valeurs inférieures à celles des précipitations.

II.3 Analyse et traitement des données

La modélisation hydrologique repose principalement sur les données disponibles, ce qui rend essentiel un travail approfondi de collecte de données avant la mise en œuvre des modèles. Les séries historiques de données météorologiques et de débits observés sont indispensables pour tous les modèles hydrologiques utilisés dans les études hydrologiques. Il est crucial de sélectionner et de traiter ces données de manière à se rapprocher au mieux de la réalité des événements climatiques.

Le traitement préliminaire des données collectées consiste à analyser les différentes séries chronologiques en recueillant les données nécessaires à la construction des modèles hydrologiques, en les traitant, en les analysant, en interprétant les résultats et en les présentant de manière claire et compréhensible.

La qualité des données est tout aussi importante, voire plus, que leur quantité. Il est donc essentiel de se concentrer sur les données de précipitations et de débits disponibles afin de créer

une base de données fiable sur laquelle fonder nos analyses. Les séries chronologiques peuvent être affectées par trois types d'erreurs majeures : l'inégalité temporelle, l'effet anthropique et la qualité des mesures. L'homogénéisation des données consiste à (Touaibia, 2015) :

- Détecter les anomalies présentes dans les séries chronologiques ;
- Corriger ces anomalies à l'aide de méthodes statistiques appropriées ;
- Étendre les séries courtes en utilisant des séries de base homogènes.

II.3.1 Collecte des données

Les données hydrologiques sont obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH Blida), qui dispose d'un réseau de stations de mesure des précipitations et d'un réseau de stations hydrométriques pour mesurer les débits. Le choix des stations est déterminé par les données disponibles, qui incluent des séries journalières de précipitations et de débits. Nous avons sélectionné les stations en fonction de leur capacité à couvrir l'ensemble de la région d'étude, avec des séries de mesures longues et peu de lacunes sur les mêmes périodes. La figure II.8 ci-dessus illustre la répartition des stations dans la zone d'étude.

Tableau II.2 Caractéristiques géographiques des stations pluviométriques et hydrométriques.

N°	Code de station	Type de station	Nom de station	Coordonnées de station		Z (m)	Nom de sous bassin
				X (m)	Y (m)		
01	011509	Pluviométrique	Médéa secteur	478010.84	4013328.66	935	Oued Harbil
02	011512	Pluviométrique	Ain Sultan	439017.34	4009581.38	285	
03	011514	Hydro-pluviom	Djenane B-Ouadah	449021.74	4008687.01	336	
04	011601	Hydro-pluviom	Marabout Blanc	433426.31	3999655.06	358	Oued Deurdeur
05	011603	Pluviométrique	Bordj Elamir AEK	433951.74	3969592.79	1074	
06	011606	Pluviométrique	Sidi Mokerfi	437321.24	3991601.55	447	
07	011702	Pluviométrique	Arib Cheliff	413954.07	4016184.92	246	Oued Harreza
08	011715	Hydro-pluviom	El ababsa	417311.00	4002046.94	320	
09	011718	Pluviométrique	Harreza BGE	418805.93	4005515.18	312	
10	011801	Hydro-pluviom	Arib Ebda	413449.57	4019401.08	280	Oued Ebda
11	011803	Pluviométrique	Sidi Medjahed	425903.56	4020829.64	850	
12	011804	Pluviométrique	Ain Defla	408451.47	4013695.89	271	
13	011605	Pluviométrique	Thniet el had	412557.08	3969995.72	1162	Oued Zeddine
14	011901	Pluviométrique	El touaibia	404261.20	3997469.23	376	
15	011905	Hydrométrie	Bir ouled Tahar	392159.37	4010104.75	331	
16	011906	Pluviométrique	Rouina mines	395150.25	4008085.03	343	Oued Tikzal
17	012001	Pluviométrique	El abadia	380853.85	4012119.23	158	
18	012004	Hydro-pluviom	Tikzal	388770.83	4005865.68	215	
19	012007	Pluviométrique	Bir saf saf	375186.60	4008237.86	166	Oued Ouahrane
20	012201	Hydro-pluviom	Ouled Fares	341490.70	4011118.12	116	
21	012218	Pluviométrique	Domaine si Tayeb	335957.07	4003437.22	84	
22	012221	Pluviométrique	Medjadja	353419.22	4012948.51	188	Oued Sly
23	012301	Hydrométrie	Ouled Ben AEK	344798.05	3989147.23	260	
24	012304	Pluviométrique	Souk El had	368456.80	3957438.33	550	
25	012309	Pluviométrique	Oued Sly	338434.90	3997733.37	95	Oued Sly
26	012318	Pluviométrique	Sidi Yakoub BGE	347745.10	3982598.30	272	

II.3.2 Comblement des lacunes

Les données collectées peuvent contenir des erreurs pour diverses raisons, ce qui peut compromettre leur fiabilité. Pour combler les lacunes dans les séries chronologiques et homogénéiser autant que possible les données, une correction doit être effectuée. Cela permet de repérer d'éventuelles anomalies. Il est nécessaire de combler les lacunes dans les séries de précipitations et de débits afin de les uniformiser au mieux et de faciliter la détection d'éventuelles instationnarités. Plusieurs méthodes existent pour combler les lacunes dans les séries chronologiques.

II.3.2.1 Méthode de la moyenne arithmétique

La moyenne simple correspond à la somme des valeurs observées des stations les plus proches divisée par le nombre total de valeurs, à condition que l'écart entre les valeurs des stations proches ne dépasse pas 10 %. L'équation II.1 donne l'expression de la moyenne arithmétique :

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (\text{II.1})$$

P_x est la valeur de la précipitation manquante de la station cible. P_i sont les valeurs des précipitations connues des stations les plus proches. n est le nombre total des stations les plus proches.

II.3.2.2 Méthode du rapport normal (normal ratio)

Lorsque la pluviométrie annuelle normale de l'une des stations sélectionnées est supérieure à 10 % de celle de la station dont les enregistrements sont manquants, la méthode de la moyenne simple ne peut pas être utilisée. La méthode à adopter consiste alors à pondérer la valeur des précipitations par les ratios des valeurs normales des précipitations annuelles. L'expression de la méthode du rapport normal est donnée par l'équation II.2 :

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{N_x}{N_i} P_i \quad (\text{II.2})$$

P_x est la valeur de la précipitation manquante de la station cible. P_i sont les valeurs des précipitations connues des stations les plus proches. n est le nombre total des stations les plus proches. N_x est la moyenne annuelle de la station cible. N_i sont les moyennes annuelles des précipitations des stations les plus proches.

II.3.2.3 Méthode de pondération par la distance inverse (inverse distance weighting - IDW)

Cette méthode repose sur l'inverse de la distance entre la station cible et les stations dont les valeurs sont connues. Elle est donnée par l'équation II.3 :

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} P_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (\text{II.3})$$

P_x est la valeur de la précipitation manquante de la station cible. P_i sont les valeurs des précipitations connues des stations. n est le nombre total des stations les plus proches. d_i sont les distances entre la station cible et les n stations.

Dans notre étude, toutes les lacunes ont été comblées à l'aide du logiciel Hydrolab version 98.2, un ensemble de macro-commandes pour Excel 2003 développé par Laborde, en utilisant la fonction « Bouche trous ».

Les stations pluviométriques ayant subi un comblement de lacunes sont celles dont les codes sont les suivants : 011601, 011803, 011605, 011906, 012218, et 012309.

Les stations hydrométriques ayant subi un comblement de lacunes sont : 011715, 012004, et 012201.

II.3.3 Homogénéisation des séries chronologiques

Pour toute analyse hydrologique, il est essentiel de vérifier la qualité des données utilisées. La base de données doit être fiable tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Les séries d'observations sont souvent soumises à des erreurs systématiques qu'il est nécessaire de détecter et de corriger. Cela implique une critique rigoureuse de ces données.

II.3.3.1 Méthodes graphiques

A. Méthode de doubles cumules

Cette méthode permet de représenter visuellement l'hétérogénéité de la série à analyser. Elle consiste à sélectionner une ou plusieurs stations fournissant des observations fiables comme stations de base ou de référence (Touaibia, 2015 ; Allali, 2023). Cette méthode établit une comparaison entre les valeurs cumulées annuelles, mensuelles ou journalières de la station à analyser (A) et celles d'une station de référence (B) (Équations II.4 et II.5) :

$$X(i) = \sum_{i=1}^n P_A(i) \quad (\text{II.4})$$

$$Y(i) = \sum_{i=1}^n P_B(i) \quad (\text{II.5})$$

L'objectif de cette méthode est d'obtenir une courbe des précipitations cumulées de la station contrôlée sur le même graphique que celle de la station de base. La courbe de doubles cumuls est proche d'une droite lorsque les données de la station contrôlée sont homogènes par rapport à celles de la station de base. Si une cassure est observée à partir d'un point M, les observations à partir de ce point sont soit fausses, soit hétérogènes. En cas de détection d'une hétérogénéité, la correction consiste à modifier la pente de la droite des doubles cumuls pour les données antérieures à la date de la cassure (Touaibia, 2015).

B. Méthode de cumul des résidus

Selon Bois (1972), une méthode basée sur le cumul des résidus a été proposée. Elle permet d'établir un seuil à partir duquel une cassure dans les données est considérée comme significative. Il est difficile de trouver une courbe de contrôle qui ne dépasse pas un seuil de confiance prédéfini, ce qui remet en question l'hypothèse d'homogénéité de la série. La courbe de contrôle a une forme ellipsoïdale (Zodekon et al., 2021). Cette approche amplifie les différences, ce qui améliore la clarté du graphique, notamment lorsque les écarts types sont faibles. Si les valeurs sortent de cette ellipse, l'hypothèse H_0 est rejetée au seuil de confiance $1-\alpha/2$, ce qui entraîne un risque de première espèce α . La zone de confiance est définie par les équations II.6 et II.7 :

$$Y_i = \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S_y \sqrt{1 - r^2} \sqrt{\frac{i(n-i)}{(n-1)}} \quad (\text{II.6})$$

$$\delta_i = y_i - \bar{y} - r \frac{S_y}{S_x} (x_i - \bar{x}) \quad (\text{II.7})$$

Où δ_i est la différence entre la valeur observée et celle donnée par la régression linéaire. $t_{\frac{\alpha}{2}}$ est la variable de Student. S_x est l'écart type de x . \bar{x} est la moyenne de x . S_y est l'écart type de y . \bar{y} est la moyenne de y .

II.3.3.2 Méthodes numériques

Ces méthodes consistent en l'utilisation de tests statistiques, tests d'hypothèses ou tests de signification pour détecter d'éventuelles ruptures et déterminer la tendance des séries chronologiques.

A. Test de Pettitt

L'approche non-paramétrique du test de Pettitt, dérivée du test de Mann-Whitney, permet de détecter un point de rupture dans une série de variables aléatoires indépendantes. Ce test est particulièrement sensible aux variations de la moyenne.

Il est basé sur la fonction de signe, telle que $\text{sgn}(x)=1$ si $x>0$, $\text{sgn}(x)=0$ si $x=0$, $\text{sgn}(x)=-1$ si $x<0$, qui est donné par:

$$D_{ij} = \text{sng}(x_i - x_j) \quad (\text{II.8})$$

On définit la variable :

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T D_{ij}, \text{ Tel que } 1 \leq t < T \quad (\text{II.8})$$

L'équation suivante détermine le point de changement τ le plus probable :

$$K_{\tau} = U_{\tau,T} = \max U_{t,T} \quad (\text{II.9})$$

En se basant sur des arguments asymptotiques concernant la statistique du test, Pettitt établit la valeur p approximative suivante pour le test :

$$p = 2 \exp \frac{-6K_{\tau}^2}{T^3 + T^2} \quad (\text{II.10})$$

Si un seuil de signification α est fixé et que pp est inférieur à ce seuil, l'hypothèse nulle H_0 , qui stipule que les deux distributions sont identiques, est rejetée.

B. Test de Mann-Kendall

Ce test permet de détecter une tendance dans les séries temporelles de données. C'est un test non-paramétrique robuste face aux valeurs extrêmes, ce qui le rend applicable même pour des variables biaisées. Ce test est une amélioration d'un test proposé par Mann (1954) et révisé par Kendall (1975). L'hypothèse nulle H_0 indique qu'il n'existe aucune tendance. Il est possible de détecter des tendances négatives, nulles ou positives.

La statistique de Mann-Kendall SS est définie comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sng}(x_k - x_i) \quad (\text{II.11})$$

En considérant x_k et x_i comme les valeurs séquentielles des données, ainsi que n représentant la longueur totale des données, nous obtenons :

$$\text{sng}(x_k - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } (x_k - x_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_k - x_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_k - x_i) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

L'indice du test est déterminé en comptant, pour chaque paire (x_k, x_i) avec $k < i$, le nombre de fois où la seconde valeur est plus grande que la première et vice versa, puis en calculant l'écart entre ces deux chiffres. L'utilisation de la valeur z permet d'évaluer l'existence d'une tendance statistiquement significative :

La variance de s peut être définie par :

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) \sum_t^1 f_t(f_t-1)(2f_t+5)}{18} \quad (\text{II.13})$$

f_t est la fréquence que le rang t apparaît.

Une valeur Z positif (ou négatif) signale une tendance montante (ou descendante), et sa signification est mise en parallèle avec la valeur critique α ou le seuil de significativité du test.

C. Test de Buishand

Ce test paramétrique suppose que la série suit une distribution normale. Il est particulièrement sensible aux ruptures situées au centre d'une série temporelle et utilise des sommes partielles ajustées, définies comme suit :

$$\begin{cases} s_0^* = 0 \\ s_k^* = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}), k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Quand une série est homogène, les valeurs de s_k^* varient autour de zéro car il n'y a pas d'écart régulier des valeurs de x_i par rapport à leur moyenne. Si une rupture se produit durant l'année k , alors s_k^* touche un pic (déplacement négatif) ou un creux (déplacement positif) aux alentours de l'année k . Dans les graphiques illustrant les résultats de ce test, on retrouve la représentation du ratio $\frac{s_k^*}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$. On peut vérifier le sens du décalage à l'aide de la «plage ajustée remise à l'échelle». R symbolise l'écart entre les valeurs minimales et maximales de s_k^* ajustées en fonction de la déviation standard de l'échantillon :

$$R = \frac{(\max s_k^* - \min s_k^*)}{s}, 0 \leq k \leq n \quad (\text{II.15})$$

L'homogénéité des séries chronologiques de notre région d'étude a été testée à l'aide de la méthode de cumul des résidus. La station d'Arib Cheliff (code 011702) a été choisie comme station de référence pour toutes les stations pluviométriques en raison de sa continuité. Les deux méthodes graphiques, la méthode de doubles masses (doubles cumules) et la méthode de cumul des résidus, ont été utilisées pour tester l'homogénéité des stations pluviométriques. Les résultats montrent que toutes les stations sont homogènes et présentent une bonne corrélation avec la station de référence d'Arib Cheliff. Les graphiques de la méthode de doubles cumuls sont présentés dans l'annexe 01, et ceux de la méthode de cumul des résidus sont dans l'annexe 02.

Le tableau II.3 représente les résultats des tests statistiques calculés.

Tableau II.3 résultats des tests statistiques des pluies mensuelles (2007-2012)

Stations	Test de Pettitt		Test de Buishand	Test de Mann-Kendall	
	p-value	U-value	p-value	p-value	Z
Marabout Blanc	0.44	285	0.34	0.37	0.89
Bordj Elamir AEK	0.11	403	0.42	0.05	1.96
Sidi Mokerfi	0.42	292	0.53	0.28	1.09
Arib Ebda	0.54	264	0.52	0.39	0.87
Sidi Medjahed	0.47	279	0.47	0.45	0.76
Ain Defla	0.74	221	0.14	0.86	0.18
Médéa secteur	0.66	237	0.69	0.39	0.85
Ain Sultan	0.45	283	0.49	0.77	0.29
Djenane B-Ouadah	0.72	225	0.52	0.40	0.85
Arib Cheliff	0.60	251	0.16	0.38	0.88
El ababsa	0.57	257	0.34	0.47	0.72
Harreza BGE	0.72	226	0.14	0.43	0.78
Ouled Fares	0.40	295	0.19	0.52	0.64
Domaine si Tayeb	0.40	295	0.03	0.21	1.26
Medjadja	0.26	336	0.05	0.16	1.42
Souk El had	0.15	381	0.12	0.16	1.40
Oued Sly	0.80	208	0.29	0.95	0.06
Sidi Yakoub BGE	0.54	265	0.21	0.70	0.39
El abadia	0.51	270	0.65	0.62	-0.49
Tikzal	0.52	268	0.32	0.80	0.25
Bir saf saf	0.28	330	0.35	0.99	0.01
Thniet el had	0.46	279	0.79	0.45	0.76
El touaibia	0.51	270	0.12	0.27	1.10
Rouina mines	0.69	233	0.15	0.63	0.48

Les résultats du test de Pettitt montrent que pour toutes les stations, la p-value est supérieure à 0.05, ce qui suggère qu'il n'y a pas de point de changement statistiquement significatif détecté à un seuil de 5%. Il est intéressant de noter que le test de Buishand a également identifié des points de changement pour Domaine si Tayeb et Medjadja, qui n'étaient pas aussi clairement significatifs avec le test de Pettitt. Pour la majorité des autres stations, le test de Mann-Kendall indique no trend (pas de tendance) avec une p-value supérieure à 0.05 sauf pour la station de Bordj Elamir AEK (p-value = 0.05), ce qui signifie qu'il n'y a pas de preuve statistique d'une tendance monotone dans leurs séries de pluies mensuelles.

II.3.4 Répartition mensuelle des pluies

La répartition mensuelle des précipitations a été analysée par sous-bassin afin de clarifier la distribution des données, comme illustré dans les graphiques de l'annexe 03. Les stations de chaque sous-bassin étudié montrent clairement deux phases distinctes : une phase sèche, qui s'étend de juin à septembre, et une phase humide, qui couvre les autres mois de l'année. Les précipitations mensuelles reflètent bien les variations saisonnières et leur répartition annuelle. Un maximum mensuel de 122,38 mm a été enregistré à la station de Médéa secteur au mois de novembre, qui représente le mois le plus pluvieux pour tous les sous-bassins.

II.3.5 Paramètres statistiques des séries de pluie

Les paramètres statistiques d'une série de précipitations permettent de mieux comprendre le comportement des pluies, de modéliser les événements climatiques et de fournir des bases solides pour la prise de décision en matière de gestion des ressources hydriques. Les principaux paramètres statistiques des pluies mensuelles des séries sont résumés dans le tableau II.4, basé sur la lecture de 72 mois (2007-2012) pour chaque station.

Tableau II.4 Paramètres statistiques des pluies mensuelles (2007-2012)

Sous bassin	Oued Deurdeur				Oued Ebda	
Stations	Marabout Blanc	Bordj Elamir AEK	Sidi Mokerfi	Arib Ebda	Sidi Medjahed	Ain Defla
N	72	72	72	72	72	72
Moy	12.2	11.7	13.8	23.5	20.0	18.7
écart-type	12.8	11.4	12.1	20.5	17.1	18.5
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Quartile 25%	3.3	3.8	3.5	7.8	7.8	5.1
Médiane	6.9	9.8	11.6	18.1	13.9	13.2
Quartile 75%	18.8	17.6	20.9	31.4	27.1	28.7
Max	67.3	66.0	45.2	98.4	75.3	82.4
Sous bassin	Oued Harbil			Oued Harreza		
Stations	Médéa secteur	Ain Sultan	Djenane B-Ouadah	Arib Cheliff	El ababsa	Harreza BGE
N	72	72	72	72	72	72
Moy	25.3	14.0	16.8	16.6	13.7	14.1
écart-type	17.8	12.7	14.1	17.1	13.6	14.6
Min	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Quartile 25%	10.0	2.8	4.2	5.7	3.0	3.3
Médiane	21.3	11.1	14.4	9.4	9.2	8.0
Quartile 75%	36.4	19.6	26.5	23.6	20.6	22.0
Max	81.4	45.1	60.5	71.1	60.0	58.1
Sous bassin	Oued Ouahrane			Oued Sly		
Stations	Ouled Fares	Domaine si Tayeb	Medjadja	Souk El had	Oued Sly	Sidi Yakoub BGE
N	72	72	72	72	72	72
Moy	14.6	13.9	14.7	13.1	13.5	13.7
écart-type	14.5	18.9	14.9	14.3	17.4	14.5
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Quartile 25%	4.1	1.9	3.8	2.3	2.7	3.4
Médiane	11.9	8.5	12.1	8.4	8.2	7.5
Quartile 75%	20.5	17.4	20.2	16.6	18.9	20.0
Max	76.4	92.2	92.8	68.5	107.8	68.8
Sous bassin	Oued Tikzal			Oued Zeddine		
Stations	El abadia	Tikzal	Bir saf saf	Thniet el had	El touaibia	Rouina mines
N	72	72	72	72	72	72
Moy	13.5	15.0	12.1	20.0	11.3	13.5
écart-type	15.6	14.7	13.8	16.1	11.2	13.0
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Quartile 25%	2.7	3.9	3.2	5.1	3.3	4.1
Médiane	7.1	9.6	7.6	19.0	7.1	10.0
Quartile 75%	21.5	24.1	16.0	26.9	16.8	18.0
Max	74.7	68.7	77.1	69.4	59.2	67.9

II.3.6 Détermination de la pluviométrie moyenne dans les sous-bassins

La méthode du polygone de Thiessen a été utilisée pour déterminer la pluviométrie moyenne dans chaque sous-bassin de la zone d'étude. Cette technique, largement employée dans la littérature pour évaluer la pluviométrie moyenne dans un bassin versant, attribue un poids aux données des stations en fonction de leur distance relative. Il s'agit d'une méthode arithmétique qui assigne un poids à chaque station de mesure des précipitations, proportionnellement à une zone d'influence estimée (Équation II.16) :

$$P_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A} \tag{II.16}$$

Où :

- P_{moy} est la pluviométrie moyenne du sous-bassin.
- A est la superficie totale du sous-bassin.
- A_i est la superficie du polygone recouvrant la station pluviométrique.
- P_i est la valeur de la précipitation mesurée à la station pluviométrique.

La figure II.9 illustre les polygones de Thiessen pour tous les sous-bassins étudiés.

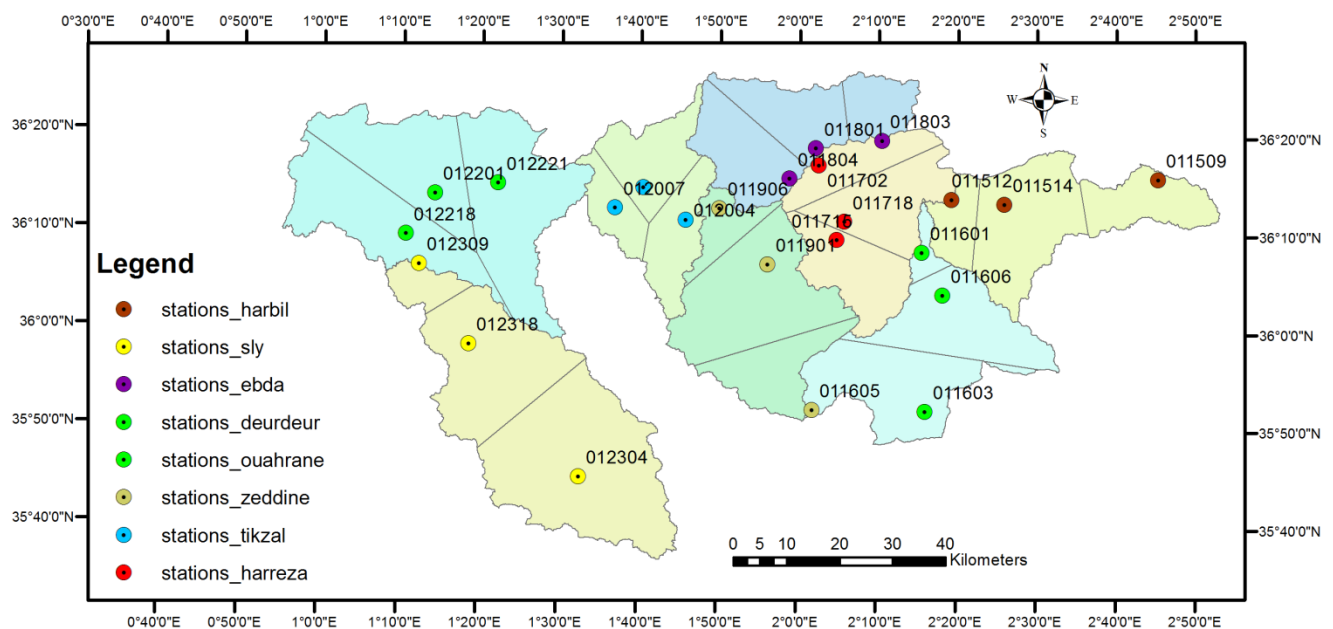


Figure II.10 Polygone de Thiessen des sous bassins étudiés.

II.3.7 Evolution des débits mensuels

La station hydrométrique de Tikzal a enregistré les débits mensuels les plus élevés, tandis que les débits les plus faibles ont été observés aux stations d'Arib Ebda et de Bir Ouled Tahar. D'après la figure II.10, il est clair que la période allant de juin à septembre correspond à la phase de débits minimaux (pour la période de la modélisation de 2007 à 2012).

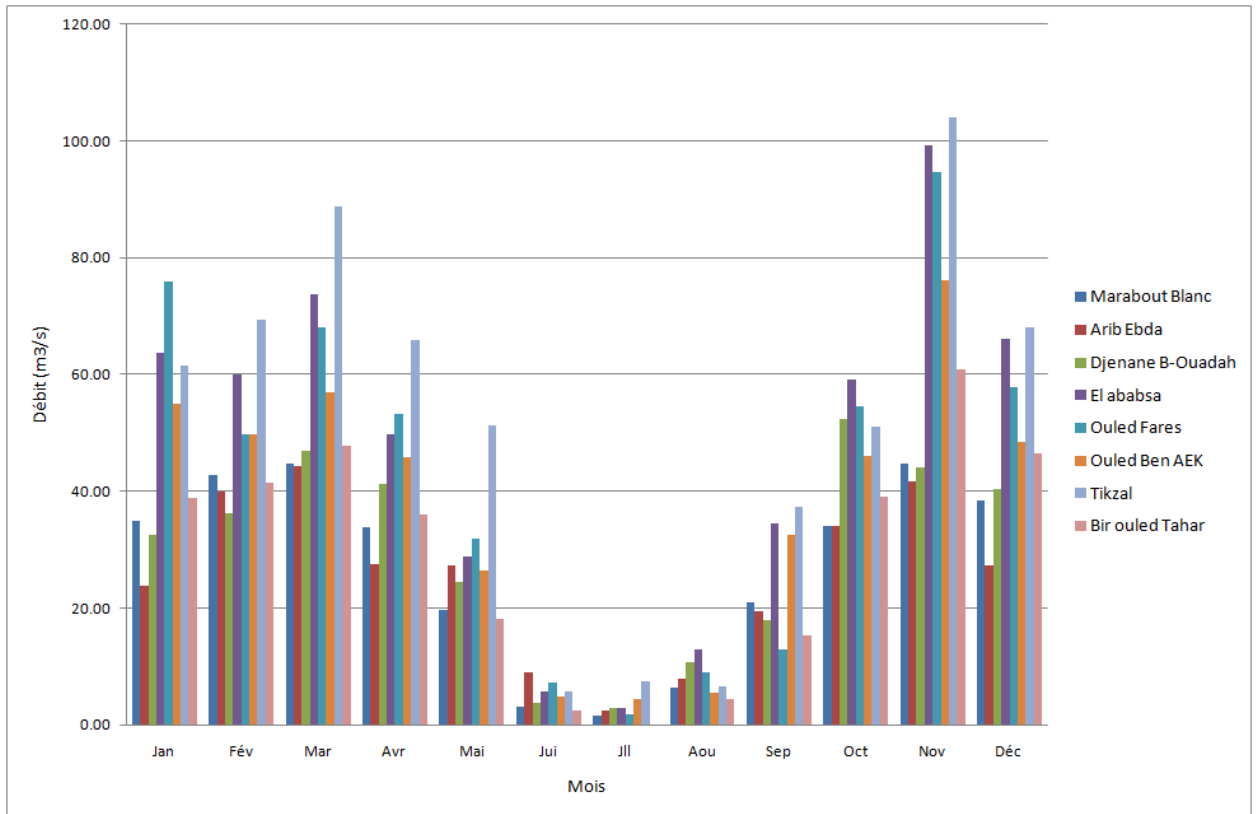


Figure II.11 Répartition mensuelle des débits.

II.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description détaillée du bassin du Haut et Moyen Cheliff, en mettant l'accent sur ses caractéristiques géographiques, hydrographiques, météorologiques et morphométriques. La zone d'étude, couvrant une superficie de 10 930 km², a été analysée à travers ses sous-bassins, son réseau hydrographique, ses types de sols, sa couverture végétale, ainsi que ses régimes de précipitations et d'évapotranspiration. Ces éléments sont essentiels pour comprendre le comportement hydrologique de la région et pour alimenter les modèles hydrologiques utilisés dans cette étude.

Les données collectées, provenant de stations pluviométriques et hydrométriques, ont été traitées et homogénéisées afin de garantir leur fiabilité et leur cohérence. Les méthodes de comblement des lacunes et d'homogénéisation des séries chronologiques ont permis de corriger les anomalies et d'assurer la qualité des données utilisées pour les analyses ultérieures. Les résultats montrent une répartition saisonnière marquée des précipitations, avec une phase humide et une phase sèche bien distinctes, ainsi qu'une variabilité spatiale des débits et des précipitations à travers les sous-bassins.

Chapitre III

Régionalisation des débits

d'un bassin non jaugé

III.1 Introduction

La gestion des ressources en eau dans les bassins versants non jaugés représente un défi majeur pour les hydrologues et les gestionnaires de l'eau. En l'absence de données hydrométriques directes, il est essentiel de développer des méthodes fiables pour estimer les débits et comprendre les processus hydrologiques dans ces bassins. La régionalisation des débits, qui consiste à transférer des informations hydrologiques d'un bassin jaugé à un bassin non jaugé, est une approche couramment utilisée pour surmonter ce problème.

De nombreuses études ont été menées sur les prévisions dans les bassins versants non jaugés, en particulier depuis le lancement de l'initiative Predictions in Ungauged Basins (PUB) par l'association internationale des sciences hydrologiques en 2003. Ces études se sont multipliées et étendues à plusieurs régions du monde. De nombreuses recherches ont appliqué et comparé des méthodes de régionalisation dans diverses régions, en combinaison avec un large éventail de modèles hydrologiques ([Salinas et al., 2013](#); [Breton-Dufour, 2017](#); [Yang et al 2018](#)). Différentes techniques ont été appliquées selon les régions, et plusieurs conclusions ont été tirées, affirmant que les études menées dans des zones spécifiques ainsi que le choix de certains modèles hydrologiques influencent la performance des méthodes de régionalisation (par exemple : [Salinas et al., 2013](#); [Merz et al., 2004](#) ; [Parajka et al., 2013](#) ; [Reichl et al., 2009](#) ; [Samuel et al., 2011](#) ; [Viglione et al., 2013](#); [Pool et al., 2019](#)). Pour les méthodes basées sur la proximité spatiale ou la similarité physique, de nombreux auteurs ont démontré que l'utilisation de plusieurs bassins donateurs pour la régionalisation pouvait donner des résultats nettement meilleurs que l'utilisation d'un seul bassin donneur ([Oudin et al., 2008](#) ; [Samuel et al., 2011](#)) . Pour moyenner les hydrogrammes générés, plusieurs méthodes de moyennage multi-donneurs ont été mises en œuvre, mais les deux approches les plus couramment utilisées sont la moyenne arithmétique et la méthode de pondération par l'inverse de la distance (Inverse Distance Weighting, IDW). Malgré le problème de disponibilité des données dans plusieurs bassins algériens en raison d'un grand nombre de données manquantes ou de mauvaise qualité, peu d'études ont été consacrées aux méthodes de régionalisation. Par exemple, [Zamoum et al. \(2019\)](#) ont utilisé le modèle GR2M pour fournir des informations continues sur les débits mensuels dans des bassins non jaugés du nord de l'Algérie, en utilisant deux techniques de classification : l'analyse en composantes principales (ACP) et les cartes auto-organisatrices (Self-Organizing Maps, SOM). [Ammari et al. \(2017\)](#) ont utilisé une méthode simple basée sur l'entropie pour simuler les débits dans des sites fluviaux jaugés et non jaugés du bassin côtier algérien.

Ce chapitre explore deux méthodes principales de régionalisation : la proximité spatiale et la similarité physique, appliquées au bassin de l'Oued Tikzal, supposé non jaugé. La méthode de proximité spatiale repose sur l'hypothèse que les bassins versants géographiquement proches présentent des comportements hydrologiques similaires. En revanche, la méthode de similarité physique considère que les bassins ayant des caractéristiques physiques comparables (telles que la topographie, la géologie, ou le type de sol) réagissent de manière similaire aux événements pluviométriques. Ces deux approches sont étudiées ici dans le cadre de la modélisation hydrologique à l'aide du modèle HEC-HMS, un outil largement utilisé pour simuler les processus pluie-débit.

L'objectif de ce chapitre est de comparer l'efficacité de ces deux méthodes de régionalisation pour estimer les débits dans le bassin de l'Oued Tikzal. Pour ce faire, le modèle HEC-HMS a été calibré et validé sur huit sous-bassins du haut et moyen Cheliff, dont cinq ont été sélectionnés comme bassins donateurs. Les résultats obtenus permettent d'évaluer la performance des méthodes de régionalisation en termes de précision des débits estimés, en utilisant des critères de performance tels que le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE), le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Ce chapitre s'articule en plusieurs sections : après une présentation de la méthodologie employée, les résultats de la calibration et de la validation du modèle HEC-HMS sont discutés. Ensuite, les performances des méthodes de régionalisation par proximité spatiale et similarité physique sont comparées, en mettant en avant les avantages et les limites de chaque approche. Enfin, une discussion générale est proposée, suivie d'une conclusion qui résume les principaux enseignements de cette étude.

III.2 Méthodologie

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour la régionalisation des débits dans le bassin de l'Oued Tikzal, considéré comme non jaugé. Le modèle hydrologique HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) a été sélectionné pour simuler les processus pluie-débit dans les sous-bassins du haut et moyen Cheliff. L'étude s'est déroulée en trois phases principales : la calibration et la validation du modèle, la sélection des bassins donateurs, et la régionalisation des débits. Chaque phase est détaillée ci-dessous.

III.2.1 Equations utilisées

Les équations suivantes ont été utilisées pour les calculs de distance, de similarité et de moyenne :

- **Distance euclidienne** (équation III.1) :

$$d = \sqrt{(X_G - X_U)^2 + (Y_G - Y_U)^2} \quad (\text{III.1})$$

- **Indice de similarité physique** (équation III.2) :

$$\theta = \sum_{i=1}^K \frac{|CD_i^G - CD_i^U|}{\Delta CD_i} \quad (\text{III.2})$$

- **Moyenne arithmétique des paramètres** (équation III.3) :

$$P_{\text{Arith}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (\text{III.3})$$

- **Moyenne par pondération de la distance inverse (IDW)** (équation III.4) :

$$P_{\text{IDW}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \left(\frac{1}{d_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \quad (\text{III.4})$$

Cette méthodologie structurée permet d'estimer les débits dans le bassin non jaugé de l'Oued Tikzal en transférant les informations hydrologiques des bassins jaugés voisins. Les résultats obtenus seront discutés dans les sections suivantes, en mettant en avant les performances des différentes approches de régionalisation.

III.2.2 Calibration et validation du modèle HEC-HMS

La première étape de la méthodologie a consisté à calibrer et valider le modèle HEC-HMS pour huit sous-bassins du haut et moyen Cheliff.

III.2.2.1 Calibration du modèle

La calibration du modèle a été réalisée sur la période de janvier 2007 à décembre 2009. Les paramètres du modèle HEC-HMS ont été ajustés pour chaque sous-bassin afin de reproduire au mieux les débits observés. Les séries d'écoulement simulées et les paramètres du modèle ont été déterminés pour chaque sous-bassin au pas de temps journalier.

III.2.2.2 Validation du modèle

La validation du modèle a été effectuée sur la période de janvier 2010 à décembre 2012. Cette phase permet de vérifier la robustesse du modèle en comparant les débits simulés aux débits observés sur une période indépendante de celle utilisée pour la calibration.

III.2.3 Sélection des bassins donneurs

Parmi les huit sous-bassins étudiés, cinq ont été sélectionnés comme bassins donneurs pour la régionalisation des débits de l'Oued Tikzal. Cette sélection a été basée sur deux approches principales : la proximité spatiale et la similarité physique.

III.2.3.1 Proximité spatiale

La proximité spatiale a été évaluée en calculant la distance euclidienne entre les centroïdes des sous-bassins donateurs et celui du bassin cible (Oued Tikzal). La distance euclidienne (d) est donnée par l'équation III.5 :

$$d = \sqrt{(X_G - X_U)^2 + (Y_G - Y_U)^2} \quad (\text{III.5})$$

Où :

- (X_G, Y_G) : coordonnées du centroïde du bassin jaugé (donneur).
- (X_U, Y_U) : coordonnées du centroïde du bassin non jaugé (Oued Tikzal).

Le sous-bassin ayant la plus petite distance euclidienne est considéré comme le plus proche géographiquement du bassin cible.

III.2.3.2 Similarité physique

La similarité physique a été évaluée en calculant un indice de similarité (θ) basé sur les caractéristiques physiques des bassins. L'indice de similarité est donné par l'équation III.6 :

$$\theta = \sum_{i=1}^K \frac{|CD_i^G - CD_i^U|}{\Delta CD_i} \quad (\text{III.6})$$

Où CD_i^G sont les valeurs du descripteur i pour un bassin jaugé (G) et le bassin non jaugé (U), k est le nombre de descripteurs physiques pris en compte, et ΔCD_i est la plage de valeurs disponibles pour le descripteur physique (i), c'est-à-dire la valeur maximale moins la valeur minimale. Le plus petit indice de similarité indique la plus grande similarité avec le bassin donneur (Breton-Dufour, 2017).

III.2.4 Régionalisation des débits

La régionalisation des débits a été réalisée selon deux méthodes principales : la moyenne des hydrogrammes et la moyenne des paramètres. Ces méthodes ont été appliquées en utilisant deux techniques de calcul : la moyenne arithmétique (Arith) et la pondération par la distance inverse (IDW).

III.2.4.1 Moyenne des hydrogrammes

Les débits du bassin cible (Oued Tikzal) ont été estimés en calculant la moyenne des hydrogrammes des bassins donateurs. Deux techniques ont été utilisées :

- **Moyenne arithmétique (Arith)** : Les débits des bassins donateurs sont moyennés sans pondération.

- **Pondération par la distance inverse (IDW)** : Les débits des bassins donateurs sont pondérés en fonction de leur distance au bassin cible.

III.2.4.2 Moyenne des paramètres

Les paramètres du modèle HEC-HMS des bassins donateurs ont été transférés au bassin cible en utilisant les mêmes techniques de moyenne (Arith et IDW). Les débits du bassin cible ont ensuite été simulés en utilisant ces paramètres régionalisés.

III.2.5 Evaluation des performances

Les performances des méthodes de régionalisation ont été évaluées à l'aide de trois critères principaux :

- **Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE)** : Mesure la qualité de la simulation par rapport aux observations.
- **Coefficient de détermination (R^2)** : Indique la proportion de variance expliquée par le modèle.
- **Erreur quadratique moyenne (RMSE)** : Mesure l'écart moyen entre les débits simulés et observés.

Ces critères ont été utilisés pour comparer les débits régionalisés aux débits simulés par le modèle HEC-HMS pour le bassin cible.

La figure III.1 présente le schéma des étapes effectuées.

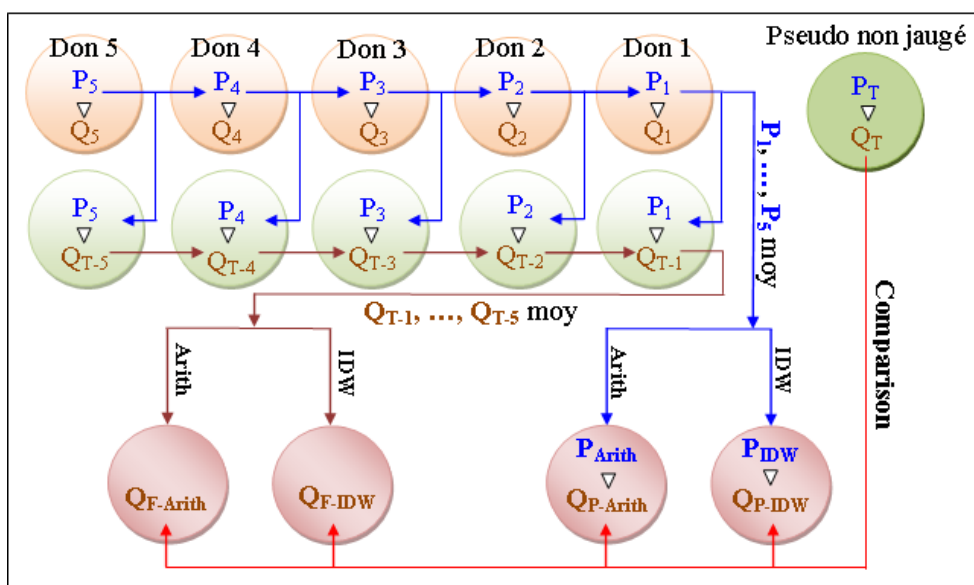


Figure III.1 La méthodologie suivie pour la régionalisation des débits de Oued Tikzal

Don 1 à Don 5 sont les sous bassins donneurs.

P_1 à P_5 sont les paramètres des sous bassins donneurs obtenus suite à la modélisation par le modèle HEC-HMS.

Q_1 à Q_5 sont les débits obtenus par la modélisation par HEC-HMS des sous bassins donneurs.

P_T sont les paramètres du sous bassin cible (Oued Tikzal) obtenus suite à la modélisation par le modèle HEC-HMS.

Q_T sont les débits obtenus par la modélisation par HEC-HMS du sous bassin cible (Oued Tikzal).

Q_{T-1} à Q_{T-5} sont les débits obtenus suite à la modélisation par HEC-HMS du sous bassin cible (Oued Tikzal) en utilisant les paramètres transférés des sous bassins donneurs.

P_{Arith} , P_{IDW} sont les moyennes des paramètres des sous bassins donneurs par la moyenne arithmétique (Arith) et par la pondération de la distance inverse (IDW) respectivement.

$Q_{P\text{-Arith}}$, $Q_{P\text{-IDW}}$ sont les débits obtenus suite à la modélisation par HEC-HMS du sous bassin cible (Oued Tikzal) en utilisant les paramètres obtenus par la moyenne arithmétique (Arith) et par la pondération de la distance inverse (IDW) respectivement.

$Q_{F\text{-Arith}}$, $Q_{F\text{-IDW}}$ sont les moyennes des débits des sous bassins donneurs par la moyenne arithmétique (Arith) et par la pondération de la distance inverse (IDW) respectivement.

III.3 Résultats

Cette section présente les résultats obtenus lors de la calibration et de la validation du modèle HEC-HMS pour les huit sous-bassins du haut et moyen Cheliff. Les performances du modèle sont évaluées à l'aide de critères statistiques, et les débits simulés sont comparés aux débits observés pour chaque sous-bassin.

III.3.1 Calibration et validation du modèle HEC-HMS pour tous les sous-bassins

Le modèle hydrologique HEC-HMS a été calibré et validé pour les huit sous-bassins cités ci-dessus.

a. Calibration du modèle

La calibration du modèle a été réalisée sur la période de janvier 2007 à décembre 2009. Les paramètres du modèle HEC-HMS ont été ajustés pour chaque sous-bassin afin de reproduire au mieux les débits observés. Les paramètres calibrés pour chaque sous-bassin sont présentés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 Paramètres calibrés du modèle HEC-HMS pour les sous-bassins donneurs et le sous-bassin cible (Oued Tikzal)

Paramètres	Oued Harreza	Oued Ouahrane	Oued Zeddine	Oued Deurdeur	Oued Harbil	Oued Ebda	Oued Sly	Oued Tikzal
Constant rate	5.44	6.56	4.49	5.02	5.9	5.15	5.84	5.26
Initial Deficit	1.19	2.44	1.17	1.07	1.16	0.83	1.05	0.83
Maximum Deficit	1.2	10.05	2.17	1.62	1.51	1.07	1.12	2.44
Lag time	1100	1700	1800	2000	2000	1832	1600	1800
Canopy-Initial Storage	0.1	4.23	0.59	0.048	0.23	0.28	0.26	0.4
Canopy-Max Storage	0.08	16.85	0.61	0.92	0.22	0.31	0.9	0.23
Surface-Initial Storage	0.07	2.31	0.39	0.6	0.18	0.23	0.46	0.21
Surface-Max Storage	1.13	6.07	0.85	1.42	1.2	1.24	1.39	0.7
Recession-Initial discharge	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1
Recession-Ratio to peak	0.1	0.5	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7
Recession-Recession Constant	0.4	0.6	0.2	0.1	0.1	0.6	0.3	0.5

b. Validation du modèle

La validation du modèle a été effectuée sur la période de janvier 2010 à décembre 2012. Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de trois critères statistiques : le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE), le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les résultats de la calibration et de la validation sont présentés dans le Tableau III.2.

Tableau III.2 Résultats des critères de performance pour la calibration et la validation du modèle HEC-HMS

Critères de performance	Oued Harreza	Oued Ouahrane	Oued Zeddine	Oued Deurdeur	Oued Harbil	Oued Ebda	Oued Sly	Oued Tikzal
Phase de calibration								
NSE	0.71	0.79	0.64	0.61	0.63	0.62	0.65	0.61
R^2	0.71	0.79	0.64	0.61	0.65	0.63	0.66	0.60
RMSE	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Phase de validation								
NSE	0.77	0.73	0.67	0.61	0.63	0.63	0.64	0.77
R^2	0.76	0.74	0.67	0.61	0.63	0.64	0.64	0.76
RMSE	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50

c. Analyse des performances

- **Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE)** : Les valeurs de NSE varient entre 0.61 et 0.79 pour la phase de calibration et entre 0.61 et 0.77 pour la phase de validation. Ces valeurs indiquent que le modèle reproduit de manière satisfaisante les débits observés, avec des performances allant de satisfaisantes à bonnes.
- **Coefficient de détermination (R^2)** : Les valeurs de R^2 varient entre 0.60 et 0.79 pour la phase de calibration et entre 0.61 et 0.76 pour la phase de validation. Ces résultats confirment que le modèle explique une grande partie de la variance des débits observés.
- **Erreur quadratique moyenne (RMSE)** : Les valeurs de RMSE varient entre 0.50 et 0.60 pour les deux phases, ce qui indique une erreur relativement faible entre les débits simulés et observés.

d. Graphiques des débits observés et simulés

La figure III.2 présente les graphiques des débits observés et simulés pour tous les sous-bassins lors de la phase de calibration. Ces graphiques montrent une bonne adéquation entre les débits observés et simulés, bien que les débits de pointe soient légèrement sous-estimés par le modèle. Les hydrogrammes simulés reproduisent correctement la forme des hydrogrammes observés, avec un retard minimal dans les phases de montée et de descente.

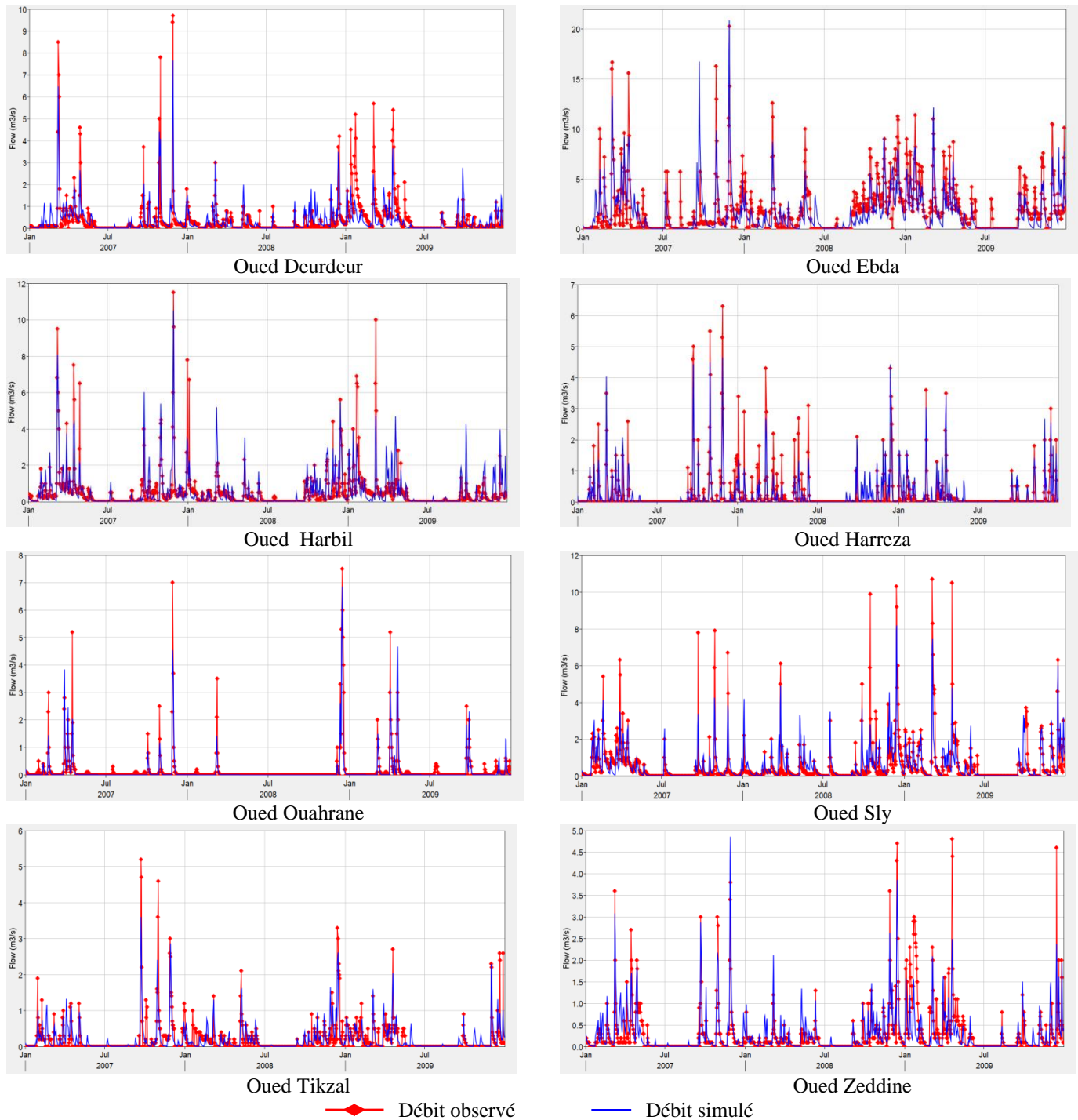


Figure III.2 Graphiques des débits observés et simulés de tous les sous bassins par le modèle HMC-HMS pour la phase de calibration.

Les résultats de la calibration et de la validation du modèle HEC-HMS montrent que le modèle est capable de reproduire de manière satisfaisante les débits observés dans les huit sous-bassins étudiés. Les performances du modèle, évaluées à l'aide des critères NSE, R^2 et RMSE, sont globalement bonnes, avec des valeurs légèrement meilleures lors de la phase de validation. Ces résultats confirment la robustesse du modèle HEC-HMS pour la simulation des processus pluie-débit dans la région du haut et moyen Cheliff.

Les graphiques des débits observés et simulés de tous les sous-bassins pour la phase de validation sont présentés dans la figure III.3.

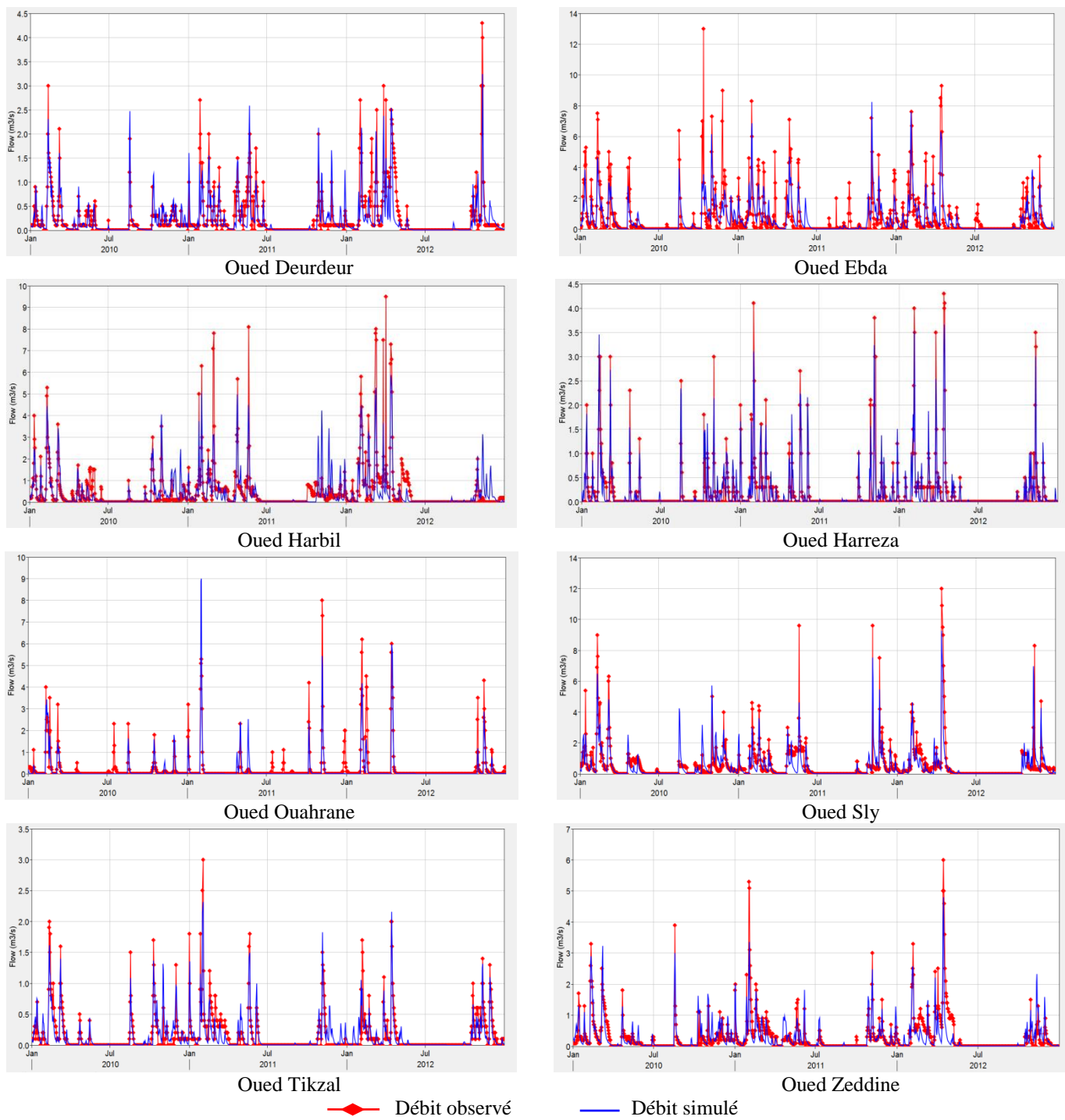


Figure III.3 Graphiques des débits observés et simulés de tous les sous bassins par le modèle HMC-HMS pour la phase de validation

III.3.2 Régionalisation des débits de l'Oued Tikzal

Cette section présente les résultats de la régionalisation des débits pour le sous-bassin de l'Oued Tikzal, considéré comme non jaugé. Deux méthodes de similarité ont été utilisées pour sélectionner les bassins donateurs : la proximité spatiale et la similarité physique. Ensuite, deux approches de régionalisation ont été appliquées : la moyenne des hydrogrammes et la moyenne des paramètres. Les résultats sont évalués à l'aide des critères de performance NSE, R^2 et RMSE.

III.3.2.1 Sélection des bassins donateurs

La sélection des bassins donateurs a été réalisée en utilisant deux méthodes de similarité : la proximité spatiale et la similarité physique. Ces méthodes permettent de classer les sous-bassins en fonction de leur distance géographique ou de leur similarité physique avec le bassin cible (Oued Tikzal).

a. Proximité spatiale

La proximité spatiale a été évaluée en calculant la distance euclidienne entre les centroïdes des sous-bassins donateurs et celui du bassin cible. Les sous-bassins les plus proches géographiquement ont été sélectionnés comme donateurs. Le classement des sous-bassins selon la proximité spatiale est présenté dans le Tableau III.3.

Tableau III.3 Classement des sous-bassins donateurs selon la proximité spatiale et la similarité physique

Classement	Proximité spatiale	Distance (d) en km	Similarité physique	Indice de similarité (θ)
1	Oued Zeddine	28.43	Oued Harbil	2.33
2	Oued Ebda	29.55	Oued Ebda	3.72
3	Oued Ouahrane	44.01	Oued Deurdeur	3.78
4	Oued Harreza	46.09	Oued Zeddine	4.42
5	Oued Sly	46.80	Oued Ouahrane	4.53
6	Oued Deurdeur	58.84	Oued Harreza	4.85
7	Oued Harbil	65.38	Oued Sly	5.73

- Les cinq sous-bassins les plus proches géographiquement (par proximité spatiale) de l'Oued Tikzal sont : Oued Zeddine, Oued Ebda, Oued Ouahrane, Oued Harreza et Oued Sly.

b. Similarité physique :

En se référant au tableau ci-dessus (tableau III.3), nous avons :

- Les cinq sous-bassins les plus similaires physiquement (par similarité physique) à l'Oued Tikzal sont : Oued Harbil, Oued Ebda, Oued Deurdeur, Oued Zeddine et Oued Ouahrane.

III.3.2.2 Régionalisation par la moyenne des hydrogrammes

Les débits du bassin cible (Oued Tikzal) ont été estimés en calculant la moyenne des hydrogrammes des sous-bassins donneurs. Deux techniques de moyenne ont été utilisées : la moyenne arithmétique (Arith) et la pondération par la distance inverse (IDW). Les résultats des critères de performance sont présentés dans le Tableau III.4.

Tableau III.4 Résultats des critères de performance pour la régionalisation par la moyenne des hydrogrammes

Critères de performance	Proximité spatiale		Similarité physique	
	Q _{F-IDW}	Q _{F-Arith}	Q _{F-IDW}	Q _{F-Arith}
Phase de calibration				
NSE	0.58	0.61	0.60	0.61
R ²	0.60	0.61	0.60	0.61
RMSE	0.31	0.30	0.47	0.30
Phase de validation				
NSE	0.74	0.75	0.76	0.75
R ²	0.76	0.76	0.76	0.76
RMSE	0.17	0.16	0.32	0.16

- **Proximité spatiale** : Les valeurs de NSE varient entre 0.58 et 0.75, avec une légère amélioration lors de la phase de validation. La méthode de moyenne arithmétique (Arith) donne de meilleurs résultats que la pondération par la distance inverse (IDW).
- **Similarité physique** : Les valeurs de NSE sont légèrement supérieures à celles obtenues par la proximité spatiale, avec un NSE de 0.76 lors de la phase de validation. La moyenne arithmétique (Arith) montre également de meilleures performances que la méthode IDW.

III.3.2.3 Régionalisation par la moyenne des paramètres

Les débits du bassin cible (Oued Tikzal) ont également été estimés en transférant les paramètres du modèle HEC-HMS des sous-bassins donneurs. Deux techniques de moyenne ont été utilisées : la moyenne arithmétique (Arith) et la pondération par la distance inverse (IDW). Les résultats des critères de performance sont présentés dans le Tableau III.5.

Tableau III.5 Résultats des critères de performance pour la régionalisation par la moyenne des paramètres

Critères de performance	Proximité spatiale		Similarité physique	
	QP-IDW	QP-Arith	QP-IDW	QP-Arith
Phase de calibration				
NSE	0.58	0.60	0.50	0.61
R ²	0.59	0.61	0.50	0.61
RMSE	0.30	0.30	0.34	0.30
Phase de validation				
NSE	0.75	0.73	0.66	0.75
R ²	0.75	0.75	0.66	0.77
RMSE	0.17	0.17	0.19	0.16

- **Proximité spatiale** : Les valeurs de NSE varient entre 0.58 et 0.75, avec des performances légèrement meilleures lors de la phase de validation. La moyenne arithmétique (Arith) donne des résultats comparables à la méthode IDW.
- **Similarité physique** : Les valeurs de NSE sont légèrement inférieures à celles obtenues par la proximité spatiale, avec un NSE de 0.66 lors de la phase de validation. Cependant, la moyenne arithmétique (Arith) montre des performances supérieures à la méthode IDW.

III.3.2.4 Comparaison des méthodes de régionalisation

- **Moyenne des hydrogrammes vs. Moyenne des paramètres** : La régionalisation par la moyenne des hydrogrammes donne des résultats légèrement meilleurs que la régionalisation par la moyenne des paramètres, en particulier pour la méthode de similarité physique.
- **Moyenne arithmétique (Arith) vs. Pondération par la distance inverse (IDW)** : La moyenne arithmétique (Arith) donne des résultats plus fiables et plus cohérents que la pondération par la distance inverse (IDW), quelle que soit la méthode de similarité utilisée.

La régionalisation des débits de l'Oued Tikzal a montré que la méthode de proximité spatiale donne des résultats légèrement meilleurs que la méthode de similarité physique, en particulier lors de la phase de validation. La moyenne arithmétique des hydrogrammes ou des paramètres s'est avérée plus efficace que la pondération par la distance inverse (IDW). Ces résultats confirment l'importance de la proximité géographique dans la régionalisation des débits, tout en montrant que la similarité physique peut également être une approche valable pour certains bassins.

III.4 Discussions

Cette section discute des résultats obtenus lors de la modélisation et de la régionalisation des débits dans les sous-bassins du haut et moyen Chelif. Les performances du modèle HEC-HMS, ainsi que les résultats de la régionalisation par proximité spatiale et similarité physique, sont analysés en détail. Les résultats sont également comparés à ceux d'autres études pour évaluer l'efficacité des méthodes employées.

III.4.1 Performance du modèle HEC-HMS

Les résultats de la modélisation par HEC-HMS pour les huit sous-bassins montrent des performances allant de satisfaisantes à bonnes. Les critères de performance utilisés pour évaluer le modèle sont le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE), le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

III.4.1.1 Calibration et validation du modèle

- **NSE** : Les valeurs de NSE varient entre 0.61 et 0.79 lors de la phase de calibration et entre 0.61 et 0.77 lors de la phase de validation. Ces valeurs indiquent que le modèle reproduit de manière satisfaisante les débits observés, avec des performances légèrement meilleures lors de la phase de validation.
- **R^2** : Les valeurs de R^2 varient entre 0.60 et 0.79 lors de la phase de calibration et entre 0.61 et 0.76 lors de la phase de validation. Ces résultats confirment que le modèle explique une grande partie de la variance des débits observés.
- **RMSE** : Les valeurs de RMSE varient entre 0.50 et 0.60 pour les deux phases, ce qui indique une erreur relativement faible entre les débits simulés et observés.

III.4.1.2 Analyse des hydrogrammes

Les figures III.2 et III.3 montrent que le modèle reproduit de manière satisfaisante la forme des hydrogrammes observés. Cependant, les débits de pointe simulés sont légèrement sous-estimés par le modèle, tant pour la phase de calibration que pour la phase de validation. Ce phénomène peut s'expliquer par une légère sous-estimation des pertes par interception ou par une optimisation imparfaite du lag time. Néanmoins, il n'y a pas de retard important dans la simulation des parties montantes ou descendantes des hydrogrammes, ce qui indique une bonne adéquation entre les séries de précipitations et de débits.

III.4.2 Régionalisation par la moyenne des hydrogrammes

La régionalisation par la moyenne des hydrogrammes a été réalisée en utilisant deux techniques de calcul : la moyenne arithmétique (Arith) et la pondération par la distance inverse (IDW). Les résultats sont présentés dans le Tableau III.4.

III.4.2.1 Comparaison entre proximité spatiale (PS) et similarité physique (SP)

- **Proximité spatiale (PS)** : Les valeurs de NSE varient entre 0.58 et 0.75, avec une légère amélioration lors de la phase de validation. La méthode de moyenne arithmétique (Arith) donne de meilleurs résultats que la pondération par la distance inverse (IDW).
- **Similarité physique (SP)** : Les valeurs de NSE sont légèrement supérieures à celles obtenues par la proximité spatiale, avec un NSE de 0.76 lors de la phase de validation. La moyenne arithmétique (Arith) montre également de meilleures performances que la méthode IDW.

III.4.2.2 Comparaison entre les techniques de moyenne

- **Moyenne arithmétique (Arith)** : Cette technique donne des résultats plus fiables et plus cohérents que la pondération par la distance inverse (IDW), quelle que soit la méthode de similarité utilisée.
- **Pondération par la distance inverse (IDW)** : Bien que cette méthode prenne en compte la distance entre les bassins, elle ne montre pas de meilleures performances que la moyenne arithmétique.

III.4.3 Régionalisation par la moyenne des paramètres

La régionalisation par la moyenne des paramètres a également été réalisée en utilisant les deux techniques de calcul : la moyenne arithmétique (Arith) et la pondération par la distance inverse (IDW). Les résultats sont présentés dans le Tableau III.5.

III.4.3.1 Comparaison entre proximité spatiale (PS) et similarité physique (SP)

- **Proximité spatiale (PS)** : Les valeurs de NSE varient entre 0.58 et 0.75, avec des performances légèrement meilleures lors de la phase de validation. La moyenne arithmétique (Arith) donne des résultats comparables à la méthode IDW.
- **Similarité physique (SP)** : Les valeurs de NSE sont légèrement inférieures à celles obtenues par la proximité spatiale, avec un NSE de 0.66 lors de la phase de validation. Cependant, la moyenne arithmétique (Arith) montre des performances supérieures à la méthode IDW.

III.4.3.2 Comparaison entre les techniques de moyenne

- **Moyenne arithmétique (Arith)** : Cette technique donne des résultats plus fiables que la pondération par la distance inverse (IDW), en particulier pour la méthode de similarité physique.
- **Pondération par la distance inverse (IDW)** : Cette méthode ne montre pas de meilleures performances que la moyenne arithmétique, malgré la prise en compte de la distance entre les bassins.

III.4.4 Comparaison avec d'autres études

Les résultats de cette étude sont en accord avec ceux rapportés dans d'autres travaux de recherche sur la régionalisation des débits. Par exemple :

- **Merz & Blöschl (2004)** : Leurs travaux ont montré que la proximité spatiale est une méthode efficace pour la régionalisation des débits, en particulier dans les régions où les bassins versants présentent des caractéristiques hydrologiques similaires.
- **Oudin et al. (2008)** : Dans leur étude sur 913 bassins versants en France, ils ont constaté que la proximité spatiale (PS) offre la solution de régionalisation la plus efficace, tandis que l'approche par régression est la moins performante. La similarité physique (SP) se situe entre les deux.
- **Parajka et al. (2013)** : En se basant sur 34 études menées sur 3874 bassins versants, ils ont conclu que les méthodes de proximité spatiale (PS) et de similarité physique (SP) sont généralement plus performantes que la méthode de régression.

III.4.5 Récapitulation

Les résultats de cette étude confirment que la proximité spatiale (PS) est une méthode efficace pour la régionalisation des débits, en particulier dans la région du haut et moyen Cheliff. La similarité physique (SP) montre également des performances satisfaisantes, bien que légèrement inférieures à celles de la proximité spatiale. La moyenne arithmétique (Arith) s'est avérée plus fiable que la pondération par la distance inverse (IDW), quelle que soit la méthode de similarité utilisée.

Ces résultats sont en accord avec les conclusions d'autres études, ce qui renforce la validité des méthodes employées dans cette recherche. Cependant, il est important de noter que la sous-estimation des débits de pointe par le modèle HEC-HMS nécessite une attention particulière dans les travaux futurs, notamment en ce qui concerne l'optimisation des paramètres liés aux pertes par interception et au lag time.

III.5 Conclusion

Cette étude a été menée dans le but de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau dans la région du haut et moyen Cheliff, en particulier pour les sous-bassins non jaugés où les données hydrologiques sont limitées. La régionalisation des débits, qui consiste à transférer des informations hydrologiques des bassins jaugés vers les bassins non jaugés, a été réalisée à l'aide du modèle hydrologique distribué à base physique HEC-HMS. Les résultats obtenus permettent de tirer des conclusions importantes sur l'efficacité des méthodes de régionalisation employées.

L'objectif principal de cette étude était de développer des stratégies appropriées pour la gestion des ressources en eau dans les sous-bassins non jaugés du bassin du Cheliff. En l'absence de données hydrométriques directes, la régionalisation des paramètres hydrologiques et la prédiction des débits sont devenues essentielles pour une planification efficace des ressources en eau. Cette étude s'est concentrée sur la région du haut et moyen Cheliff, couvrant la période de 2007 à 2012, et a utilisé le modèle HEC-HMS pour simuler les processus pluie-débit.

Deux méthodes principales de régionalisation ont été utilisées pour estimer les débits dans le sous-bassin non jaugé de l'Oued Tikzal :

Régionalisation par proximité spatiale (PS) : Cette méthode repose sur l'hypothèse que les bassins géographiquement proches ont des comportements hydrologiques similaires. Les bassins donneurs ont été sélectionnés en fonction de leur distance euclidienne par rapport au bassin cible.

Régionalisation par similarité physique (SP) : Cette méthode prend en compte les caractéristiques physiques des bassins (topographie, géologie, type de sol, etc.) pour identifier les bassins les plus similaires au bassin cible.

Deux techniques de calcul ont été appliquées pour chaque méthode : la moyenne arithmétique (Arith) et la pondération par la distance inverse (IDW).

Les résultats de cette étude montrent que la méthode de régionalisation par proximité spatiale (PS) a donné des résultats plus proches des observations que la méthode de similarité physique (SP). Cela se reflète dans les valeurs des critères de performance utilisés pour évaluer les débits régionalisés :

Coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) : Les valeurs de NSE ont dépassé 0.75 pour la méthode de proximité spatiale, indiquant une bonne adéquation entre les débits observés et régionalisés.

Coefficient de détermination (R^2) : Les valeurs de R^2 ont également dépassé **0.75**, confirmant que le modèle explique une grande partie de la variance des débits observés.

Erreur quadratique moyenne (RMSE) : Les faibles valeurs de RMSE (jusqu'à **0.16**) indiquent une erreur minimale entre les débits observés et régionalisés.

La comparaison entre les méthodes de régionalisation résume que

La proximité spatiale (PS) a montré des performances supérieures à celles de la similarité physique (SP), en particulier lors de la phase de validation. Les valeurs de NSE et R^2 étaient légèrement plus élevées, et les erreurs (RMSE) étaient plus faibles.

La similarité physique (SP) : Bien que cette méthode ait également donné des résultats satisfaisants, ses performances étaient légèrement inférieures à celles de la proximité spatiale. Cela peut s'expliquer par la complexité de la prise en compte des caractéristiques physiques des bassins, qui ne sont pas toujours suffisantes pour prédire les comportements hydrologiques.

La comparaison entre les techniques de calcul a donné

La moyenne arithmétique (Arith) a donné des résultats plus fiables et plus cohérents que la pondération par la distance inverse (IDW), quelle que soit la méthode de similarité utilisée.

La pondération par la distance inverse (IDW) : Bien que cette méthode prenne en compte la distance entre les bassins, elle n'a pas montré de meilleures performances que la moyenne arithmétique.

Les résultats de cette étude ont des implications importantes pour la gestion des ressources en eau dans la région du haut et moyen Cheliff, en particulier pour les sous-bassins non jaugés. La méthode de régionalisation par proximité spatiale s'est avérée être une approche efficace pour estimer les débits dans ces bassins, ce qui peut aider à améliorer la planification et la gestion des ressources en eau dans la région.

De plus, l'utilisation de la moyenne arithmétique pour la régionalisation des débits et des paramètres hydrologiques a montré des résultats plus fiables que la pondération par la distance inverse. Cela suggère que des techniques de calcul plus simples peuvent être tout aussi efficaces, voire plus, que des méthodes plus complexes.

En conclusion, cette étude a démontré que la régionalisation par proximité spatiale est une méthode efficace pour estimer les débits dans les sous-bassins non jaugés du haut et moyen Cheliff. Les résultats obtenus, en particulier les valeurs élevées de NSE et R^2 , ainsi que les faibles erreurs (RMSE), confirment la robustesse de cette approche. La moyenne arithmétique s'est également avérée être une technique de calcul fiable pour la régionalisation des débits et des paramètres hydrologiques.

Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des processus de régionalisation des débits et offrent des perspectives intéressantes pour la gestion des ressources en eau dans les

régions où les données hydrologiques sont limitées. Les méthodes développées dans cette étude peuvent être appliquées à d'autres bassins versants, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources en eau à l'échelle régionale et nationale.

Chapitre IV

Modélisation et comparaison

des modèles hydrologiques

HEC-HMS et SWAT

IV.1 Introduction

La modélisation hydrologique joue un rôle crucial dans la compréhension et la gestion des ressources en eau, en particulier dans les régions où les conditions climatiques et les activités humaines influencent fortement le cycle hydrologique. Ce chapitre se concentre sur la modélisation pluie-débit à l'aide de deux modèles hydrologiques largement utilisés, HEC-HMS et SWAT, dans le contexte du sous-bassin de l'Oued Tikzal, situé dans la région du haut et moyen Cheliff en Algérie. L'objectif principal est de comparer les performances de ces deux modèles en termes de précision, de sensibilité des paramètres et de capacité à reproduire les écoulements mensuels.

Le choix de ces modèles repose sur leur popularité dans la communauté scientifique et leur capacité à simuler les processus hydrologiques dans des bassins versants de différentes tailles et caractéristiques. HEC-HMS, développé par l'US Army Corps of Engineers, est un modèle distribué à base physique conçu pour simuler les processus pluie-débit dans des bassins versants dendritiques. De son côté, SWAT (Soil and Water Assessment Tool), développé par le ministère de l'Agriculture des États-Unis, est un modèle également distribué et à base physique, mais il est particulièrement adapté pour évaluer les impacts des pratiques de gestion des terres sur les ressources en eau, les sédiments et les produits chimiques agricoles.

De nombreuses études comparatives ont été menées afin de déterminer quel modèle hydrologique se distingue réellement, en particulier entre HEC-HMS et SWAT. Par exemple, **Ismail et al. (2020)** ont utilisé les deux modèles pour évaluer les effets du changement climatique sur l'écoulement dans le bassin de la Bernam, en Malaisie, en s'appuyant sur des indicateurs de performance tels que R^2 , NSE, PBIAS et RSR. Leurs résultats ont montré que le modèle HEC-HMS surpassait le modèle SWAT. De manière similaire, **Doliso et al. (2021)** ont analysé les performances de HEC-HMS et SWAT dans les bassins versants de Bilate et Gidabo en Éthiopie. Ils ont constaté que HEC-HMS était particulièrement sensible à certains paramètres, tels que le taux de perte constant (CR) et le temps de retard (lag time), tandis que les paramètres les plus sensibles pour SWAT étaient le facteur de l'écoulement de base (ALPHA_BF) et le curve number (CN). Leur analyse comparative a révélé que HEC-HMS fournissait de meilleurs résultats pour la simulation des débits dans les deux bassins. Dans une autre étude, **Fanta et al. (2022)** ont évalué les performances de SWAT et HEC-HMS dans la simulation des débits dans le bassin versant de Toba en Éthiopie, en utilisant des données journalières et les mêmes critères de performance : R^2 , NSE, PBIAS et RMSE. Leurs résultats ont également indiqué que HEC-HMS surpassait SWAT. Dans le même esprit, **Sempewo et al. (2023)** ont examiné les deux modèles

sur deux bassins tropicaux en Ouganda, l'un en plaine et l'autre en région montagneuse. Leurs résultats ont révélé que HEC-HMS offrait de meilleures performances que SWAT. Par ailleurs, **Khoi (2016)** a mené une étude de simulation des débits dans le bassin de la rivière Srepok au Vietnam, où SWAT a produit de meilleurs résultats que HEC-HMS. **Sanjay Shekar et al. (2021)** ont étudié l'hydrologie du bassin versant tropical humide de Hemavathi en Inde, en utilisant des séries de débits journaliers. Pour le modèle SWAT, les paramètres les plus sensibles étaient la capacité de rétention en eau disponible dans le sol (SOL_AWC), le curve number (CN), et le facteur de compensation de l'évaporation du sol (ESCO). En revanche, pour HEC-HMS, les paramètres sensibles étaient l'abstraction initiale et le temps de retard. Les résultats de simulation des débits issus du modèle SWAT se sont révélés plus satisfaisants que ceux du HEC-HMS, comme l'ont indiqué les valeurs de R^2 et de NSE. Enfin, **Aqnouy et al. (2023)** ont utilisé les modèles SWAT, HEC-HMS et ATHYS pour une modélisation continue dans le bassin versant de l'oued Laou, au nord du Maroc, en évaluant les performances selon les critères R^2 , NSE, RSR et PBIAS. Leurs résultats ont montré que SWAT surpassait HEC-HMS, qui lui-même offrait de meilleures performances que le modèle ATHYS.

Dans ce chapitre, nous détaillons la configuration, les structures et les composants des deux modèles, ainsi que les méthodes de calibration et de validation utilisées pour évaluer leurs performances. Nous analysons également la sensibilité des paramètres de chaque modèle et comparons leurs résultats en termes de précision et de fiabilité. Enfin, nous discutons des implications de ces résultats pour la gestion des ressources en eau dans la région étudiée. La période de modélisation s'étend de janvier 2003 à décembre 2012, avec une phase de calibration de 2003 à 2007 et une phase de validation de 2008 à 2012. Les critères de performance utilisés pour évaluer les modèles incluent l'efficacité Nash-Sutcliffe (NSE), le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces indicateurs permettent de quantifier la capacité des modèles à reproduire les débits observés et d'identifier les éventuelles sources d'incertitude. Ce chapitre vise à fournir une analyse approfondie des performances des modèles HEC-HMS et SWAT dans le contexte spécifique du sous-bassin de l'Oued Tikzal, tout en offrant des perspectives pour leur utilisation dans d'autres régions aux caractéristiques hydrologiques similaires.

IV.2 Description des modèles hydrologiques utilisés

Selon la classification présentée dans le chapitre de synthèse bibliographique, les deux modèles hydrologiques HEC-HMS et SWAT appartiennent à la même famille de modèles distribués à base physique. Ces modèles sont conçus pour simuler les processus hydrologiques,

Chapitre IV Modélisation et comparaison des modèles hydrologiques HEC-HMS et SWAT
en particulier les relations pluie-débit, en tenant compte des caractéristiques physiques des bassins versants.

IV.2.1 Description du modèle hydrologique HEC-HMS

Le modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) a été développé par l'USACE (United States Army Corps of Engineers). Il fait partie des modèles distribués à base physique, conçus pour simuler les processus pluie-débit dans des systèmes de bassins versants dendritiques. L'objectif principal de HEC-HMS est de reproduire les phénomènes hydrologiques liés aux précipitations et aux écoulements, afin de résoudre une variété de problèmes hydrologiques dans différentes régions géographiques. Le modèle représente physiquement un bassin versant à travers un réseau dendritique qui relie les éléments hydrologiques, tels que les sous-bassins, les tronçons, les jonctions, les réservoirs, les dérivations, les sources et les puits. Les calculs hydrologiques commencent par les éléments situés en amont et progressent vers l'aval (**USACE, 2021**).

Le modèle HEC-HMS a été largement appliqué à travers le monde pour des études hydrologiques variées. Par exemple, **Xin et al. (2019)** ont utilisé HEC-HMS pour simuler les crues dans quatorze petits bassins versants typiques des zones montagneuses de la Chine. De même, **Namara et al. (2020)** ont appliqué ce modèle pour étudier les relations pluie-ruissellement dans le sous-bassin versant d'Awash Bello, situé dans le bassin supérieur d'Awash en Éthiopie.

En Algérie, le modèle HEC-HMS a également été utilisé dans plusieurs études hydrologiques. **Laouacheria & Mansouri (2015)** ont simulé le ruissellement dans un petit bassin versant urbain du nord-est de l'Algérie. **Mokhtari et al. (2016)** ont modélisé les débits de pluie dans le bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib, situé dans le nord de l'Algérie. **Skhakhfa & Ouerdachi (2016)** ont estimé les crues de courte durée dans le bassin versant de l'oued Ressoul, également situé dans le nord-est de l'Algérie. **Derdour et al. (2018)** ont appliqué HEC-HMS pour étudier les relations pluie-ruissellement dans une région semi-aride, en prenant comme étude de cas le bassin versant d'Ain Sefra, dans les montagnes des Ksour au sud-ouest de l'Algérie. Plus récemment, **Allali et al. (2022)** ont utilisé HEC-HMS pour simuler les débits de pointe et le ruissellement de surface dans le bassin de Ouahrane, tandis que **Haddad (2022)** a appliqué le modèle au bassin versant de l'Oued El Hachem pour modéliser les événements extrêmes de pluie-débit.

Le modèle HEC-HMS utilise la méthode de l'hydrogramme unitaire du Service de conservation des sols (SCS) pour établir un hydrogramme unitaire curvilinéaire. Cette méthode permet de déterminer la proportion de ruissellement unitaire qui se produit avant le débit de pointe. Les équations suivantes sont utilisées pour calculer le débit de pointe U_p (Équation IV.1) et le temps de pic T_p (Équation IV.2) :

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (\text{IV.1})$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (\text{IV.2})$$

Où :

- U_p est le débit de pointe de l'hydrogramme unitaire ;
- A est la superficie du bassin versant ;
- $C = 2.08$ est une constante de conversion ;
- T_p est le temps de pic ;
- Δt est la durée des précipitations excédentaires ;
- t_{lag} est le décalage du bassin, correspondant à 60 % du temps de concentration T_c .

Le modèle prend également en compte la diminution exponentielle du débit dans les canaux après un événement pluvieux, en utilisant la méthode du débit de base de récession. Cette méthode est applicable à la fois pour les simulations par événement et pour les simulations continues (USACE, 2021).

IV.2.1.1 Données d'entrée du modèle HEC-HMS

Les données d'entrée nécessaires pour construire le modèle HEC-HMS et lancer la simulation des débits de sortie se résument en quatre catégories principales : la création du modèle du bassin versant, la détermination du modèle météorologique, la spécification des paramètres de contrôle de la durée de modélisation, et l'introduction des séries chronologiques. Ces éléments sont essentiels pour assurer une simulation précise et fiable des processus hydrologiques.

A. Modèle de bassin

Le modèle de bassin est une représentation physique du bassin versant, qui inclut les sous-bassins, les tronçons, les jonctions, les réservoirs, les dérivations, les sources et les puits. Pour simuler les débits à la sortie du modèle, plusieurs méthodes sont disponibles, réparties en trois catégories principales : les méthodes de perte (infiltration), les méthodes de transformation (ruissellement de surface) et les méthodes de débit de base (USACE, 2021).

A.1 Méthodes pour simuler les pertes causées par l'infiltration (Loss method)

Conceptuellement, un sous-bassin est défini par les processus d'infiltration, de ruissellement de surface et d'écoulement souterrain qui interagissent. Les calculs d'infiltration sont réalisés à l'aide de méthodes de perte intégrées dans le sous-bassin. Douze approches de perte sont proposées, certaines étant adaptées à la simulation événementielle (par exemple, pour des crues spécifiques), tandis que d'autres sont plus adaptées à la simulation continue (par exemple, pour des périodes longues). Chaque méthode conserve la masse, assurant ainsi la cohérence des résultats. Le tableau IV.1 présente les méthodes de perte et leur adéquation pour les simulations événementielles ou continues.

Tableau IV.1 Sélection d'une méthode de perte pour une simulation événementielle ou continue

Méthode de perte	Modélisation événementielle	Modélisation continue
Deficit and constant		Oui
Exponential	Oui	
Green and Ampt	Oui	
Gridded Deficit and constant		Oui
Gridded Green and Ampt	Oui	
Gridded SCS curve number	Oui	
Gridded soil moisture accounting		Oui
Initial and constant	Oui	
Layered Green and Ampt		Oui
SCS curve number	Oui	
Smith Parlange	Oui	
Soil moisture accounting		Oui

A.2 Techniques pour convertir l'excès de pluie en débits de surface (Transform method)

Si un sous-bassin représente conceptuellement l'infiltration, le ruissellement de surface et les processus souterrains, les calculs réels du ruissellement de surface sont réalisés à l'aide de méthodes de transformation. Huit méthodes de transformation sont disponibles, chacune adaptée à des conditions spécifiques :

- Clark Unit Hydrograph Transform
- Kinematic Wave Transform
- ModClark Transform
- SCS Unit Hydrograph Transform
- Snyder Unit Hydrograph Transform
- User-Specified S-Graph Transform
- User-Specified Unit Hydrograph Transform
- 2D Diffusion Wave Transform

A.3 Méthodes pour représenter les contributions du débit de base (Baseflow method)

Les contributions du débit de base au débit sortant du sous-bassin sont représentées par cinq méthodes différentes. Ces méthodes permettent de simuler les écoulements souterrains et leur impact sur le débit total :

- Bounded Recession Baseflow
- Constant Monthly Baseflow
- Linear Reservoir Baseflow
- Nonlinear Boussinesq Baseflow
- Recession Baseflow

B. Modèle météorologique

Les modèles météorologiques jouent un rôle essentiel dans la simulation hydrologique, car ils fournissent les conditions limites nécessaires pour les sous-bassins. Les éléments suivants sont inclus dans le modèle météorologique (USACE, 2021) :

- **Rayonnement par ondes courtes (Shortwave)** : Correspond au rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre. C'est la principale source d'énergie, atténuée par les nuages et nulle la nuit. Six méthodes sont disponibles pour le calcul du rayonnement par ondes courtes :

- Bristow Campbell
- FAO 56
- Gridded Hargreaves
- Gridded Shortwave
- Hargreaves
- Specified Pyranograph
- **Rayonnement par ondes longues (Longwave)** : Correspond à l'énergie émise par tous les corps. Le rayonnement net à ondes longues peut provenir de l'atmosphère vers la surface terrestre ou inversement. Quatre méthodes sont disponibles :
 - FAO 56
 - Gridded Longwave
 - Satterlund
 - Specified Pyrgeograph
- **Précipitations** : Les précipitations sont utilisées pour évaluer la quantité d'eau tombant à la surface du sol. Huit types de précipitations sont disponibles :
 - Frequency Storm
 - Gage Weights
 - Gridded Precipitation
 - HMR 52 Storm
 - Hypothetical Storm
 - Inverse Distance
 - Specified Hyetograph
 - Standard Project Storm
- **Évapotranspiration** : Le calcul de l'évapotranspiration potentielle est essentiel pour les simulations de longue durée. Onze techniques d'évapotranspiration sont disponibles :
 - Annual Evapotranspiration
 - Gridded Hamon
 - Gridded Hargreaves
 - Gridded Penman Monteith
 - Gridded Priestley Taylor
 - Hamon
 - Hargreaves
 - Monthly Average
 - Penman Monteith

- Priestley Taylor
- Specified Evapotranspiration
- **Fonte des neiges (Snowmelt)** : Cette technique permet de déterminer si les précipitations sont de la pluie ou de la neige, en fonction de la température de l'air. Deux méthodes sont disponibles :
 - Gridded Temperature Index
 - Temperature Index

C. Spécifications de contrôle

Les spécifications de contrôle sont essentielles pour définir les paramètres temporels de la simulation, tels que la date et l'heure de début, la date et l'heure de fin, ainsi que l'intervalle de temps utilisé. Bien qu'elles ne contiennent pas une grande quantité de données, elles sont cruciales pour le bon déroulement de la simulation.

D. Données de séries chronologiques

HEC-HMS permet l'introduction de données de séries chronologiques nécessaires pour la simulation. Ces données incluent les précipitations, les débits observés, la température, l'humidité, et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les séries chronologiques de précipitations sont utilisées pour calculer les précipitations moyennes à l'échelle du bassin, tandis que les débits observés sont indispensables pour la calibration et l'optimisation des paramètres du modèle (USACE, 2021).

IV.2.1.2 Lancement de la simulation

Le lancement de la simulation dans le modèle HEC-HMS repose sur trois composants principaux : le modèle de bassin, le modèle météorologique et les spécifications de contrôle. Ces éléments sont combinés pour créer une simulation hydrologique. Les informations sur l'état du bassin, telles que les niveaux d'eau, les débits et les conditions initiales, peuvent être enregistrées à un moment donné. Cela permet de lancer une simulation à partir d'un état précédemment enregistré, ce qui est particulièrement utile pour des simulations continues ou pour reprendre une simulation interrompue. Une fois la simulation terminée, un rapport détaillé peut être généré, incluant des informations sur les précipitations, le débit de pointe, le volume total d'eau, ainsi que d'autres variables hydrologiques. Ces résultats peuvent être visualisés sous forme de graphiques et de tableaux, offrant une analyse complète des processus hydrologiques simulés (USACE, 2021).

IV.2.1.3 Visualisation des résultats

Les résultats de la simulation peuvent être consultés une fois que celle-ci a été exécutée de manière adéquate. Pour qu'une simulation soit réussie, les trois composants suivants doivent être correctement configurés : le modèle de bassin, le modèle météorologique et les spécifications de contrôle. Ces éléments sont essentiels pour effectuer les calculs hydrologiques et générer des résultats précis.

Les résultats de la simulation peuvent être affichés sous trois formats principaux :

1. **Graphiques** : Les graphiques permettent de visualiser les tendances et les variations des variables hydrologiques, telles que les débits, les précipitations et les volumes d'eau, au fil du temps.
2. **Tableaux synthétiques** : Ces tableaux résument les résultats clés de la simulation, tels que les débits de pointe, les volumes totaux et les moyennes, offrant une vue d'ensemble des performances du modèle.
3. **Tableaux de séries chronologiques** : Ces tableaux présentent les données hydrologiques sous forme de séries temporelles, permettant une analyse détaillée des variations des débits et autres variables au cours de la période simulée.

Les différentes méthodes de modélisation hydrologique utilisées dans la création du modèle HEC-HMS pour simuler les séries d'écoulement sont résumées dans la Figure IV.1. Cette figure illustre la structure et les étapes du modèle, mettant en évidence les interactions entre les différents composants et les méthodes employées pour simuler les processus hydrologiques.

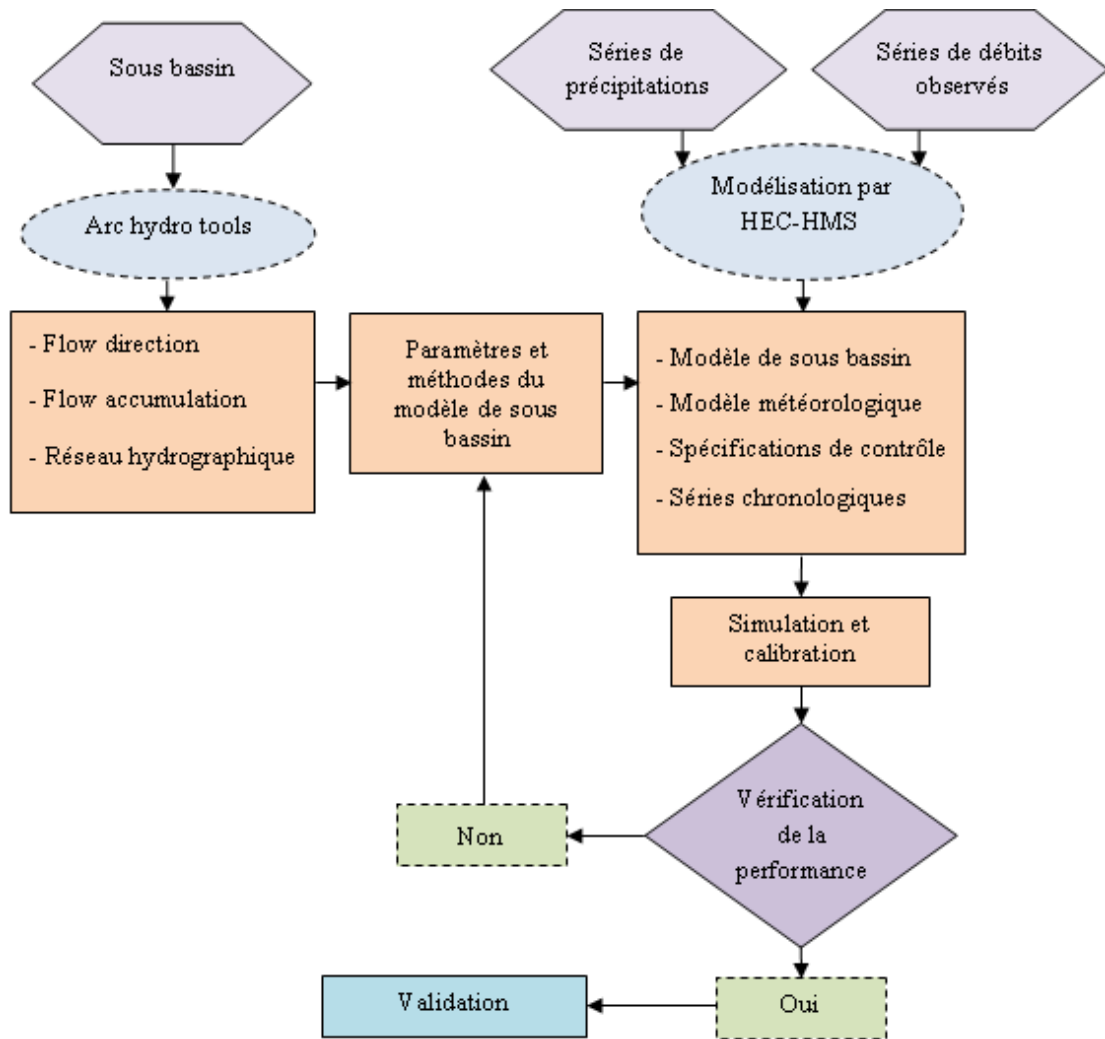


Figure IV.1 Structure du modèle hydrologique HEC-HMS (Makhloufi et al., 2023)

IV.2.1.4 Calibration du modèle HEC-HMS

La calibration du modèle HEC-HMS est une étape cruciale pour améliorer la précision des simulations hydrologiques. Elle permet d'ajuster les paramètres du modèle afin que les débits simulés correspondent au mieux aux débits observés. Cette calibration peut être réalisée de manière automatisée grâce à des essais d'optimisation, qui permettent d'explorer un large éventail de combinaisons de paramètres pour identifier celles qui minimisent les écarts entre les résultats simulés et observés (USACE, 2021).

Plusieurs approches d'optimisation peuvent être utilisées pour calibrer le modèle HEC-HMS :

1. **Réduction d'une fonction objective** : L'objectif est de minimiser une fonction qui mesure l'écart entre les débits simulés et observés. Cette fonction diminue à mesure que le modèle s'ajuste aux données réelles.
2. **Optimisation d'une fonction objective** : À l'inverse, certaines fonctions objectives sont conçues pour augmenter lorsque le modèle correspond mieux aux débits observés. Cela permet de maximiser la précision des simulations.
3. **Maximisation de variables spécifiques** : La calibration peut également viser à maximiser des variables hydrologiques spécifiques, telles que le débit de pointe simulé, le volume total de débit ou l'élévation du bassin du réservoir.
4. **Optimisation stochastique** : Cette approche permet de générer des ensembles de paramètres probables en explorant de manière aléatoire l'espace des paramètres. Elle est particulièrement utile pour évaluer l'incertitude des résultats et identifier les combinaisons de paramètres les plus plausibles.

Grâce à ces méthodes d'optimisation, il est possible d'estimer automatiquement la plupart des paramètres des méthodes intégrées dans les éléments de sous-bassin et de tronçon. Cela inclut les paramètres liés à l'infiltration, au ruissellement de surface, au débit de base et à d'autres processus hydrologiques. L'optimisation automatisée permet ainsi d'améliorer l'efficacité et la précision de la calibration, tout en réduisant le temps nécessaire pour ajuster manuellement les paramètres.

IV.2.2 Description du modèle hydrologique SWAT

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été développé par le ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA). Il est conçu pour prédire les effets des pratiques de gestion des terres sur les ressources en eau, les sédiments et les rendements en produits chimiques agricoles dans des bassins versants complexes et de grande taille. Le modèle SWAT est basé sur une approche physique et est capable de simuler des processus hydrologiques sur de longues périodes, en tenant compte de la variabilité des sols, de l'utilisation des terres et des conditions de gestion. Il utilise des données d'entrée facilement accessibles et permet aux utilisateurs d'analyser les impacts à long terme des changements climatiques et des pratiques agricoles sur les systèmes hydrologiques (Arnold et al., 2013 ; Zaibak & Meddi, 2022). Une interface graphique, ArcSWAT, est disponible en tant qu'extension pour ArcGIS, facilitant ainsi la préparation des données et la configuration du modèle (Arnold et al., 2013).

Le modèle SWAT a été largement appliqué à travers le monde pour des études portant sur l'utilisation des terres, la gestion des bassins versants, la modélisation des activités agricoles et l'impact du changement climatique sur les systèmes hydrologiques à différentes échelles (Meaurio et al., 2015 ; Srinivasan et al., 2010).

En Algérie, le modèle SWAT a également été utilisé dans plusieurs études hydrologiques. Par exemple, Zaibak & Meddi (2022) ont appliqué SWAT à cinq bassins d'alimentation de barrage dans le bassin du Cheliff, en simulant les écoulements à l'échelle mensuelle. Hachemaoui et al. (2022) ont évalué l'impact hydrologique des changements d'occupation des sols dans un bassin semi-aride, en utilisant SWAT pour le bassin de l'Oued Saïda dans l'ouest de l'Algérie. De même, Salhi et al. (2022) ont combiné les modèles SWAT et RUSLE pour évaluer l'érosion des sols dans le bassin versant du nord de l'Algérie.

Pour simuler le cycle hydrologique, le modèle SWAT utilise l'équation de bilan hydrique suivante (Équation IV.3) (Fadil et al., 2011) :

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - w_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (\text{IV.3})$$

Où :

- t est le temps en jours ;
- SW_t est la teneur en eau finale du sol (mm) ;
- SW₀ est la teneur en eau initiale du sol (mm) ;
- R_{day} est la quantité de précipitations le jour *ii* (mm) ;
- Q_{surf} est la quantité de ruissellement de surface le jour *ii* (mm) ;
- E_a est la quantité d'évapotranspiration le jour *ii* (mm) ;
- w_{seep} est la quantité d'eau entrant dans la zone vadose depuis le profil du sol le jour *i* (mm) ;
- Q_{gw} est la quantité de flux de retour (débit de base) le jour *i* (mm).

IV.2.2.1 Données d'entrée du modèle SWAT

Pour générer un jeu de données compatible avec SWAT, il est nécessaire que l'interface puisse accéder à des données raster (GRID) et vectorielles compatibles avec ArcGIS (Shapefiles et Feature classes), ainsi qu'à des fichiers de base de données (Database files) contenant des informations sur le bassin versant. Avant d'exécuter l'interface, les jeux de données spatiaux et

les fichiers de base de données requis doivent être préparés. Les principales données d'entrée incluent :

1. **Modèle numérique d'élévation (DEM)** : Le DEM, généralement au format ESRI GRID, est utilisé pour définir la topographie du bassin versant. Il est souvent téléchargé à partir du site SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) avec une résolution de 100 m.
2. **Couverture/utilisation du sol** : Les données sur l'occupation du sol, au format ESRI GRID, Shapefile ou Feature class, sont nécessaires pour identifier les différents types de végétation et d'utilisation des terres. Les tables USGS (Lookup tables) dans la base de données SWAT2012.mdb permettent de relier les types de couverture du sol aux paramètres du modèle.
3. **Types de sol** : Les données sur les types de sol, également au format ESRI GRID, Shapefile ou Feature class, sont essentielles pour caractériser les propriétés hydrologiques du bassin. Une carte des sols provenant de la carte numérique des sols du monde (DSMW) peut être utilisée.
4. **Données météorologiques** : Les données météorologiques, telles que les précipitations, la température et l'évapotranspiration, sont nécessaires pour simuler les processus hydrologiques. En Algérie, les données de précipitations mesurées par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) sont souvent utilisées. La localisation des pluviomètres doit être précisée à l'aide d'une table d'emplacement.

La Figure IV.2 illustre la structure et la démarche suivie pour l'élaboration du modèle SWAT, en mettant en évidence les étapes de préparation des données et de configuration du modèle.

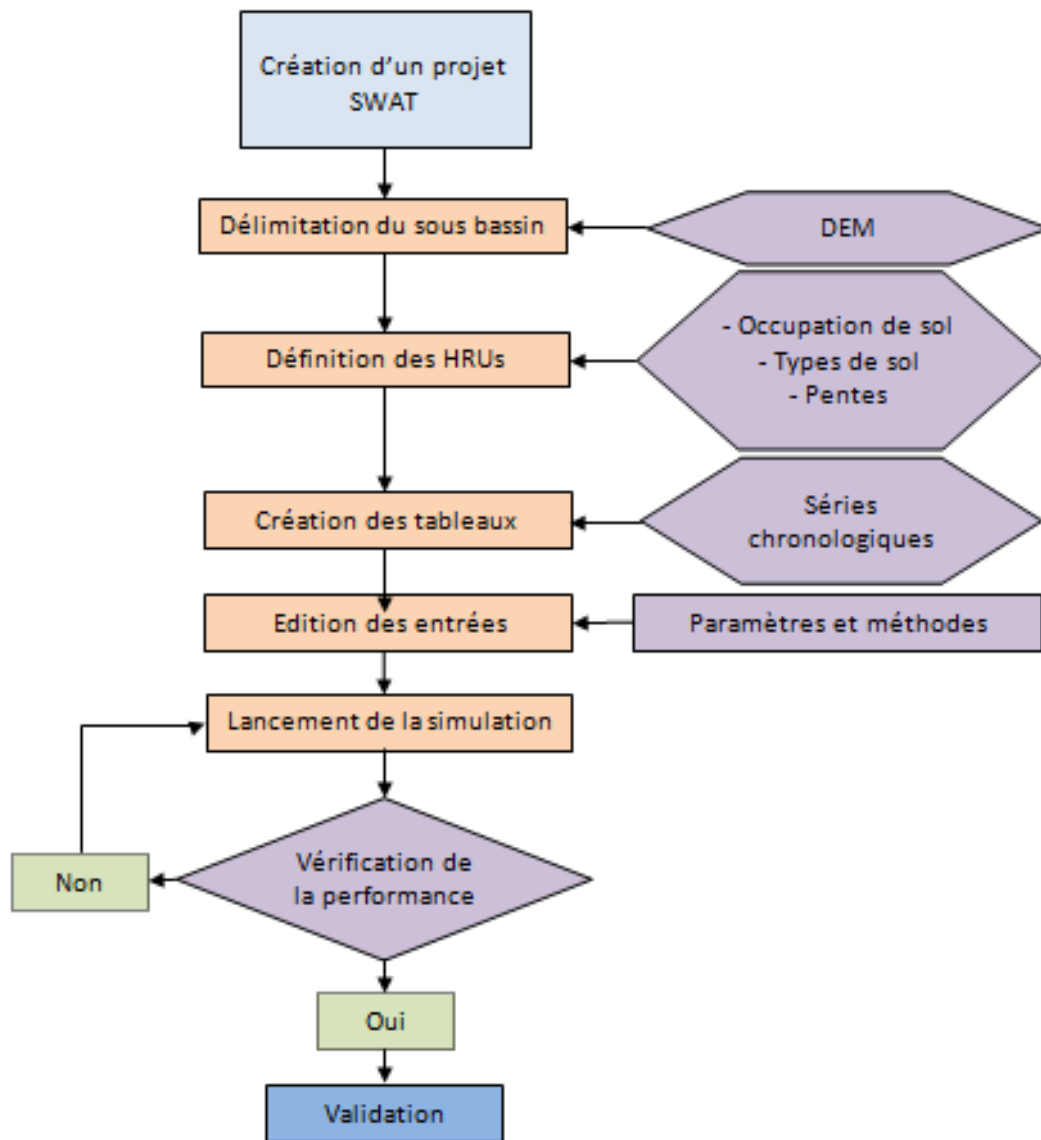


Figure IV.2 Structure du modèle SWAT

IV.2.2.2 Calibration du modèle SWAT

La calibration du modèle SWAT est facilitée par l'utilisation de SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures), une interface unique qui regroupe l'ensemble des procédures de calibration et d'analyse des incertitudes. Parmi les cinq méthodes proposées par SWAT-CUP, la méthode SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) a été adoptée dans cette étude. SUFI-2 offre une grande flexibilité dans la sélection des paramètres, des intervalles de variation et de l'échelle de temps, ce qui en fait un outil puissant pour la calibration et l'analyse des incertitudes (Abbaspour et al., 2007 ; Taleb et al., 2019).

Dans l'approche SUFI-2, les paramètres sensibles sont identifiés à l'aide des indicateurs t-stat et P-value. Ces indicateurs permettent de déterminer l'importance relative des paramètres

dans la calibration du modèle. Un paramètre est considéré comme sensible si la valeur absolue du t-stat est élevée et que la P-value est proche de zéro. Cette méthode permet de réduire l'incertitude des paramètres et d'améliorer la précision des simulations ([Abbaspour et al., 2007](#)).

IV.3 Evaluation de la performance des modèles HEC-HMS et SWAT

Pour le modèle HEC-HMS, les incertitudes peuvent être quantifiées et évaluées numériquement à l'aide de l'analyse d'incertitude. Cette analyse consiste à attribuer des distributions de probabilité aux paramètres sélectionnés, puis à effectuer une simulation de Monte Carlo pour générer des résultats probabilistes. Ces résultats incluent des hydrogrammes et des statistiques hydrologiques essentielles, telles que le volume d'eau ou le débit de pointe. Cette approche permet d'estimer l'incertitude des prédictions et d'évaluer la fiabilité des simulations ([USACE, 2021](#)).

Dans le cas du modèle SWAT, l'approche SUFI-2 prend en compte l'incertitude des paramètres en utilisant des plages de valeurs (distributions uniformes). Cette méthode intègre toutes les sources d'incertitude, y compris celles liées aux variables motrices (comme les précipitations), au modèle conceptuel, aux paramètres et aux données mesurées. Les incertitudes des paramètres se propagent dans les variables de sortie du modèle, qui sont représentées par des distributions de probabilité à 95 %. Cette plage de prédiction, appelée 95PPU (95% Prediction Uncertainty), est obtenue grâce à une calibration stochastique. L'objectif est que la majorité des observations se situent dans cette plage de prédiction. Pour améliorer la précision du modèle, des variables supplémentaires peuvent être ajoutées à la fonction objective, ce qui permet de mieux représenter les processus hydrologiques et de réduire les erreurs ([Abbaspour et al., 2007](#)).

Pour évaluer la performance des modèles HEC-HMS et SWAT, trois critères principaux ont été utilisés :

1. **Efficacité Nash-Sutcliffe (NSE)** : Cet indicateur mesure la qualité de la correspondance entre les débits simulés et observés. Une valeur de NSE proche de 1 indique une excellente performance du modèle.
2. **Coefficient de détermination (R^2)** : Ce critère évalue la proportion de la variance des débits observés expliquée par le modèle. Un R^2 élevé indique une bonne adéquation entre les simulations et les observations.
3. **Erreur quadratique moyenne (RMSE)** : Cet indicateur mesure l'écart moyen entre les débits simulés et observés. Une valeur faible de RMSE indique une meilleure précision du modèle.

Ces critères permettent d'évaluer de manière quantitative la performance des modèles hydrologiques et de comparer leur capacité à reproduire les processus hydrologiques observés.

IV.4 Résultats de la modélisation

La période sélectionnée pour la modélisation hydrologique des sous-bassins s'étend de janvier 2003 à décembre 2012. Les modèles ont été calibrés pour la période de janvier 2003 à décembre 2007, tandis que la période de janvier 2008 à décembre 2012 a été utilisée pour la validation. Cette division permet d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les processus hydrologiques sur une période distincte de celle utilisée pour la calibration.

IV.4.1 Résultats de la modélisation par le modèle HEC-HMS

Pour configurer le modèle HEC-HMS, il est nécessaire de définir le bassin versant, y compris sa superficie, ainsi que les éléments hydrologiques tels que les jonctions et les exutoires. Dans cette étude, la méthode «Deficit and constant» a été sélectionnée pour simuler les pertes par infiltration, tandis que la méthode «SCS Unit Hydrograph» a été utilisée pour la transformation de l'excès de pluie en débit de surface. La méthode «Recession» a été employée pour représenter le débit de base. La méthode «Deficit and constant» prend en compte les variations continues de la teneur en eau du sol et est utilisée en combinaison avec les techniques de canopée et de surface. La technique de canopée permet de calculer l'évapotranspiration potentielle, tandis que la technique de surface retient l'eau à la surface du sol.

IV.4.1.1 Analyse de la sensibilité du modèle HEC-HMS

Les paramètres de calibration du modèle HEC-HMS sont présentés dans le Tableau IV.2. La sélection des paramètres les plus sensibles a été effectuée manuellement en faisant varier chaque paramètre individuellement. Si un paramètre est sensible, le sous-bassin réagit positivement à cette variation, ce qui se traduit par une modification du critère de performance, en l'occurrence le coefficient NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency).

Tableau IV.2 Les paramètres à calibrer du modèle HEC-HMS

N°	Paramètre	Méthode	Unité
1	Initial Deficit	Deficit and Constant	Mm
2	Maximum Deficit	Deficit and Constant	Mm
3	Constant rate	Deficit and Constant	mm/hr
4	Lag time	SCS Unit Hydrograph	Min
5	Initial Storage	Simple canopy	%
6	Max Storage	Simple canopy	Mm
7	Initial Storage	Simple surface	%
8	Max Storage	Simple surface	Mm
9	Initial discharge	Recession	m ³ /s
10	Recession Constant	Recession	-
11	Ratio to peak	Recession	-

Les graphiques en pointillés montrent la distribution des valeurs du critère de performance NSE en fonction de la variation des paramètres sensibles. Une large distribution a été observée pour trois paramètres particulièrement sensibles :

- **Lag time** : pour la méthode de transformation (SCS Unit Hydrograph) ;
- **Recession Constant** : pour la méthode du débit de base (Recession) ;
- **Max storage** : pour la méthode de la canopée simple.

Les autres paramètres n'ont pas montré une sensibilité significative, ce qui indique que leur impact sur la performance du modèle est moindre (Figure IV.3). L'analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres les plus influents dans la calibration du modèle HEC-HMS, ce qui est essentiel pour améliorer la précision des simulations hydrologiques. Les paramètres liés au temps de réponse du bassin (Lag time), au débit de base (Recession Constant) et à la capacité de stockage de la canopée (Max storage) se sont révélés être les plus sensibles.

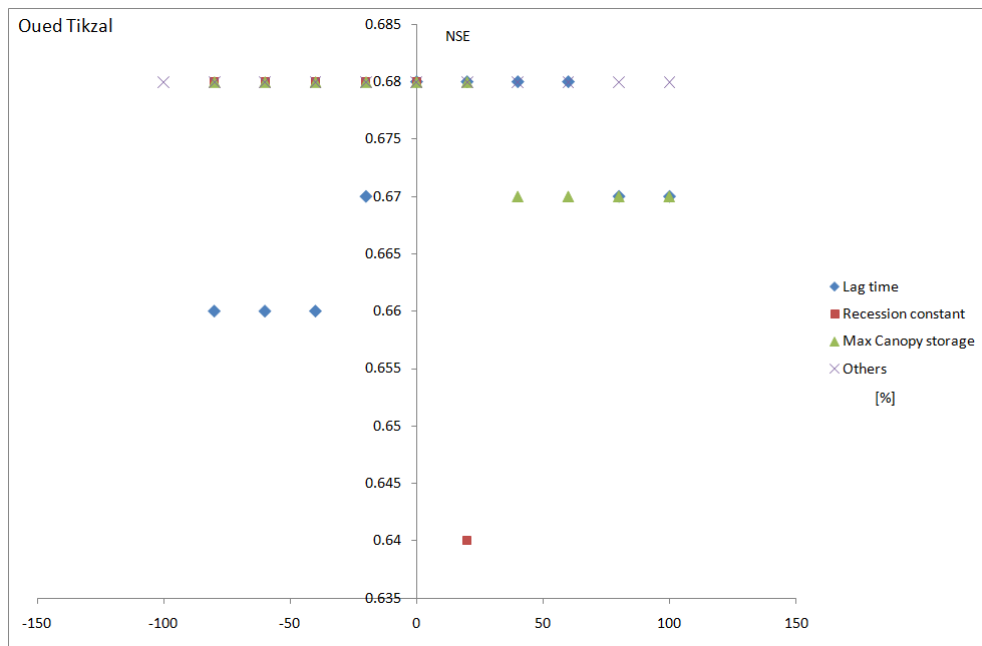


Figure IV.3 Tracé en pointillé des paramètres sensibles du modèle HEC-HMS de l’Oued Tikzal

IV.4.1.2 Calibration et validation du modèle HEC-HMS au pas de temps mensuel

Une optimisation automatique a été réalisée en utilisant la fonction objective simplex, basée sur la statistique Peak-Weighted RMSE (Root Mean Square Error). La période de calibration s'étend de janvier 2003 à décembre 2007, soit cinq ans, tandis que la période de validation couvre janvier 2008 à décembre 2012. Cette division permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les débits observés sur une période indépendante de celle utilisée pour la calibration.

Les valeurs des paramètres optimisés du modèle HEC-HMS pour le bassin de l’Oued Tikzal sont présentées dans le Tableau IV.3. Ces paramètres ont été ajustés pour minimiser les écarts entre les débits simulés et observés.

Tableau IV.3 Valeurs des paramètres calibrés pour le modèle HEC-HMS

N°	Paramètres	Méthode	Oued Tikzal
1	Initial Deficit	Deficit and Constant	0.9
2	Maximum Deficit	Deficit and Constant	1.6
3	Constant rate	Deficit and Constant	3.14
4	Lag time	SCS Unit Hydrograph	1000
5	Initial Storage	Simple canopy	0.4
6	Max Storage	Simple canopy	0.8
7	Initial Storage	Simple surface	0.57
8	Max Storage	Simple surface	1.2
9	Initial discharge	Recession	0.43
10	Recession Constant	Recession	0.7
11	Ratio to peak	Recession	0.5

IV.4.1.3 Evaluation de la performance du modèle HEC-HMS

La performance du modèle HEC-HMS a été évaluée à l'aide de trois critères principaux :

1. **Efficacité Nash-Sutcliffe (NSE)** : Mesure la qualité de la correspondance entre les débits simulés et observés.
2. **Coefficient de détermination (R^2)** : Évalue la proportion de la variance des débits observés expliquée par le modèle.
3. **Erreur quadratique moyenne (RMSE)** : Mesure l'écart moyen entre les débits simulés et observés.

Les résultats de la calibration et de la validation sont présentés dans le Tableau IV.4. Les valeurs obtenues indiquent une performance satisfaisante à bonne du modèle.

Tableau IV.4 Valeurs des coefficients de performance pour le modèle HEC-HMS (débits mensuels)

Coefficients de performance Oued Tikzal	
Calibration	
NSE	0.68
RMSE	2.86
R^2	0.78
Validation	
NSE	0.71
RMSE	2.92
R^2	0.81

Les valeurs de NSE et R^2 proches de 1, ainsi que les faibles valeurs de RMSE, confirment la capacité du modèle HEC-HMS à reproduire les débits observés avec une bonne précision.

IV.4.2 Résultats de la modélisation par le modèle SWAT

Pour le modèle SWAT, l'approche SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) a été utilisée pour effectuer la calibration et l'analyse de sensibilité des paramètres. La méthode SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) a été adoptée pour cette étude, car elle permet une évaluation complète de la sensibilité, de la calibration, de la validation et des incertitudes du modèle.

IV.4.2.1 Données d'entrée du modèle SWAT

La préparation des données d'entrée pour le modèle SWAT a impliqué la génération de jeux de données à partir d'images raster (GRID) et vectorielles compatibles avec ArcGIS (Shapefiles et Feature classes). Ces données incluent des informations sur la topographie, l'occupation du sol, les types de sol et les conditions météorologiques dont les sources de ces données ont été citées ci-dessus. La Figure IV.4 illustre les bassins versants générés par le modèle SWAT, montrant la structure spatiale du bassin étudié. Les résultats de la modélisation montrent que les modèles HEC-HMS et SWAT sont capables de reproduire les processus hydrologiques avec une bonne précision, comme en témoignent les critères de performance. La calibration et la validation des modèles ont permis d'ajuster les paramètres pour minimiser les écarts entre les débits simulés et observés, confirmant ainsi leur utilité pour la gestion des ressources en eau dans la région étudiée.

Les figures IV.4 à IV.8 fournissent une représentation visuelle des principales caractéristiques du bassin versant de l'Oued Tikzal, notamment la topographie, les pentes, les types de sols et l'occupation des terres. Ces données sont essentielles pour la configuration et la calibration des modèles hydrologiques SWAT et HEC-HMS, permettant ainsi une simulation précise des processus hydrologiques dans la région étudiée.

- La structure des sous-bassins générés par le modèle SWAT est illustrée dans la Figure IV.4. Ces sous-bassins ont été délimités en fonction des caractéristiques topographiques et hydrologiques du bassin versant de l'Oued Tikzal. Cette étape est essentielle pour la modélisation hydrologique, car elle permet de diviser le bassin en unités plus petites et plus homogènes, facilitant ainsi la simulation des processus hydrologiques.

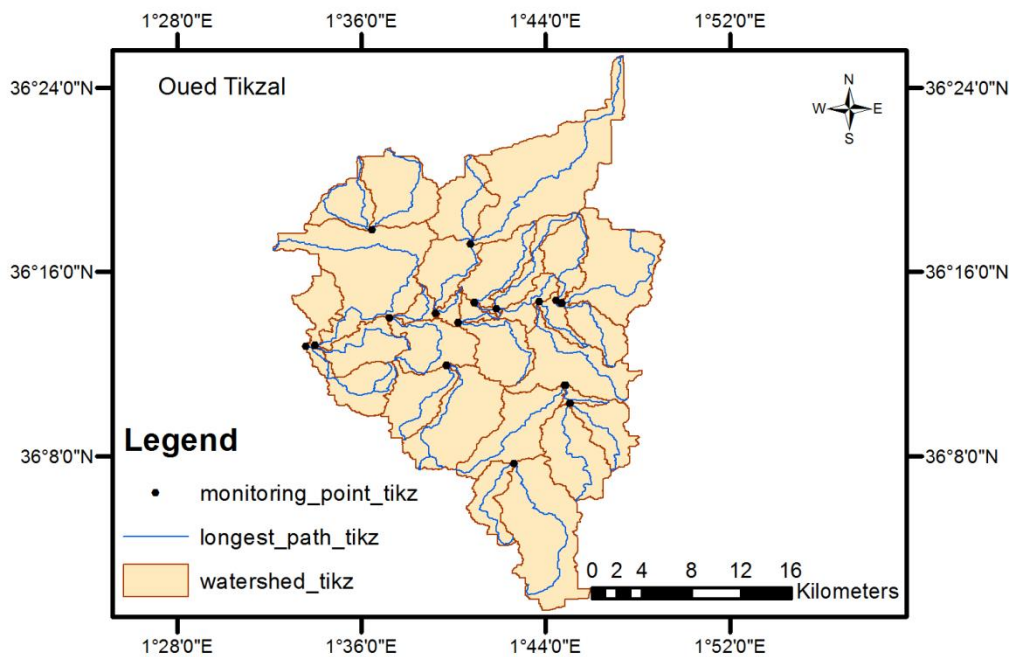


Figure IV.4 Sous-bassins créés par le modèle SWAT

- La topographie du terrain est représentée par la carte du modèle numérique de terrain (MNT), téléchargée à partir de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Cette carte, présentée dans la Figure IV.5, montre les variations d'altitude dans le bassin versant de l'Oued Tikzal, ce qui est crucial pour comprendre les écoulements d'eau et les processus hydrologiques.

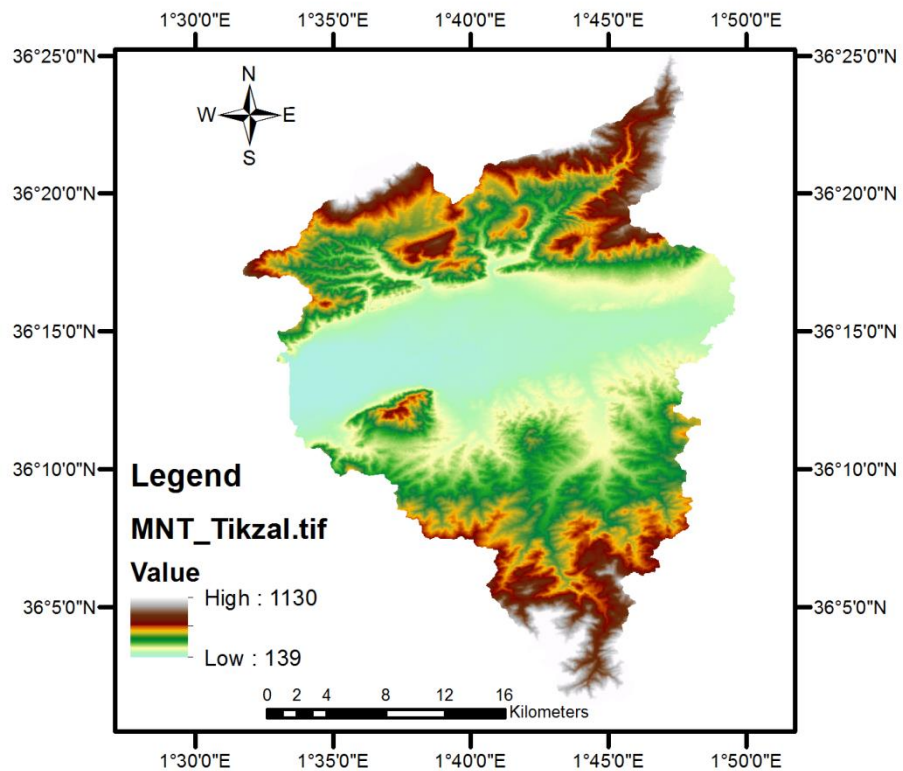


Figure IV.5 Carte du modèle numérique de terrain (MNT) de l'Oued Tikzal

- Une carte des pentes, dérivée du MNT, est présentée dans la Figure IV.6. Cette carte illustre les gradients de pente dans le bassin versant, qui influencent directement la vitesse et la direction des écoulements d'eau. Les zones à forte pente sont généralement associées à des ruissellements plus rapides, tandis que les zones à faible pente favorisent l'infiltration et le stockage de l'eau.

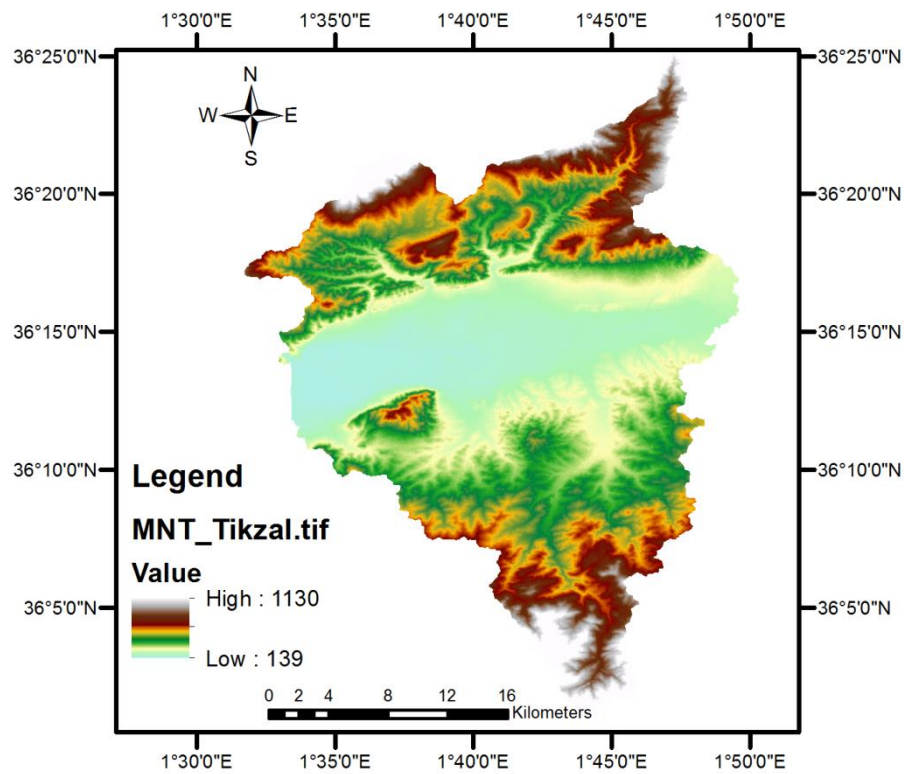


Figure IV.6 Carte des pentes de l'Oued Tikzal

- La carte des sols, préparée à partir de la carte numérique des sols du monde (DSMW), est présentée dans la Figure IV.7. Cette carte montre les différents types de sols présents dans le sous-bassin de l'Oued Tikzal. Les propriétés des sols, telles que la texture et la capacité de rétention d'eau, jouent un rôle clé dans les processus hydrologiques, notamment l'infiltration et le ruissellement.

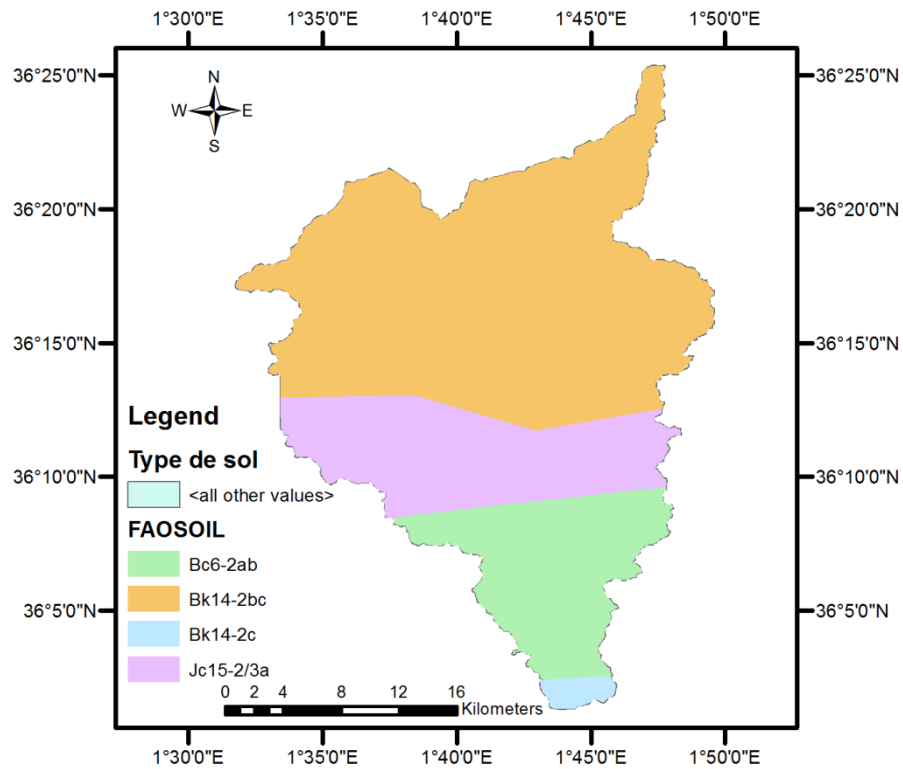


Figure IV.7 Carte des sols de l'Oued Tikzal

- La carte d'utilisation des terres, élaborée à partir de la carte globale de données de couverture terrestre mondiale, est présentée dans la Figure IV.8. Cette carte identifie les différents types de végétation et d'occupation des sols dans le sous-bassin de l'Oued Tikzal. L'occupation des sols influence directement les processus hydrologiques, tels que l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement, en fonction des caractéristiques de la couverture végétale.

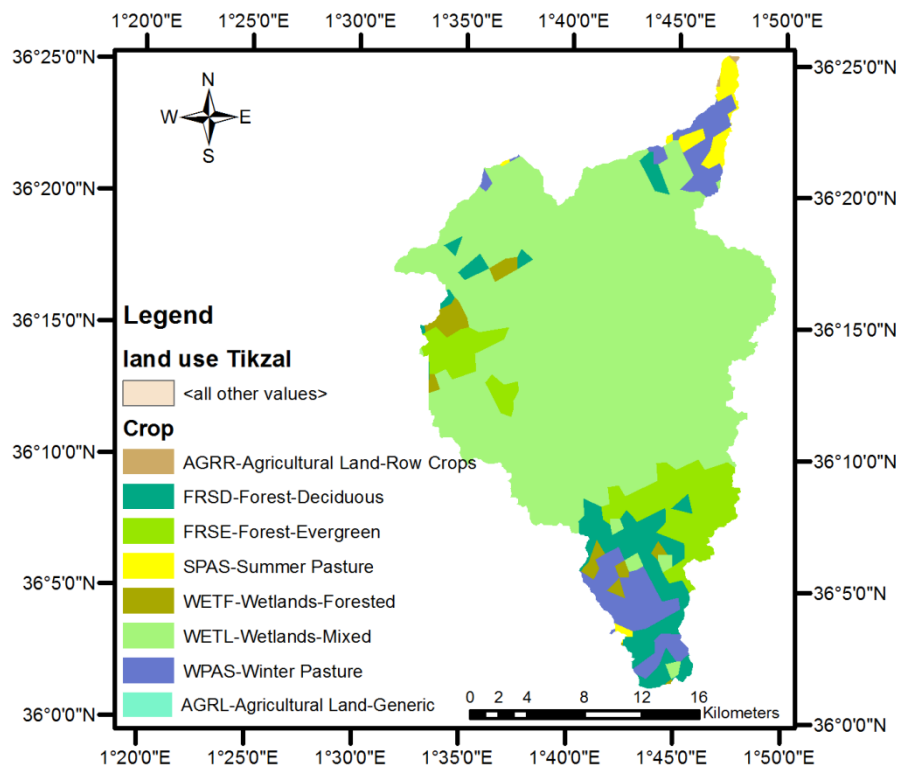


Figure IV.8 Carte d'occupation du sol de l'Oued Tikzal

IV.4.2.2 Analyse de la sensibilité du modèle SWAT

L'analyse de sensibilité des paramètres a été réalisée lors de la calibration du modèle SWAT. Quatorze paramètres ont été identifiés comme étant sensibles, sur la base des valeurs de P-value et t-stat. La procédure SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), intégrée dans SWAT-CUP, a été utilisée pour évaluer la sensibilité des paramètres du modèle. Cette méthode permet de déterminer l'impact des paramètres sur les résultats de la simulation et d'identifier ceux qui nécessitent un ajustement précis pour améliorer la performance du modèle.

Les paramètres sensibles pour le processus de calibration mensuelle sont répertoriés dans le Tableau IV.5. Il a été constaté que la plupart des ajustements de calibration et des itérations du modèle étaient liés à ces paramètres, en particulier ceux qui se sont révélés les plus sensibles.

Tableau IV.5 Les paramètres à calibrer du modèle SWAT

N°	Paramètre	Définition	Unité
1	R_CN2.mgt	SCS runoff curve number for moisture condition	-
2	R_USLE_P.mgt	USLE equation support practice factor	-
3	a_SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer	mm H ₂ O/mm Soil
4	V_CANMX.hru	Maximum canopy storage	mm H ₂ O
5	V_ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	-
6	V_EPCO.hru	Plant uptake compensation factor	-
7	V_SLSUBBSN.hru	Average slope length	M
8	a_SURLAG.bsn	Surface runoff lag time	Days
9	V_CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	mm/hr
10	V_CH_N2.rte	Manning's n value for the main channel	-
11	R_ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor	Days
12	R_GW_DELAY.gw	Groundwater delay	Days
13	R_GW_REVAP.gw	Groundwater revap coefficient	-
14	R_GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow	Mm

Analyse de la sensibilité des paramètres

La sensibilité des paramètres a été évaluée en classant les paramètres en fonction de leur impact sur la performance du modèle. Cette analyse est illustrée dans la Figure IV.9, qui montre la relation entre les valeurs de P-value et t-stat pour chaque paramètre. Les paramètres les plus sensibles sont ceux qui présentent une P-value proche de zéro et une valeur absolue élevée de t-stat. Ces paramètres ont un impact significatif sur les résultats de la simulation et nécessitent une attention particulière lors de la calibration.

Les paramètres les plus sensibles identifiés dans cette étude incluent :

- R_CN2.mgt : Courbe de ruissellement SCS pour les conditions d'humidité du sol.
- V_SLSUBBSN.hru : Longueur moyenne des pentes.
- R_GWQMN.gw : Profondeur du seuil de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire pour le retour d'eau.
- V_ESCO.hru : Facteur de compensation de l'évaporation du sol.
- R_ALPHA_BF.gw : Facteur alpha du débit de base.
- V_CH_K2.rte : Conductivité hydraulique effective dans l'alluvion du chenal principal.

La p-value (valeur p) est comparée à un seuil de signification statistique, généralement :

0.05 (5%)

- Si la p-value < 0.05 : le paramètre est statistiquement significatif, donc sensible.
- Si la p-value > 0.05 : on considère que le paramètre n'a pas d'effet significatif sur la réponse du modèle. Ce seuil peut parfois être plus strict (exemple 0.01) selon les exigences de l'étude.

La t-stat est comparée aux valeurs critiques de la loi de Student. La valeur critique dépend du niveau de confiance choisi (exemple 95%) et du nombre de degrés de liberté (n-k), où : n=nombre d'observations, k=nombre de paramètres estimés.

Dans la pratique avec SWAT-CUP :

- On considère qu'un t-stat « grand » (en valeur absolue), par exemple > 2 ou < -2, indique que le paramètre a un effet significatif et directionnel sur la sortie du modèle.
- Plus la valeur absolue de t est grande, plus le paramètre est sensible.

L'analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres clés qui influencent la performance du modèle SWAT. Ces paramètres ont été ajustés lors de la calibration pour améliorer la précision des simulations hydrologiques. La Figure IV.9 illustre la classification des paramètres en fonction de leur sensibilité, fournissant une base pour une calibration efficace et une meilleure compréhension des processus hydrologiques dans le bassin de l'Oued Tikzal.

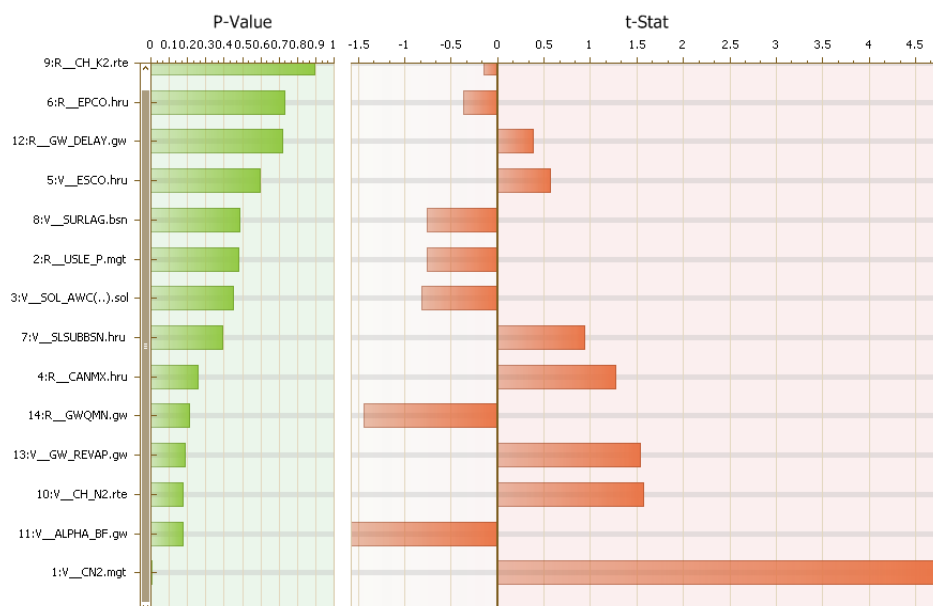


Figure IV.9 Valeurs de P-Value et t-Stat des paramètres du modèle SWAT. De l'Oued Tikzal

Une fois que les valeurs des paramètres ont été comparées à la fonction objective pour la calibration mensuelle, les graphiques de la Figure IV.10 présentent la répartition du nombre de simulations dans l'analyse de sensibilité des paramètres. Selon la valeur de p-value, les paramètres CN2, SLSUBBSN, GWQMN, ESCO, ALPHA_BF et CH_K2 ont montré des fluctuations importantes pendant le processus de calibration dans l'approche SUFI-2. Ces paramètres sont considérés comme les plus sensibles, car ils ont un impact significatif sur les résultats de la simulation. La Figure IV.10 illustre cette sensibilité, mettant en évidence les variations de ces paramètres au cours des itérations de calibration.



Figure IV.10 Tracé en pointillé des paramètres sensibles du modèle SWAT de l'Oued Tikzal

IV.4.2.3 Calibration et validation du modèle SWAT au pas de temps mensuel

Le modèle SWAT a été calibré en utilisant l'approche SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), qui permet d'ajuster les paramètres du modèle dans les marges autorisées de manière itérative jusqu'à ce que les débits observés et simulés soient correctement ajustés. La calibration a été réalisée au pas de temps mensuel sur une période de sept ans, de janvier 2001 à décembre

2007. Les deux premières années, de janvier 2001 à décembre 2002, ont été utilisées comme période de réchauffement (warm-up) pour stabiliser les conditions initiales du modèle. Les cinq années suivantes, de janvier 2003 à décembre 2007, ont été consacrées à la calibration proprement dite.

Les valeurs finales des quatorze paramètres calibrés sont présentées dans le Tableau IV.6. Ces valeurs ont été ajustées pour minimiser les écarts entre les débits observés et simulés.

Tableau IV.6 Valeurs des paramètres calibrés pour le modèle SWAT de l'Oued Tikzal

Paramètre	Marge initiale	Valeurs calibrées
v_CN2.mgt	35 - 98	96.43
r_USLE_P.mgt	0 - 1	0.88
v_SOL_AWC.sol	0 - 1	0.43
r_CANMX.hru	0 - 100	57.5
v_ESCO.hru	0 - 1	0.18
r_EPCO.hru	0 - 1	0.23
v_SLSUBBSN.hru	10 - 150	125.5
v_SURLAG.bsn	0.05 - 24	11.43
r_CH_K2.rte	-0.01 - 500	162.49
v_CH_N2.rte	-0.01 - 0.3	0.29
v_ALPHA_BF.gw	0 - 1	0.03
r_GW_DELAY.gw	0 - 500	93.75
v_GW_REVAP.gw	0.02 - 0.2	0.05
r_GWQMN.gw	0 - 5000	3625

Validation du modèle SWAT

Après la calibration, le modèle SWAT a été validé sur une période de cinq ans, de janvier 2008 à décembre 2012. Cette période de validation permet d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les débits observés sur une période indépendante de celle utilisée pour la calibration. Les courbes de débits mensuels observés et simulés, pour les phases de calibration et de validation, sont présentées dans la Figure IV.11. Ces courbes montrent la correspondance entre les débits simulés par le modèle et les débits observés sur le terrain.

La calibration et la validation du modèle SWAT ont permis d'ajuster les paramètres pour minimiser les écarts entre les débits simulés et observés. Les résultats montrent que le modèle est capable de reproduire les processus hydrologiques avec une bonne précision, tant pendant la période de calibration que pendant la période de validation. La Figure IV.11 illustre cette

correspondance, confirmant l'utilité du modèle SWAT pour la gestion des ressources en eau dans le bassin de l'Oued Tikzal.

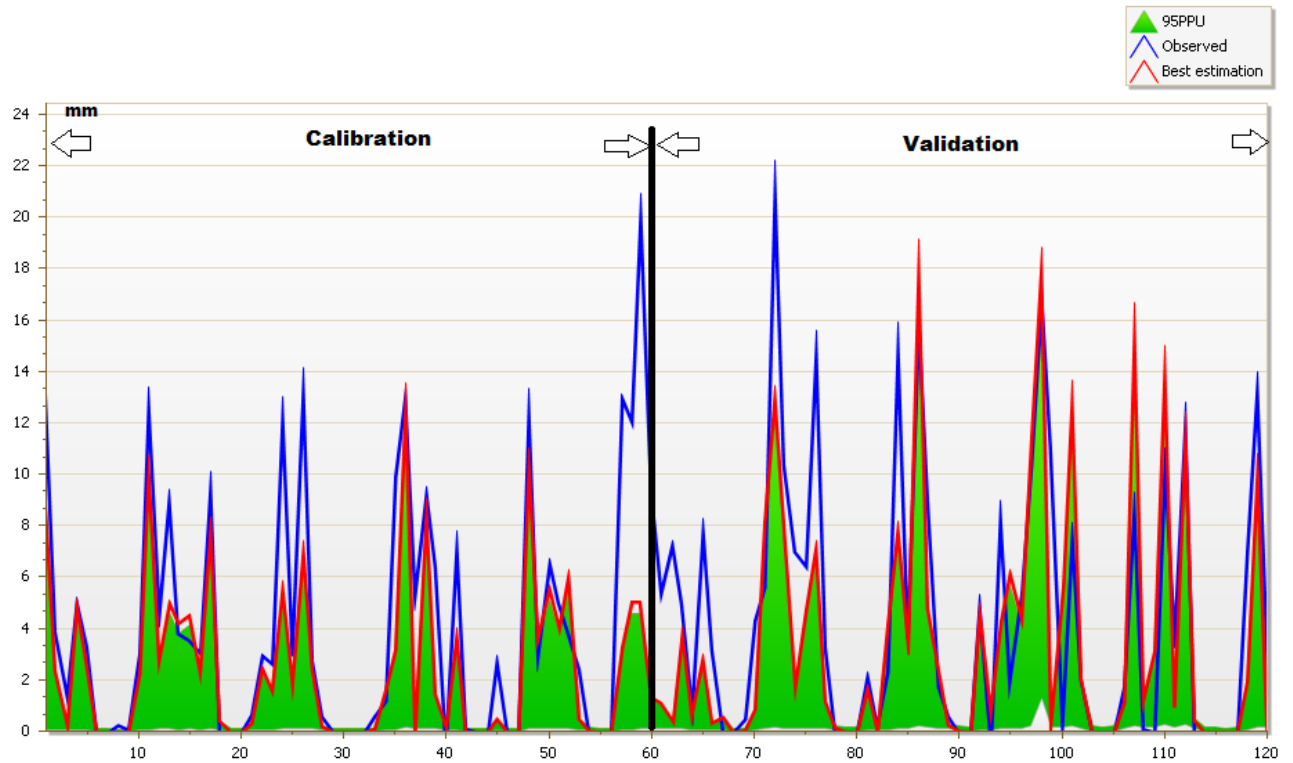


Figure IV.11 Tracé de la bonne estimation des débits simulés par le modèle SWAT de l'Oued Tikzal

IV.4.2.4 Evaluation de la performance du modèle SWAT

L'efficacité du modèle SWAT a été évaluée à l'aide de trois critères de performance : l'efficacité Nash-Sutcliffe (NSE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2). Les résultats obtenus, présentés dans le Tableau IV.7, montrent des performances satisfaisantes pour le modèle SWAT lors des phases de calibration et de validation.

Tableau IV.7 Valeurs des coefficients de performance pour le modèle SWAT (débits mensuels)

Coefficients de performance Oued Tikzal	
Calibration	
NSE	0.51
RMSE	3.54
R ²	0.65
Validation	
NSE	0.60
RMSE	3.46
R ²	0.64

Les valeurs de NSE et R² indiquent une bonne adéquation entre les débits simulés et observés, tandis que les valeurs de RMSE montrent des écarts relativement faibles, confirmant la capacité du modèle SWAT à reproduire les processus hydrologiques dans le bassin de l'Oued Tikzal.

IV.5 Discussions des résultats de la modélisation par les modèles HEC-HMS et SWAT

Les résultats de la modélisation hydrologique réalisée avec les modèles HEC-HMS et SWAT, au pas de temps mensuel, montrent des performances allant de satisfaisantes à bonnes pour le sous-bassin étudié de l'Oued Tikzal. Les critères de performance (NSE, R² et RMSE) obtenus pour les deux modèles sont résumés ci-dessous :

- Pour le modèle HEC-HMS :
 - Calibration : NSE = 0.68, R² = 0.78, RMSE = 2.86
 - Validation : NSE = 0.71, R² = 0.81, RMSE = 2.92
- Pour le modèle SWAT :
 - Calibration : NSE = 0.51, R² = 0.65, RMSE = 3.54
 - Validation : NSE = 0.60, R² = 0.64, RMSE = 3.46

Le modèle HEC-HMS a enregistré les meilleures performances, avec un NSE de 0.71 et un R² de 0.81 en phase de validation, ainsi qu'une valeur de RMSE de 2.86 en phase de calibration. Ces résultats montrent que HEC-HMS est plus performant que SWAT pour simuler les débits mensuels dans le sous-bassin étudié.

Une amélioration des critères de performance a été observée en phase de validation par rapport à la phase de calibration pour les deux modèles. Cela peut s'expliquer par la meilleure qualité des données disponibles pendant la période de validation, ainsi que par une plus grande cohérence entre les séries de précipitations et les séries de débits. Ces résultats confirment que

les deux modèles peuvent être bien calibrés pour cette région et sont capables de reproduire les écoulements avec une précision acceptable.

IV.6 Comparaison des deux modèles HEC-HMS et SWAT

Les structures des deux modèles hydrologiques, HEC-HMS et SWAT, diffèrent significativement, mais les deux ont montré des performances satisfaisantes pour la simulation des écoulements dans le sous-bassin de l'Oued Tikzal. Les hydrogrammes simulés par les deux modèles correspondent bien aux débits observés, bien que des différences dans les performances globales aient été notées.

- **Performances comparées :**
 - Le modèle HEC-HMS a enregistré les meilleures valeurs pour les critères NSE (0.71) et R^2 (0.81) en phase de validation, ainsi que la meilleure valeur de RMSE (2.86) en phase de calibration.
 - Le modèle SWAT a montré des performances légèrement inférieures, avec un NSE de 0.60 et un R^2 de 0.64 en phase de validation.
- **Analyse des pics d'écoulement :**
 - Le modèle HEC-HMS a tendance à sous-estimer les pics d'écoulement, tandis que le modèle SWAT les surestime. Cette différence peut être attribuée aux approches de modélisation et aux paramètres utilisés par chaque modèle.
 - Les volumes d'eau simulés par les deux modèles ont été légèrement sous-estimés, ce qui peut s'expliquer par les caractéristiques du sous-bassin, telles que l'utilisation des terres, la couverture végétale, les conditions climatiques et les propriétés du sol.
- **Avantages et limites des modèles :**
 - Le modèle HEC-HMS s'est avéré plus performant pour prévoir la variation globale des débits, probablement en raison de la précision des données d'entrée et de la méthode de calcul des précipitations moyennes (polygone de Thiessen).
 - Le modèle SWAT, bien que nécessitant plus de données d'entrée (notamment des données raster traitées dans ArcGIS), a montré une plus grande incertitude dans ses simulations, ce qui a légèrement réduit ses performances.

IV.7 Comparaison avec d'autres études

Ces résultats sont en accord avec les études antérieures, telles que celles de **Halwatura & Najim (2013)**, **AZMAT et al. (2017)**, **Allali et al. (2022)**, **Haddad (2022)**, **Ismail et al. (2020)**, **Doliso & Hatiye (2021)**, **Fanta & Sime (2022)** et **Sempewo et al. (2023)**, qui ont également constaté que le modèle HEC-HMS était généralement plus performant que le modèle SWAT pour la simulation des débits mensuels. Bien que les deux modèles aient montré des performances satisfaisantes, le modèle HEC-HMS s'est avéré plus adapté pour représenter les débits mensuels dans le sous-bassin de l'Oued Tikzal. Cependant, le choix du modèle dépend des objectifs de l'étude et des données disponibles. Le modèle SWAT reste un outil puissant pour l'analyse des impacts à long terme des pratiques de gestion des terres et des changements climatiques, tandis que HEC-HMS est plus adapté pour des simulations hydrologiques à court terme et des prévisions de crues.

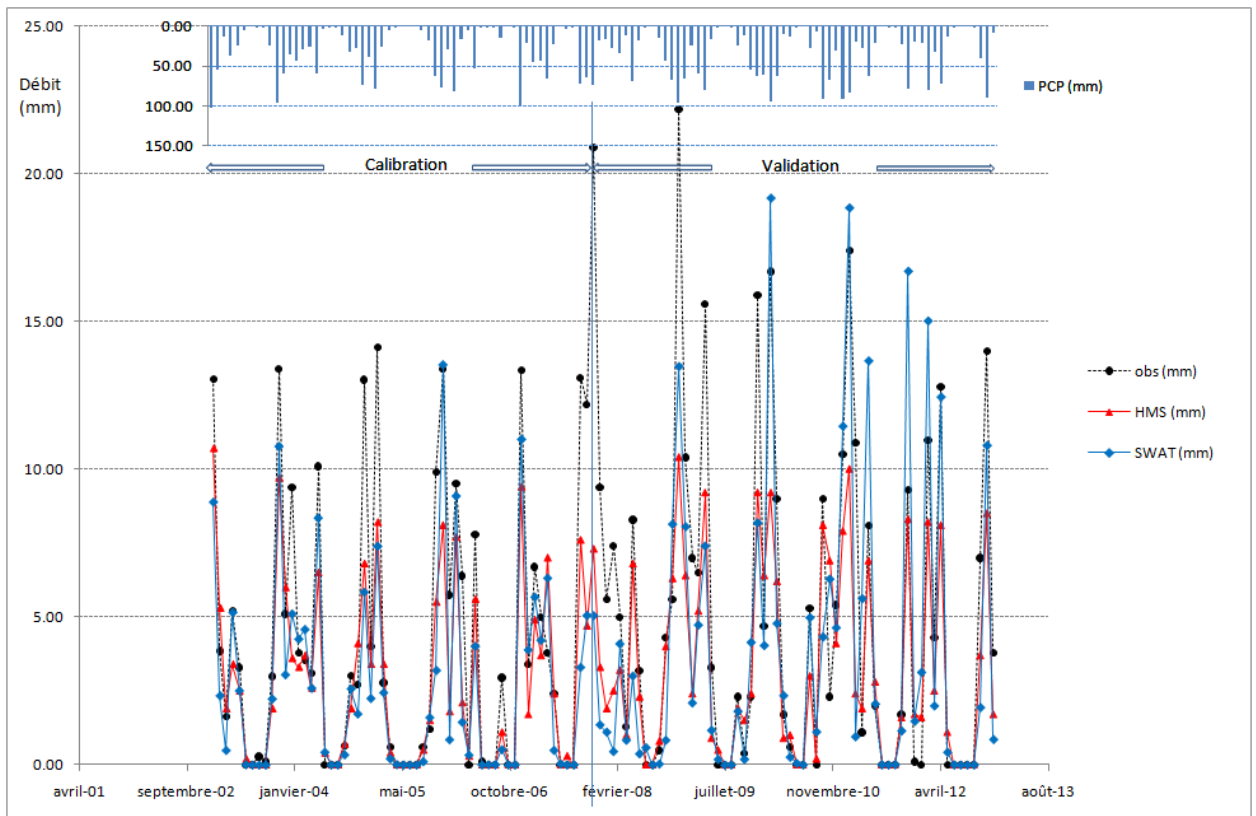


Figure IV.12 Débits observés et simulés des deux modèles HEC-HMS et SWAT (Calibration et validation)

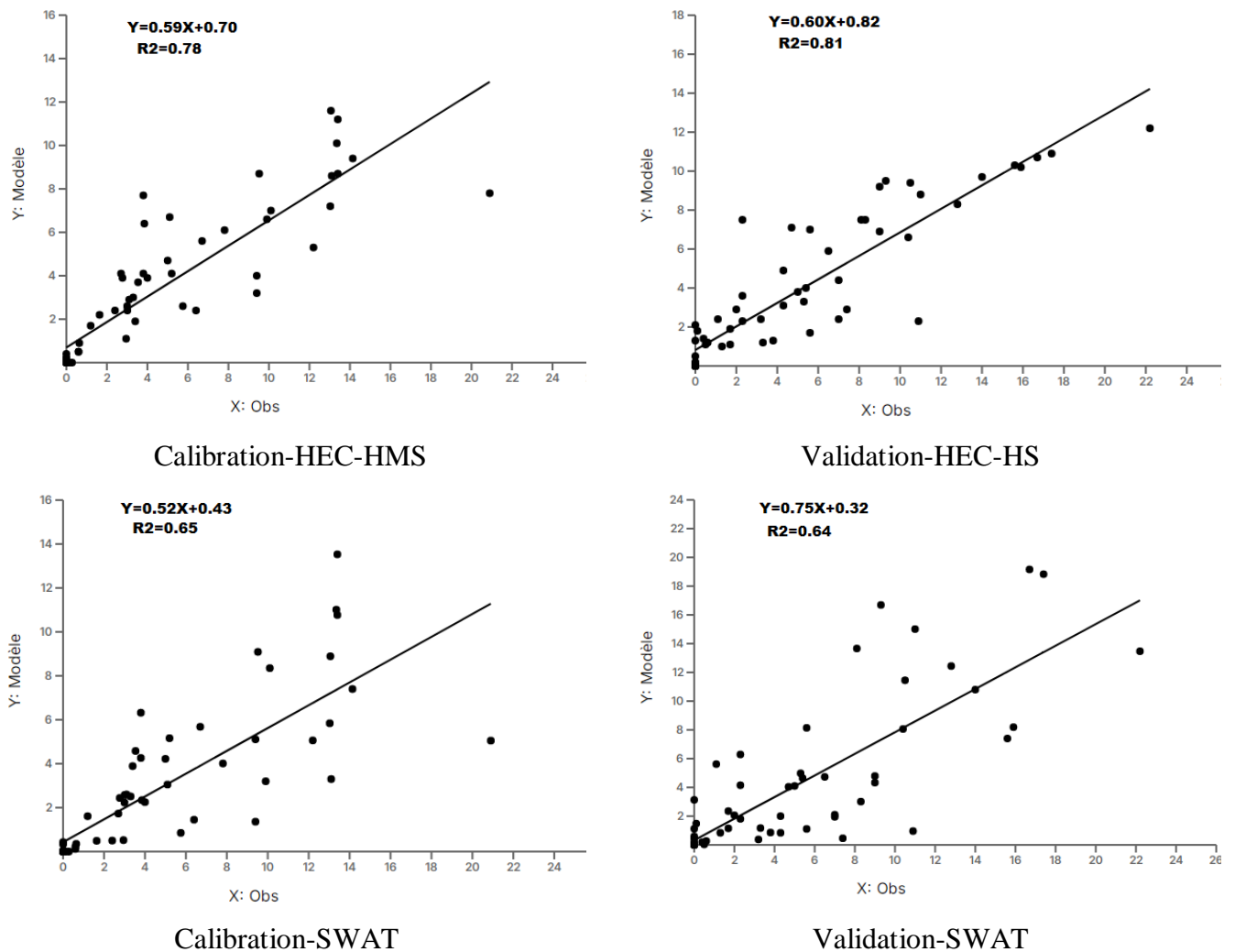


Figure IV.13 Diagrammes de dispersion du coefficient de détermination R^2 pour les périodes de la calibration et la validation

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que les deux modèles, HEC-HMS et SWAT, sont sensibles à des paramètres clés liés à la vitesse de ruissellement (comme le Lag time et le coefficient de ruissellement (CN2) et au débit de base (notamment le Recession constant pour HEC-HMS et ALPHA_BF pour SWAT). En outre, HEC-HMS présente une sensibilité accrue au facteur de couvert végétal, qui influence l'évapotranspiration et la rétention d'eau, tandis que SWAT est plus sensible aux paramètres liés à la pente, à la conductivité hydraulique et à l'évapotranspiration, reflétant son approche plus détaillée des processus hydrologiques liés à la topographie et à la gestion des sols. Ces différences de sensibilité soulignent l'importance d'une calibration précise des paramètres pour chaque modèle, en tenant compte de leurs spécificités structurelles et des caractéristiques du bassin étudié.

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de comparer les performances des modèles hydrologiques HEC-HMS et SWAT dans le sous-bassin de l'Oued Tikzal, situé dans la région du haut et moyen Cheliff en Algérie. Les résultats ont montré que les deux modèles sont capables de reproduire les écoulements mensuels avec une précision satisfaisante, bien que HEC-HMS ait enregistré de meilleures performances, avec un Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0.71 et un coefficient de détermination (R^2) de 0.81 en phase de validation, contre un NSE de 0.60 et un R^2 de 0.64 pour SWAT. L'analyse de sensibilité a révélé que les paramètres les plus influents pour HEC-HMS sont le Lag time, le Recession Constant et le Max storage, tandis que pour SWAT, les paramètres clés incluent CN2, SLSUBBSN, GWQMN, ESCO, ALPHA_BF et CH_K2, reflétant leurs approches structurelles distinctes. HEC-HMS s'est avéré plus adapté pour des simulations hydrologiques à court terme et des prévisions de crues, grâce à sa précision et sa simplicité d'utilisation, tandis que SWAT, bien que nécessitant plus de données d'entrée, est un outil puissant pour l'analyse des impacts à long terme des pratiques de gestion des terres et des changements climatiques. Les performances des deux modèles confirment leur utilité pour la gestion des ressources en eau dans la région étudiée, avec HEC-HMS recommandé pour des études à court terme et SWAT pour des analyses à long terme. Ces résultats offrent une base solide pour des applications futures dans des contextes hydrologiques similaires, tout en soulignant l'importance d'une calibration précise des paramètres pour maximiser la performance des modèles.

***Conclusion générale et
perspectives***

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de doctorat, intitulé "Utilisation des multi-modèles pour améliorer la modélisation hydrologique régionalisée et application au bassin de Cheliff", a permis d'explorer et de proposer des solutions innovantes pour améliorer la modélisation hydrologique dans un contexte semi-aride, en se focalisant sur le bassin du Cheliff en Algérie. Les résultats obtenus contribuent à une meilleure compréhension des processus hydrologiques dans les régions où les données sont limitées, tout en proposant des méthodes adaptées pour une gestion durable des ressources en eau.

Principaux résultats et contributions sont tirés de ce travail :

- Régionalisation des débits dans les bassins non jaugés : Deux méthodes de régionalisation ont été appliquées pour estimer les débits dans le sous-bassin non jaugé de l'Oued Tikzal : la proximité spatiale et la similarité physique. Les résultats montrent que la méthode de proximité spatiale offre des performances légèrement supérieures, avec des valeurs de NSE dépassant 0.75 lors de la validation. La moyenne arithmétique des paramètres s'est avérée plus efficace que la pondération par la distance inverse (IDW), confirmant ainsi l'importance de la simplicité dans les techniques de régionalisation. Ces méthodes offrent des solutions pratiques pour estimer les débits dans les bassins non jaugés, une problématique cruciale dans les régions où les données hydrométriques sont rares.
- Evaluation des performances des modèles hydrologiques : Les modèles HEC-HMS et SWAT ont été comparés pour leur capacité à simuler les débits dans le bassin du Cheliff. Les résultats montrent que HEC-HMS offre de meilleures performances en termes de précision et de fiabilité, avec des valeurs de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) supérieures à 0.70 lors de la validation. Cependant, SWAT reste un outil puissant pour des analyses à long terme, notamment pour évaluer les impacts des changements climatiques et des pratiques de gestion des terres. Cette comparaison fournit des recommandations claires sur le choix des modèles en fonction des objectifs de l'étude et des caractéristiques du bassin.
- Sensibilité des modèles aux paramètres : L'analyse de sensibilité a permis d'identifier les paramètres clés influençant les performances des modèles.

Pour HEC-HMS, les paramètres liés au temps de réponse du bassin (Lag time), au débit de base (Recession Constant) et à la capacité de stockage de la canopée (Max storage) se sont révélés les plus sensibles.

Pour SWAT, les paramètres liés au ruissellement (CN2), à la conductivité hydraulique (CH_K2), à la longueur moyenne des pentes, (SLSUBBSN), à la profondeur du seuil de l'eau dans l'aquifère peu

Conclusion générale et perspectives

profond nécessaire pour le retour d'eau (GWQMN) , au facteur de compensation de l'évaporation du sol (ESCO) et au facteur alpha du débit de base (ALPHA_BF), ont montré une influence significative sur les résultats. Ces résultats soulignent l'importance d'une calibration minutieuse pour optimiser les performances des modèles, en particulier dans les régions semi-arides où les données sont souvent limitées.

Bien que ce travail ait permis d'importantes avancées, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées pour approfondir les travaux :

- Amélioration des modèles : Une optimisation plus poussée des paramètres liés aux débits de pointe et aux pertes par infiltration pourrait améliorer la précision des simulations, en particulier pour HEC-HMS.
- Intégration de données supplémentaires : L'utilisation de données supplémentaires, telles que l'occupation des sols, les projections climatiques à haute résolution, et les données satellitaires, pourrait enrichir les modèles et améliorer leur capacité à prédire les impacts des changements environnementaux.
- Application à d'autres régions : Les méthodes développées dans ce travail pourraient être appliquées à d'autres bassins versants en Algérie et dans d'autres régions semi-arides, afin d'évaluer leur efficacité dans des contextes hydrologiques variés.
- Collaboration internationale : Une collaboration avec des chercheurs internationaux et des institutions spécialisées dans la modélisation hydrologique pourrait permettre de partager les connaissances et d'améliorer les outils disponibles pour la gestion des ressources en eau.

Ce travail a démontré que l'utilisation de multi-modèles et de techniques de régionalisation peut significativement améliorer la modélisation hydrologique dans les régions semi-arides, en particulier dans le bassin du Cheliff. Les résultats obtenus offrent des perspectives prometteuses pour une gestion plus durable et résiliente des ressources en eau, tout en soulignant l'importance de continuer à développer des méthodes adaptées aux défis spécifiques des régions où les données sont limitées. Les recommandations formulées dans ce travail contribueront à soutenir les décideurs et les gestionnaires de l'eau dans leurs efforts pour préserver et optimiser l'utilisation des ressources hydriques dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les écosystèmes aquatiques.

Conclusion générale et perspectives

Cette recherche ouvre ainsi la voie à de nouvelles études pour approfondir les connaissances en hydrologie régionalisée et pour renforcer les capacités de gestion des ressources en eau dans les régions vulnérables, contribuant ainsi à un avenir plus durable pour les générations futures.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., ... & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2-4), 413-430.
- ABH-CZ (Agence Du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez), (2004). Cadastre hydraulique du bassin hydrographie du Cheliff Haut et Moyen Cheliff.
- Achite, M., & Meddi, M. (2005). Spatial and temporal variability of streamflow and solid yields in semiarid areas. Case of the oued Mina basin (Northwest Algeria). *REVUE DES SCIENCES DE L'EAU*, 18(I), 37.
- Allali, H., Elmeddahi, Y., Moudjeber, D. E., Mahmoudi, H., & Goosen, M. F. (2022). Utilizing hydrograph transform methods and a hydrologic modeling system in rainfall-runoff simulation of a semi-arid watershed in Algeria in north-west Africa. *Desalination and Water Treatment*, 255, 220-228. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28344>
- ALLALI, H. (2023). Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit (Cas du bassin versant de Oued Ouahrane - W de Chlef). Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- AMIAR, S. (2021). Modélisation hydrologique pluie – débit et l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau. Cas Oued Cheliff. Bassin versant du Haut et Moyen Cheliff. Thèse de doctorat. Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen.
- Ammari, A., Moramarco, T., & Meddi, M. (2017). A simple entropy-based method for discharges measurements in gauged and ungauged river sites: the case study of coastal Algerian rivers. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 39, 35-44. e-ISSN: 2458-7184
- Aqnouy, M., Ahmed, M., Ayele, G. T., Bouizrou, I., Bouadila, A., & Stitou El Messari, J. E. (2023). Comparison of hydrological platforms in assessing rainfall-runoff behavior in a Mediterranean watershed of Northern Morocco. *Water*, 15(3), 447.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2013). SWAT 2012 input/output documentation. Texas Water Resources Institute.
- Arsenault, R., & Brissette, F. P. (2014). Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. *Water Resources Research*, 50(7), 6135-6153.
- Artigue, G. (2012). Prévission des Crues Éclair par Réseaux de Neurones : Généralisation aux Bassins non Jaugés. Thèse de doctorat. Université Montpellier 2. France.

Références bibliographiques

- Azmat, M., Qamar, M. U., Ahmed, S., Hussain, E., & Umair, M. (2017). Application of HEC-HMS for the event and continuous simulation in high altitude scarcely-gauged catchment under changing climate. *European water*, 57, 77-84.
- BAAhmed, D. (2015). Bilan hydrique et évaluation des ressources en eau superficielles du bassin de la macta. Thèse de doctorat en sciences. Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran.
- Barbosa, J. H. S., Fernandes, A., Lima, A., & Assis, L. (2019). The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: a case study. *International Journal of Hydrology*, 3(5), 442-449.
- BENKACI, A. T. (2006). Modélisation pluie-débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous (application aux bassins Algériens). Thèse de doctorat. INA).
- Benkaci, S., Abir, D., Oumellal, A., & Remini, B. (2018). Modélisation de l'érosion du bassin haut et moyen Cheliff par l'application Model builder sur ArcGis. *J Mater Eng Struct*, 5, 81-93.
- Blasone, R. S., Madsen, H., & Rosbjerg, D. (2007). Parameter estimation in distributed hydrological modelling: comparison of global and local optimisation techniques. *Hydrology Research*, 38(4-5), 451-476.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*. Cambridge University Press.
- Bodian, A. (2011). Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- Bois, P. (1972). Analyse séquentielle. *Geophysical Prospecting*, 20(3), 497-513.
- Breton-Dufour, M. (2017). Étude de méthodes de régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques et application à un bassin versant non-jaugé au Mexique. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- Loumagne, C. (2001). Observation spatiale et modélisation hydrologique pour la gestion des ressources en eau. Habilitation à diriger des recherches en sciences, Université Paris Sud, Centre Scientifique d'Orsay. France.
- Derdour, A., Bouanani, A., & Babahamed, K. (2018). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria). *Journal of water and land development*, (36), 45-55.

Références bibliographiques

- Devak, M., & Dhanya, C. T. (2017). Sensitivity analysis of hydrological models: review and way forward. *Journal of Water and Climate Change*, 8(4), 557-575.
- Devi, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). Applications of remote sensing in satellite oceanography: A review. *Aquatic Procedia*, 4, 579-584.
- Doliso, B. D., & Hatiye, S. D. (2021). Comparative performance evaluation of HEC-HMS and SWAT models in stream flow simulation: The case of Bilate and Gidabo Watersheds, Ethiopia. *Ethiopian Journal of Water Science and Technology*, 4, 90-122. Available from: <https://survey.amu.edu.et/ojs/index.php/EJWST>
- Dooge, J. C. (1988). Hydrology in perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 33(1), 61-85.
- ELMEDDAHI, Y. (2016). Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff. Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., & Bachir, O. A. (2011). Hydrologic modeling of the Bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. *Journal of Geographic Information System*, 3(04), 279. <https://doi.org/10.4236/jgis.2011.34024>
- Fanta, S. S., & Sime, C. H. (2022). Performance assessment of SWAT and HEC-HMS model for runoff simulation of Toba watershed, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00596-8>
- Fattahi, P., Ashrafzadeh, A., Pirmoradian, N., & Vazifedoust, M. (2022). Integrating IHACRES with a data-driven model to investigate the possibility of improving monthly flow estimates. *Water Supply*, 22(1), 360-371.
- Hachemaoui, A., Elouissi, A., Benzater, B., & Fellah, S. (2022). Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda basin in western Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 5611-5624.
- Haddad, A. (2022). Extreme Rainfall-Runoff Events Modeling Using HEC-HMS Model for Oued El Hachem Watershed, Northern Algeria. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 69(1), 45-57. <https://doi.org/10.2478/heem-2022-0004>
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental modelling & software*, 46, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Références bibliographiques

- Ismail, H., Kamal, M. R., Hin, L. S., & Abdullah, A. F. (2020). Performance of HEC-HMS and ArcSWAT Models for Assessing Climate Change Impacts on Streamflow at Bernam River Basin in Malaysia. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 28(3). Available from: <https://www.researchgate.net/publication/344326211>
- Khoi, D. N. (2016). Comparison of the HEC-HMS and SWAT hydrological models in simulating the stream flow. *Journal of Science and Technology*, 53(5A), 189-195.
- Kokkonen, T. S., Jakeman, A. J., Young, P. C., & Koivusalo, H. J. (2003). Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological processes*, 17(11), 2219-2238.
- Kumar, D., & Bhattacharjya, R. K. (2020). Evaluating two GIS-based semi-distributed hydrological models in the Bhagirathi-Alkhnanda River catchment in India. *Water Policy*, 22(6), 991-1014.
- Laborde, J. P. (2009). *Eléments d'hydrologie de surface*. Université de Nice-Sophia Antipolis. France (204p).
- Laouacheria, F., & Mansouri, R. (2015). Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. *Water Resources Management*, 29, 2485-2501.
- Li, H., & Zhang, Y. (2016). Regionalising rainfall–runoff modelling for predicting daily runoff in continental Australia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2016, 1-24.
- McMillan, H., Jackson, B., Clark, M., Kavetski, D., & Woods, R. (2012). Rainfall-runoff modelling in northern catchments: model development and uncertainty analysis. *Hydrological Processes*, 26(25), 3865-3877.
- Meaurio, M., Zabaleta, A., Uriarte, J. A., Srinivasan, R., & Antigüedad, I. (2015). Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. *Journal of Hydrology*, 525, 326-334.
- Meddi, M., Hubert, P., & Assani, A. (2010). Impact of drought on water resources in northern Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 14, 49-65.
- Mehaiguene, M. (2013). *Etude des étiages et des débits de base Au nord-ouest de l'Algérie*. Thèse de Doctorat. ENSH de Blida.
- Merz, R., & Blöschl, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of hydrology*, 287(1-4), 95-123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.028>
- Mokhtari, E. H., Remini, B., & Hamoudi, S. A. (2016). Modelling of the rain-flow by hydrological modelling software system HEC-HMS-watershed's case of wadi Cheliff-Ghrib, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 30(1), 87. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0025>

Références bibliographiques

- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
- 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. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts Hydrologie. ENGREF Paris. France.
- Namara, W. G., Damise, T. A., & Tufa, F. G. (2020). Rainfall runoff modeling using HEC-HMS: The case of Awash Bello sub-catchment, upper Awash basin, Ethiopia. *International Journal of Environment*, 9(1), 68-86.
- Ouachani, R., Bargaoui, Z., & Ouarda, T. (2007). Intégration d'un filtre de Kalman dans le modèle hydrologique HBV pour la prévision des débits. *Hydrological sciences journal*, 52(2), 318-337.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3). <https://doi.org/10.1029/2007WR006240>, 2008
- Parajka, J., Viglione, A., Rogger, M., Salinas, J. L., Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins—Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1783-1795. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1783-2013>
- Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du génie rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16.
- Pool, S., Viviroli, D., & Seibert, J. (2019). Value of a limited number of discharge observations for improving regionalization: A large sample study across the United States. *Water Resources Research*, 55(1), 363-377.
- Qiang, MA. (2019). Modélisation hydrologique déterministe pour les systèmes d'aide à la décision en temps réel. Application au bassin versant Var, France. Thèse de doctorat. Université COTE d'AZUR.
- RATA, M. (2020). Analyse géostatistique et modélisation de la pluviométrie dans le cadre des changements climatiques : Cas du bassin versant du Chélif. Thèse de doctorat en Sciences. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- Razavi, T., & Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. *Journal of hydrologic engineering*, 18(8), 958-975.

Références bibliographiques

- Reichl, J. P. C., Western, A. W., McIntyre, N. R., & Chiew, F. H. S. (2009). Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow. *Water Resources Research*, 45(10). <https://doi.org/10.1029/2008WR007248>, 2009
- ROCHE, M. (1963). *Hydrologie de surface*. GAUTHIER - VILLARS ÉDITEUR – PARIS.
- Rojas-Serna, C., Lebecherel, L., Perrin, C., Andréassian, V., & Oudin, L. (2016). How should a rainfall-runoff model be parameterized in an almost ungauged catchment? A methodology tested on 609 catchments. *Water Resources Research*, 52(6), 4765-4784.
- Rossi, C. G., Dybala, T. J., Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Amonett, C. A. R. L., & Marek, T. O. D. D. (2008). Hydrologic calibration and validation of the Soil and Water Assessment Tool for the Leon River watershed. *Journal of soil and water conservation*, 63(6), 533-541.
- Rouhier, L. (2018). *Régionalisation d'un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés. Application aux vallées de la Loire et de la Durance*. Sciences de la Terre. Université Sorbonne.
- Salhi, C., Touaibia, B., Zeroual, A., Benblida, N., & Assani, A. (2022). Evaluation of soil erosion in Northern Algeria watershed using SWAT and RUSLE models. *Geocarto International*, 37(26), 11559-11589.
- Salinas, J. L., Laaha, G., Rogger, M., Parajka, J., Viglione, A., Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins—Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2637-2652. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2637-2013>
- Salviano, M. F., Pereira Filho, A. J., & Vemado, F. (2021). TOPMODEL Hydrometeorological Modeling with Rain Gauge Data Integrated by High-Resolution Satellite Estimates. A Case Study in Muriaé River Basin, Brazil. *Atmospheric and Climate Sciences*, 11(3), 486-507.
- Samuel, J., Coulibaly, P., & Metcalfe, R. A. (2011). Estimation of continuous streamflow in Ontario ungauged basins: comparison of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 447-459. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000338](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000338)
- Sanjay Shekar, N. C., & Vinay, D. C. (2021). Performance of HEC-HMS and SWAT to simulate streamflow in the sub-humid tropical Hemavathi catchment. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3005-3017.
- Sempewo, J. I., Twite, D., Nyenje, P., & Mugume, S. N. (2023). Comparison of SWAT and HEC-HMS model performance in simulating catchment runoff. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(4), 481-495. <https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2156401>

Références bibliographiques

- Setianto, A., & Triandini, T. (2013). Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *Journal of Applied Geology*, 5(1).
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., ... & Zehe, E. (2003). IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857-880.
- Skhakhfa, I. D., & Ouerdachi, L. (2016). Hydrological modelling of wadi Ressoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model. *Journal of Water and Land Development*, 31(1), 139.
- Soomro, S. E. H., Hu, C., Boota, M. W., Wu, Q., Soomro, M. H. A. A., & Zhang, L. (2021). Assessment of the climatic variability of the Kunhar River Basin, Pakistan. *Water*, 13(13), 1740.
- Srinivasan, R., Zhang, X., & Arnold, J. (2010). SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1533-1546.
- Taleb, R. B., Naimi, P. M., Chikhaoui, P. M., Raclot, D., & Sabir, P. M. (2019). Evaluation Des Performances Du Modele Agro-Hydrologique SWAT à Reproduire Le Fonctionnement Hydrologique Du Bassin Versant Nakhla (Rif occidental, Maroc). *European Scientific Journal ESJ*, 15(5), 311-333.
- Touaibia, B. (2015). Manuel pratique d'hydrologie. 2^e edition. Depot légal: 1023-2015. ISBN: 978-9947-0-4272-4.
- USACE (2021). Hydrologic Engineering Center. Hydrologic Modeling System User's Manual, version 4.8. 624p.
- Viglione, A., Parajka, J., Rogger, M., Salinas, J. L., Laaha, G., Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins—Part 3: Runoff signatures in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6), 2263-2279.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288.
- Yang, Xue, et al. (2018). Runoff prediction in ungauged catchments in Norway: comparison of regionalization approaches. *Hydrology Research*, 49.2: 487-505.
- Yang, X., Li, F., Qi, W., Zhang, M., Yu, C., & Xu, C. Y. (2023). Regionalization methods for PUB: a comprehensive review of progress after the PUB decade. *Hydrology Research*, 54(7), 885-900.
- Xin, Z., Shi, K., Wu, C., Wang, L., & Ye, L. (2019). Applicability of hydrological models for flash flood simulation in small catchments of hilly area in China. *Open Geosciences*, 11(1), 1168-1181.
- Zaibak, I., & Meddi, M. (2022). Simulating streamCow in the CheliA basin of west northern Algeria using the SWAT model. <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01777-x>

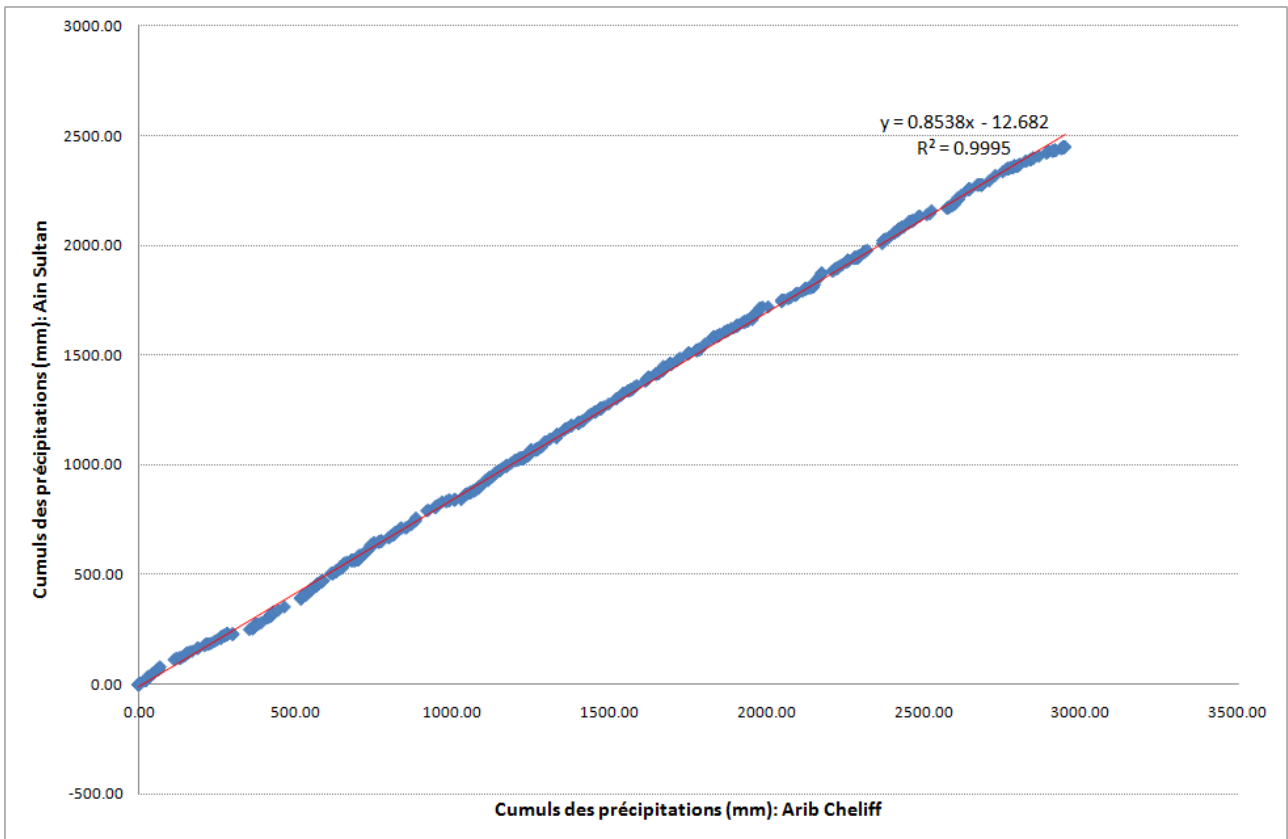
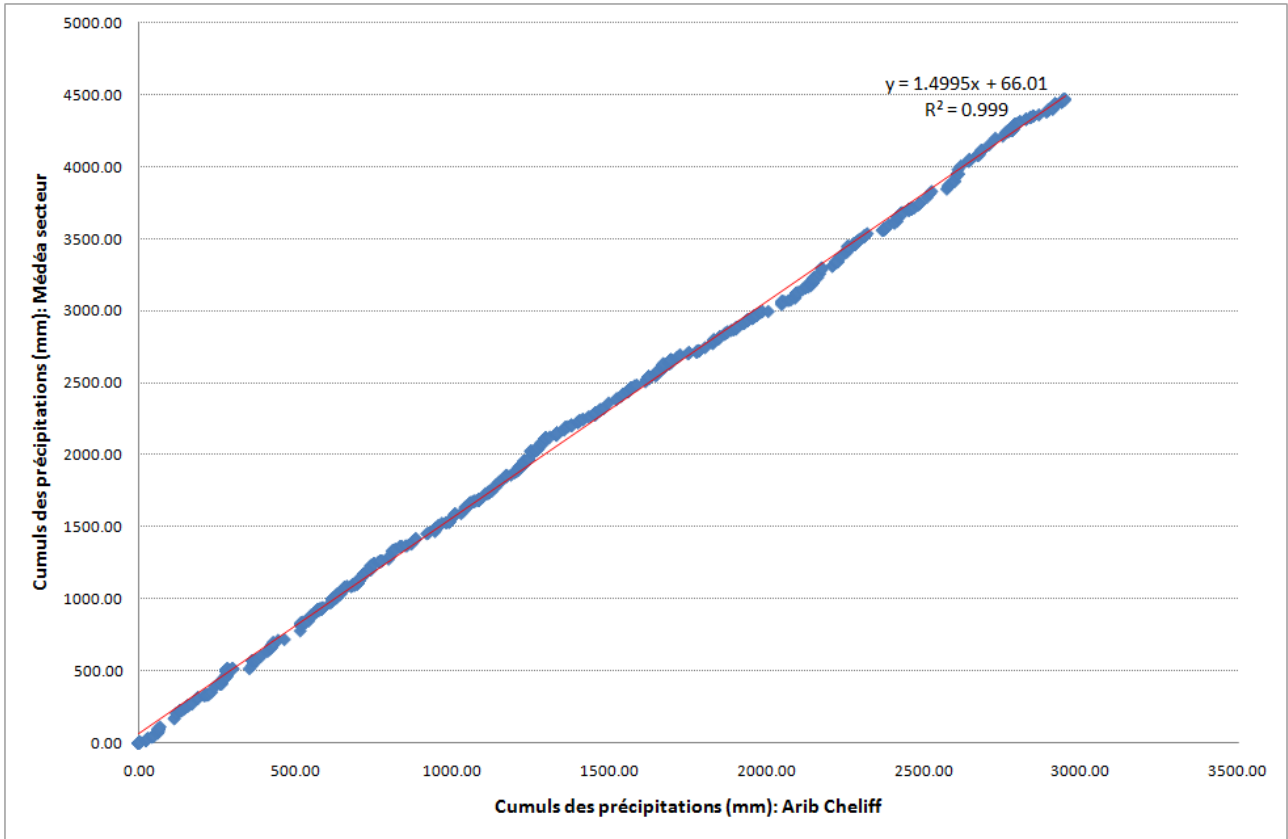
Références bibliographiques

- Zamoum, S., & Souag-Gamane, D. (2019). Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4487-9>
- Zhang, Y. Q., & Chiew, F. H. S. (2009). Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia. In 18th World IMACS/MODSIM Congress (pp. 3442-3448).
- Zodekon, R. A., Ogouwale, R., & Odoulami, L. (2021). Caractérisation des contraintes climatiques dans la commune de Dassa-Zoume au Bénin. *Water Sciences and Environment Technologies*, 6(2), 32-45.

Annexes

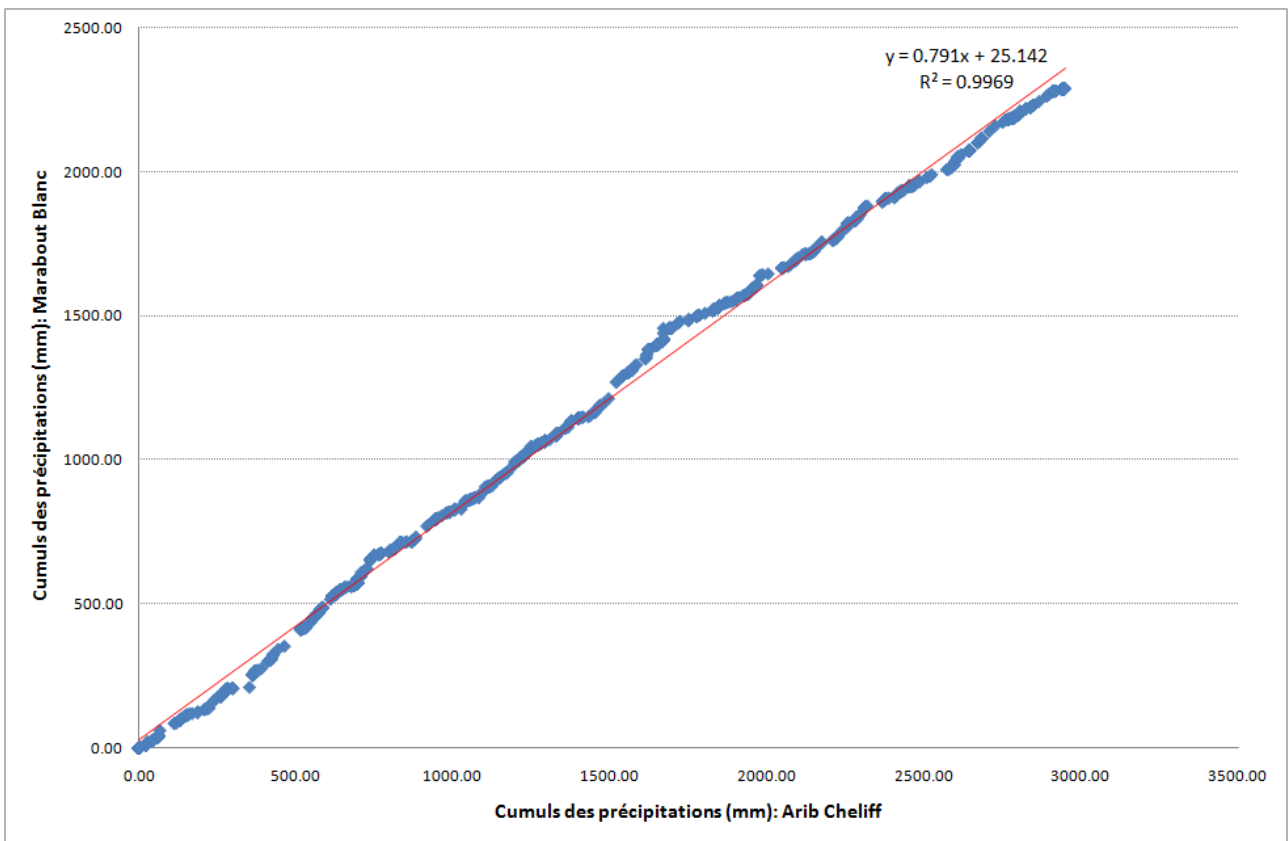
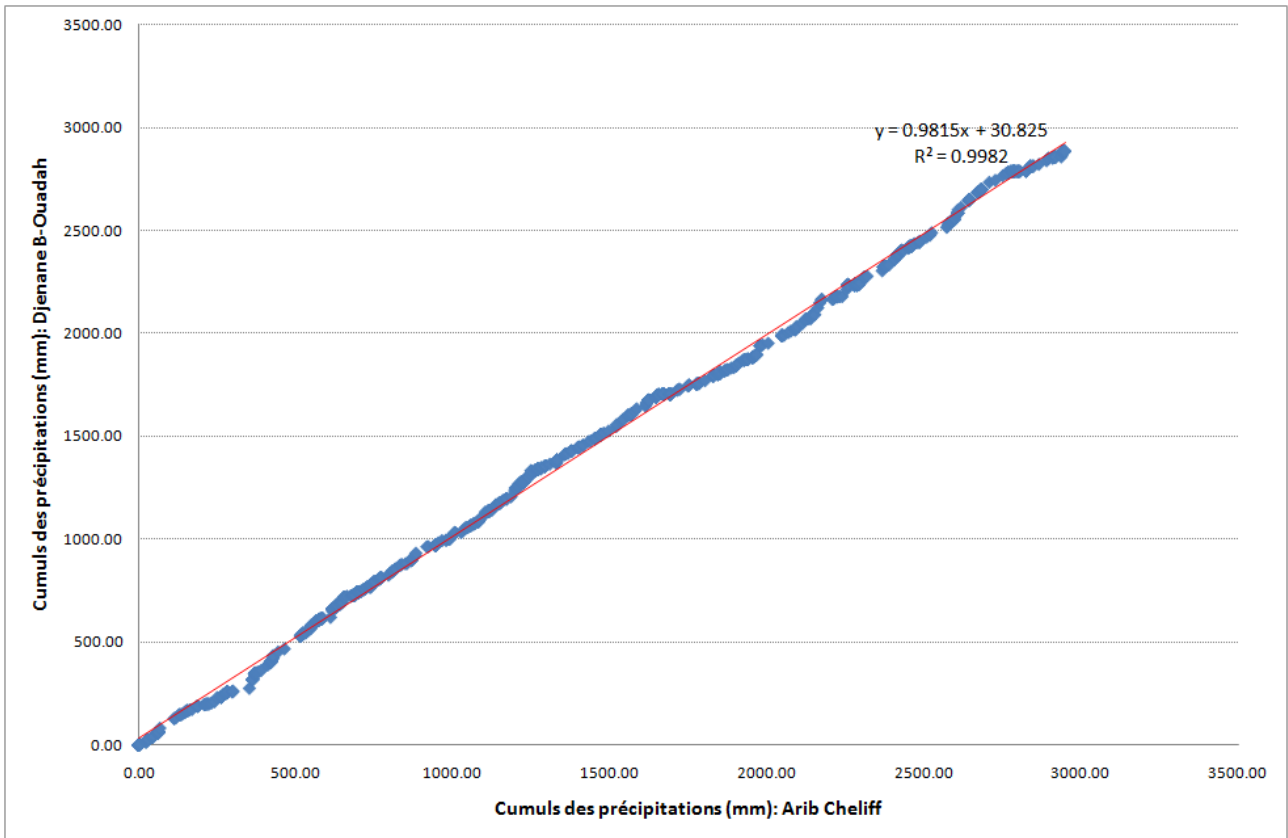
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



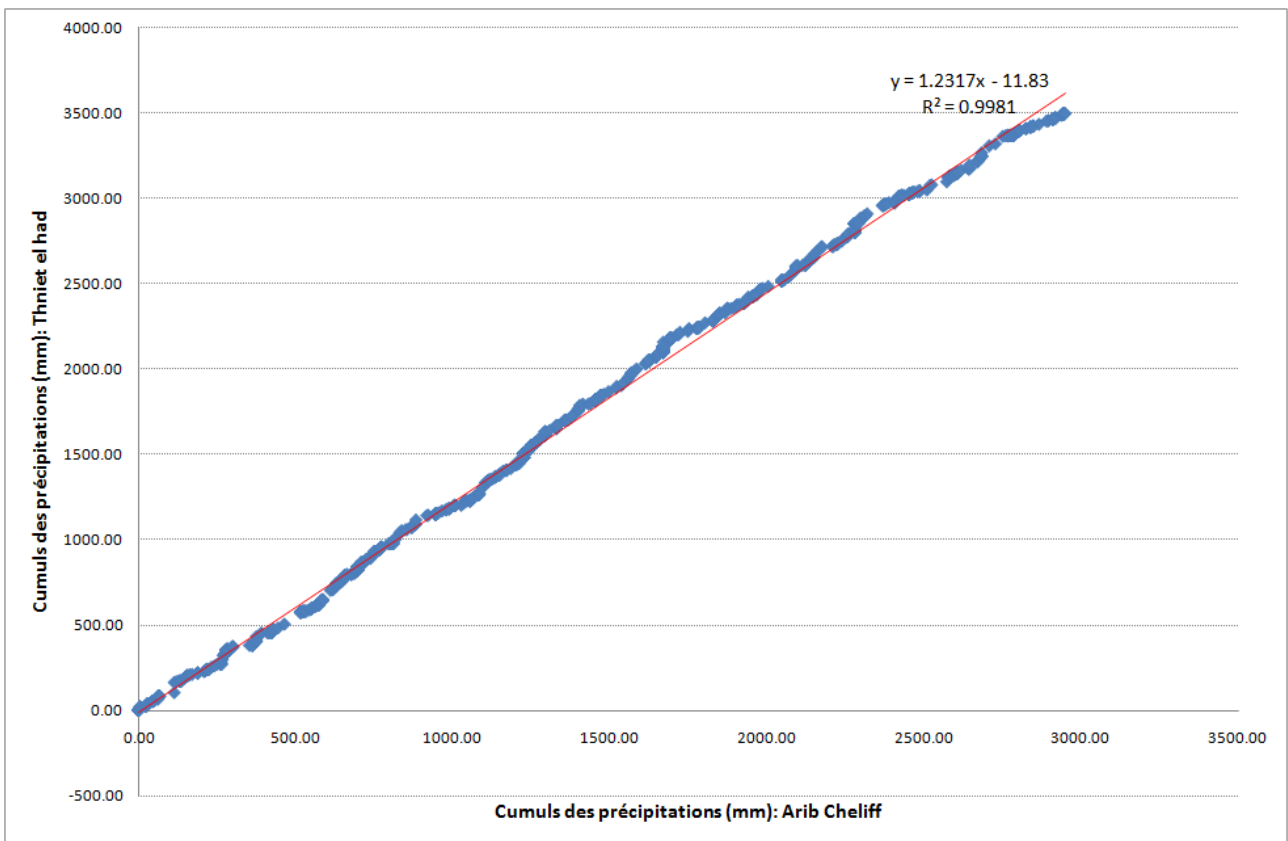
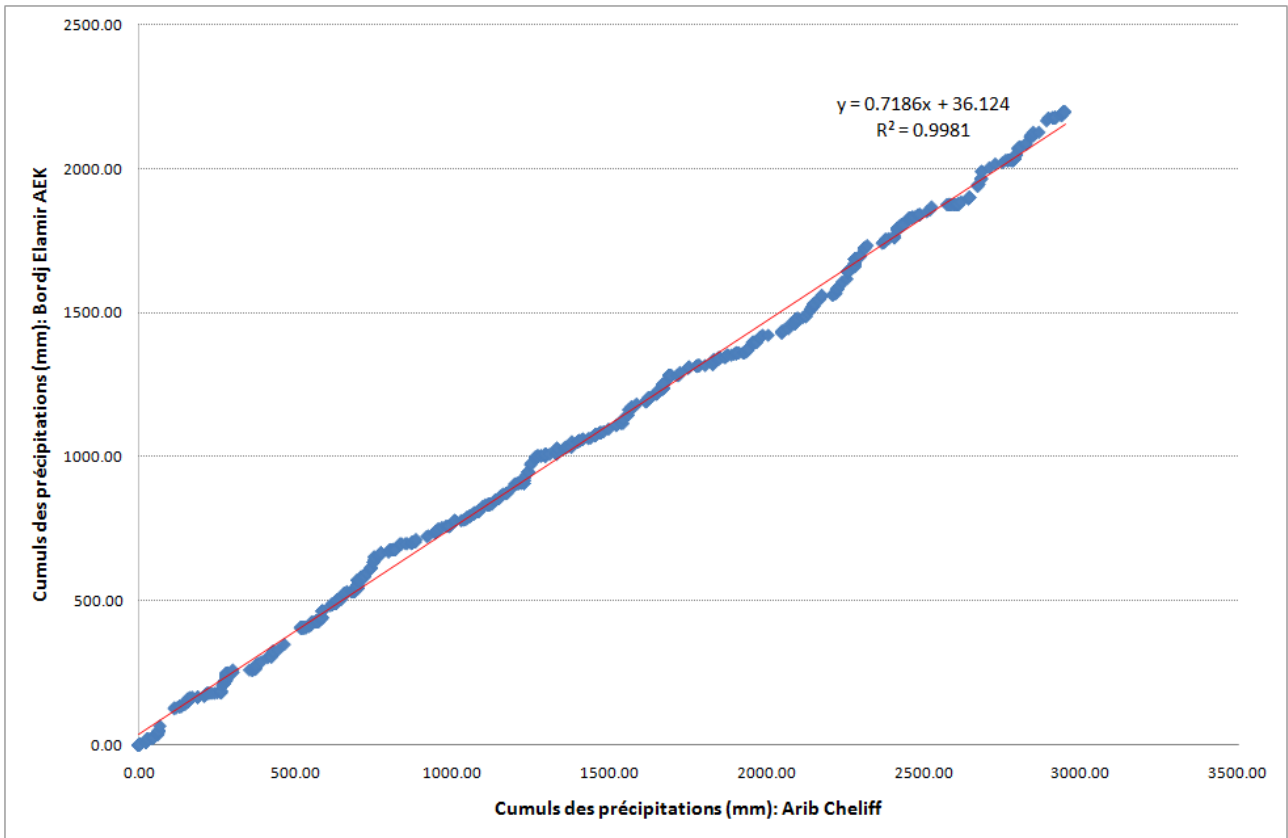
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



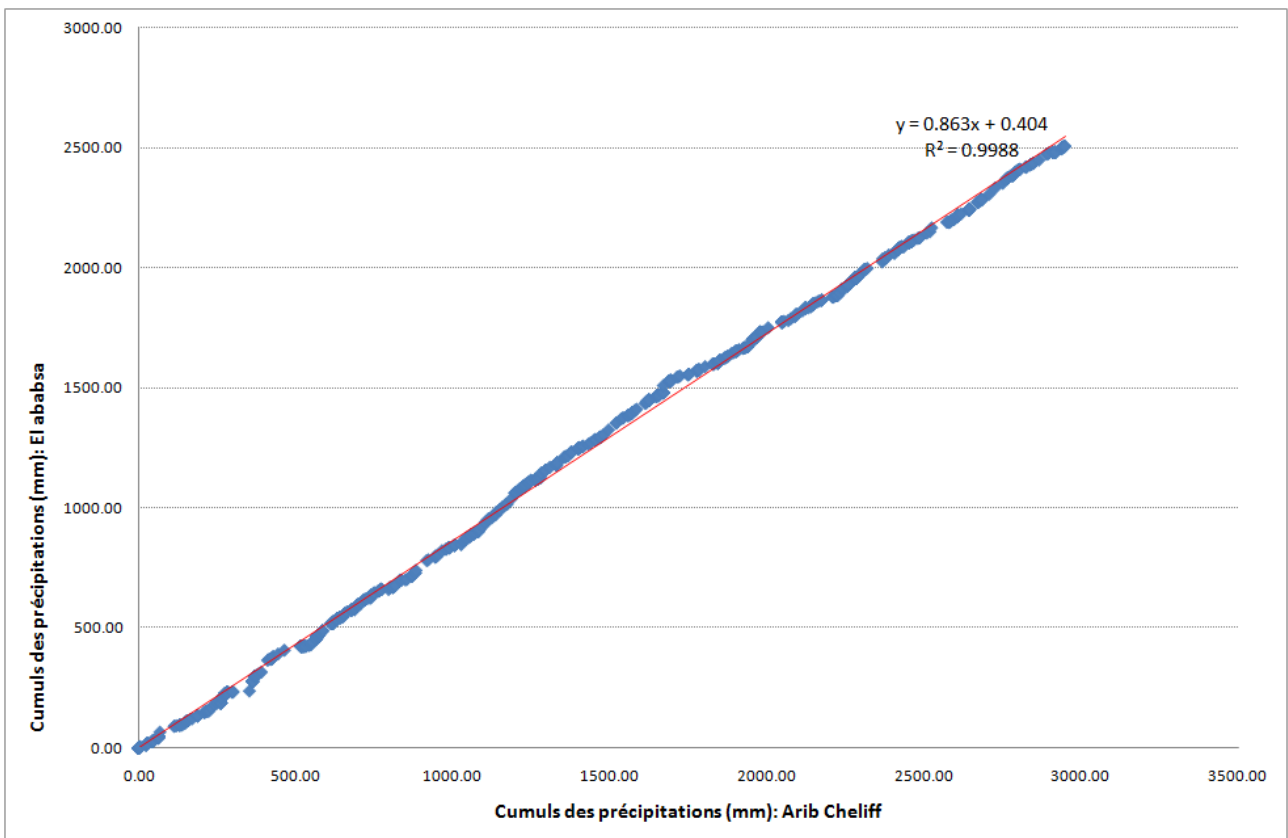
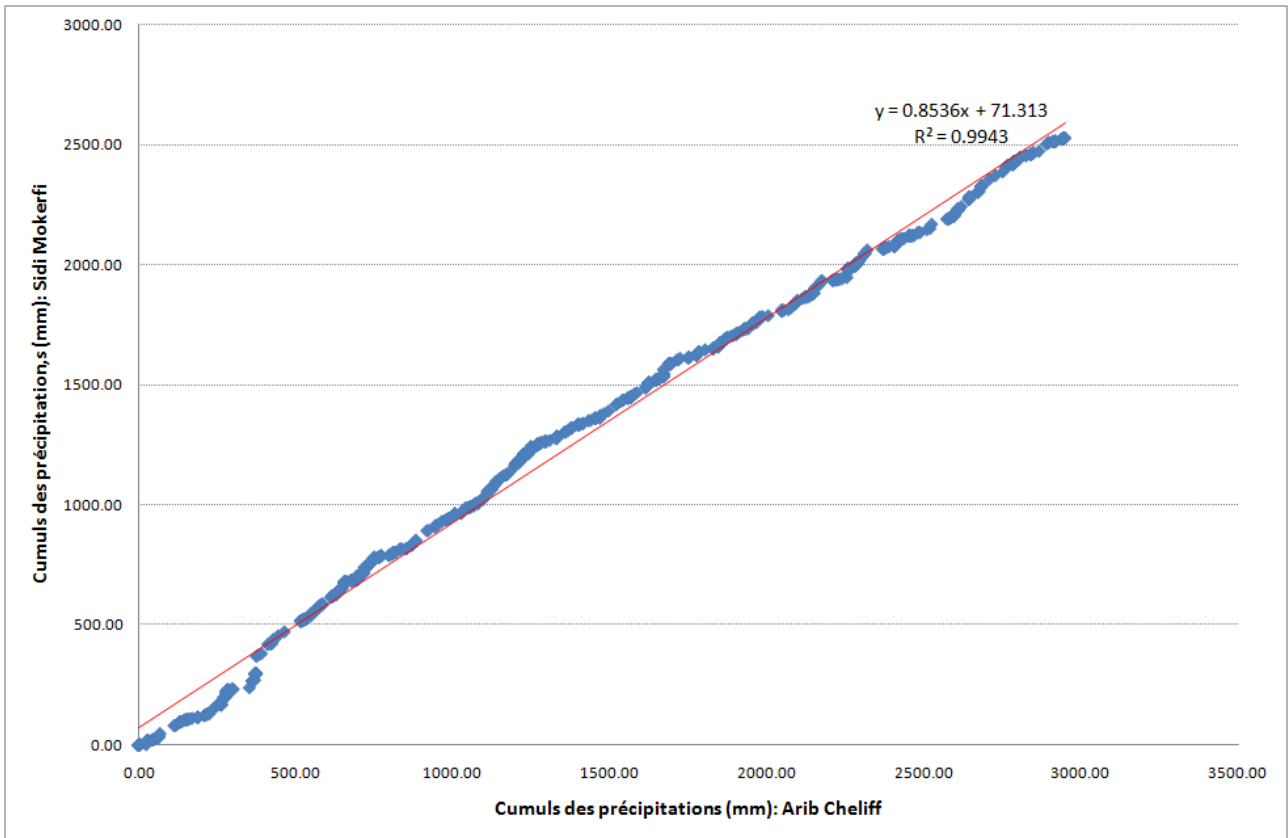
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



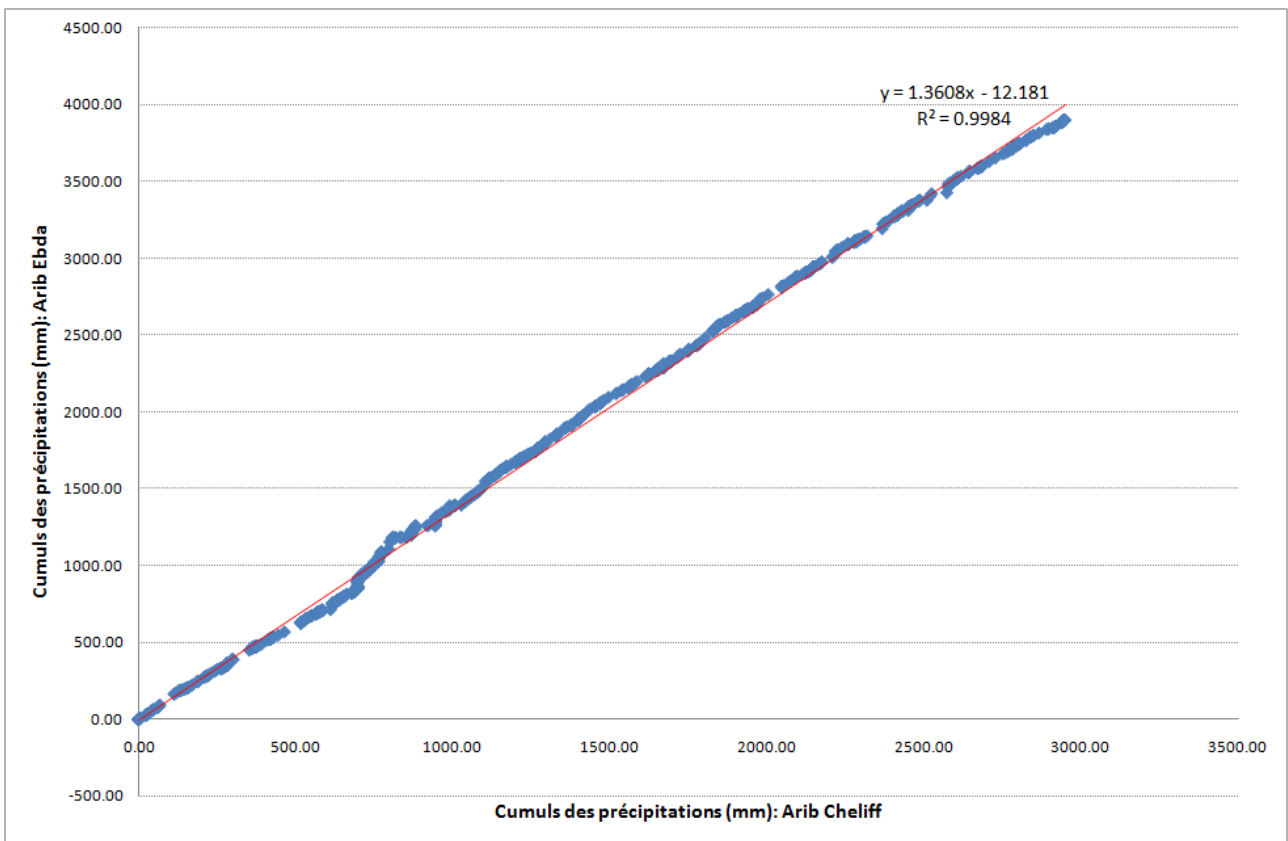
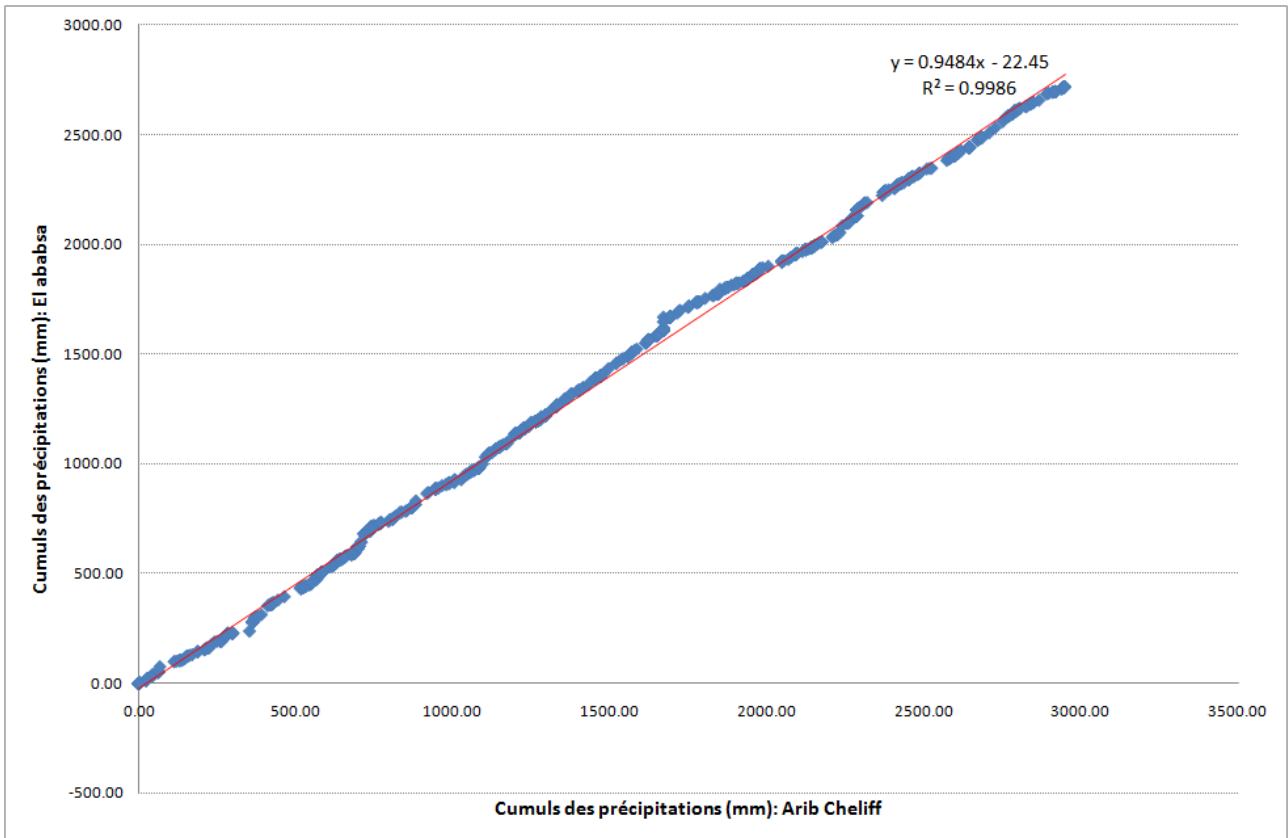
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



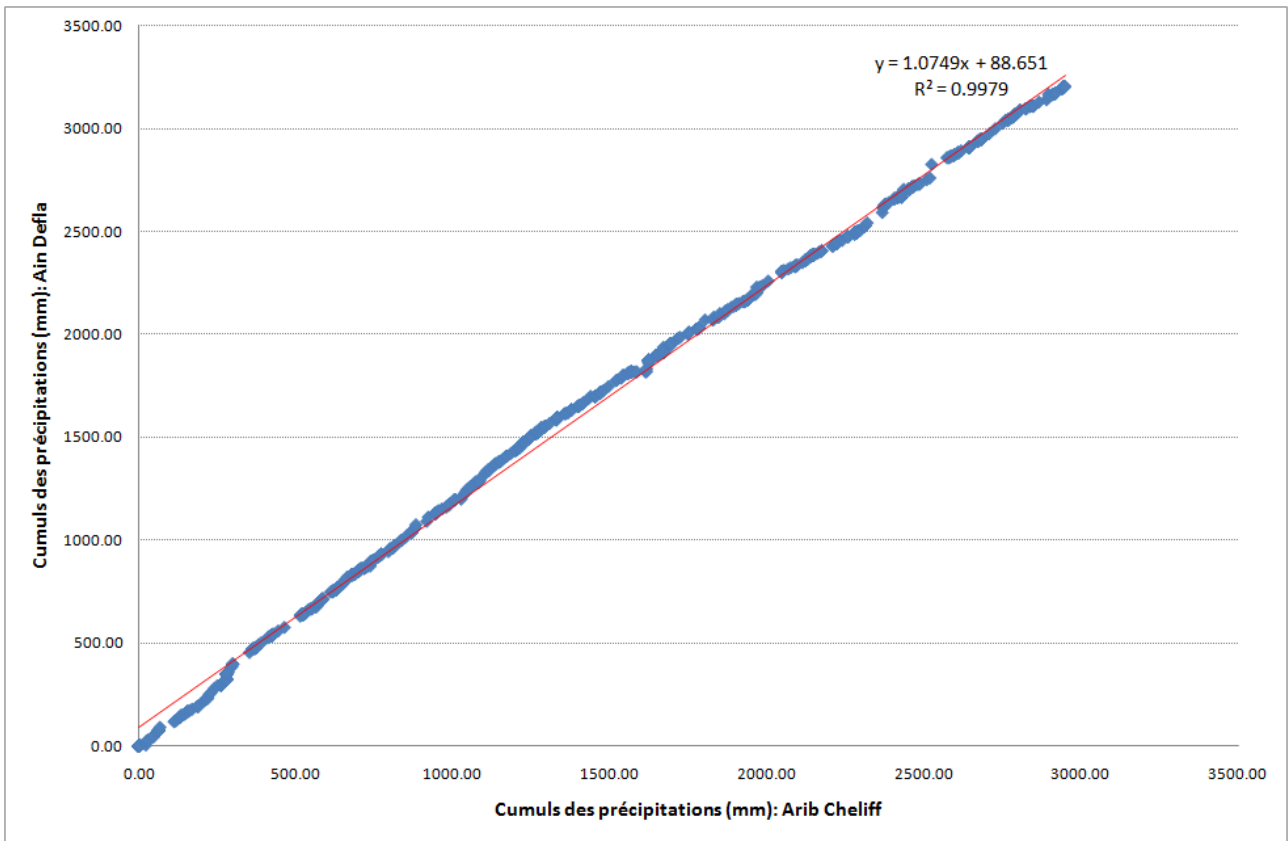
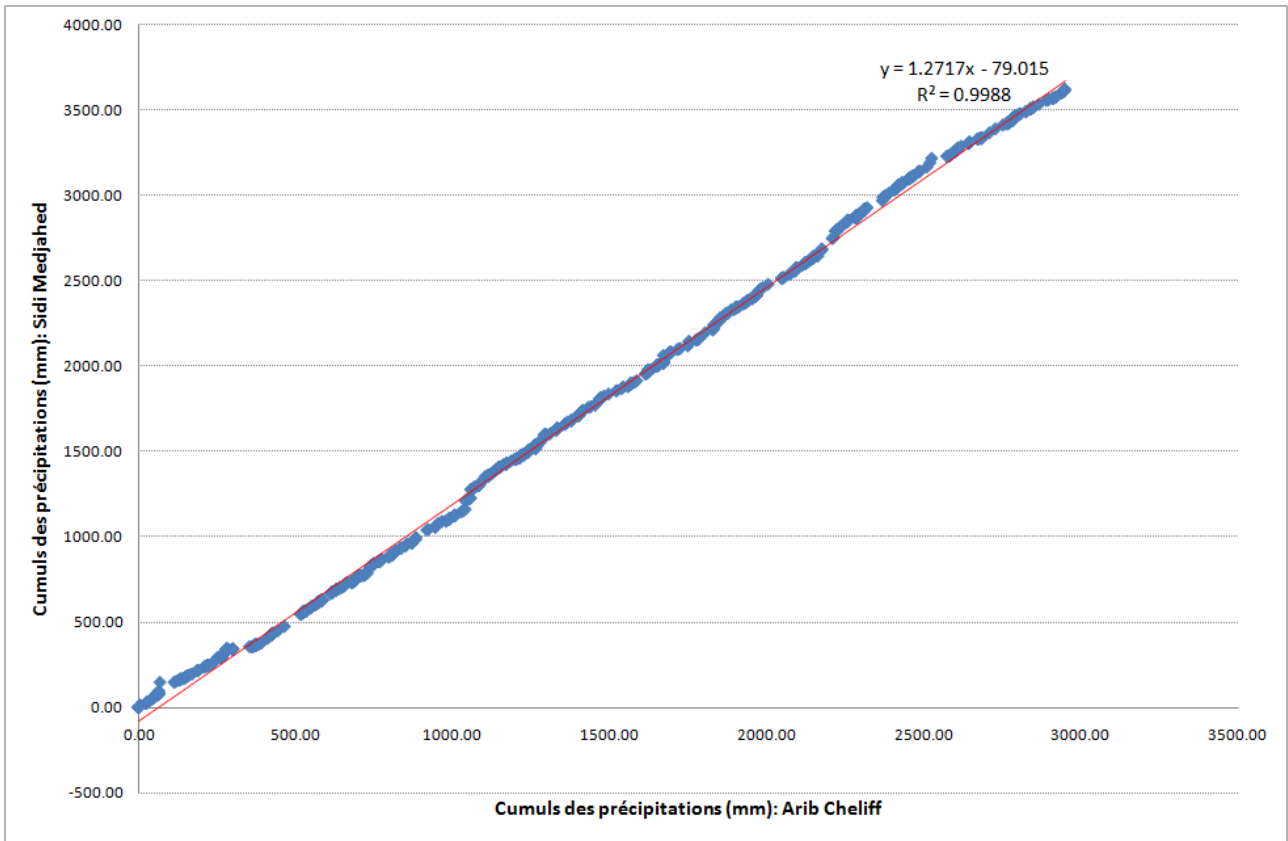
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



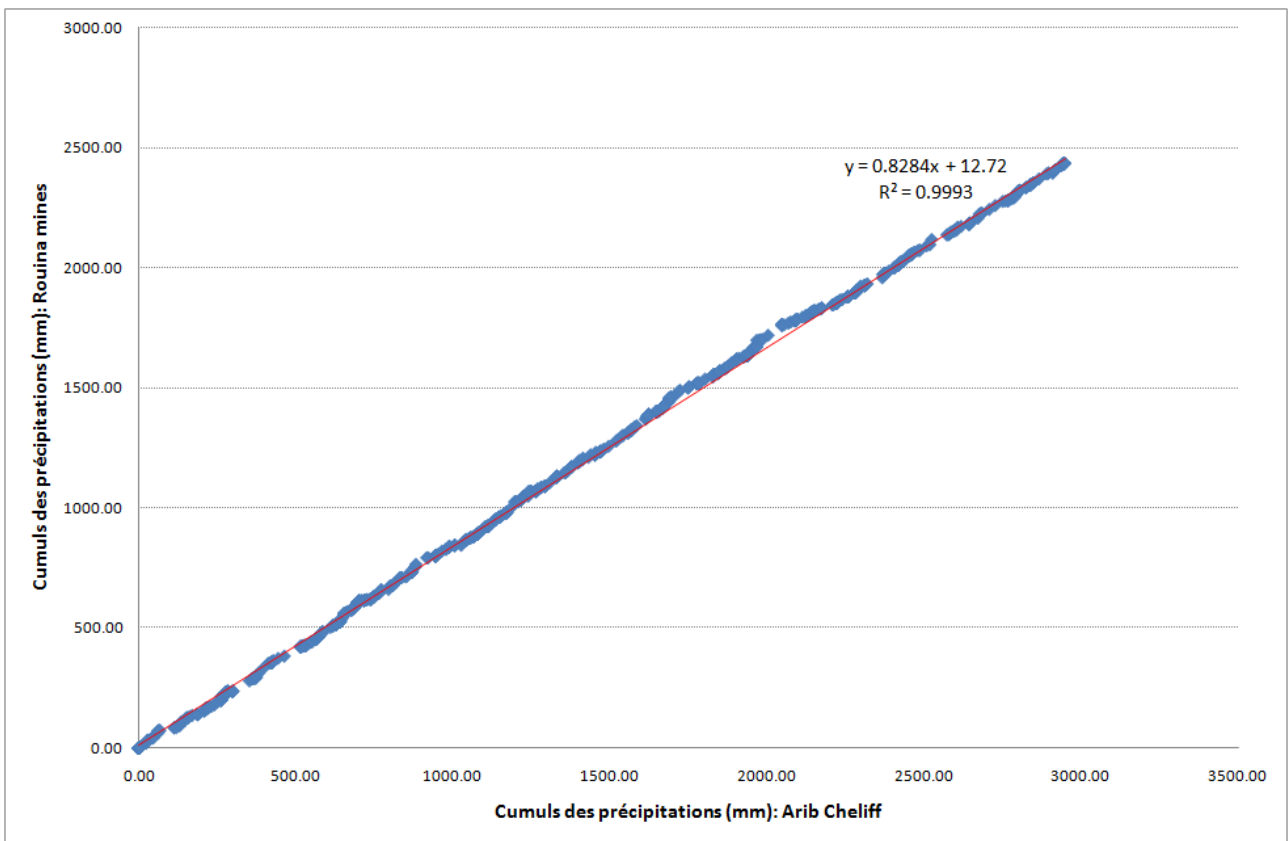
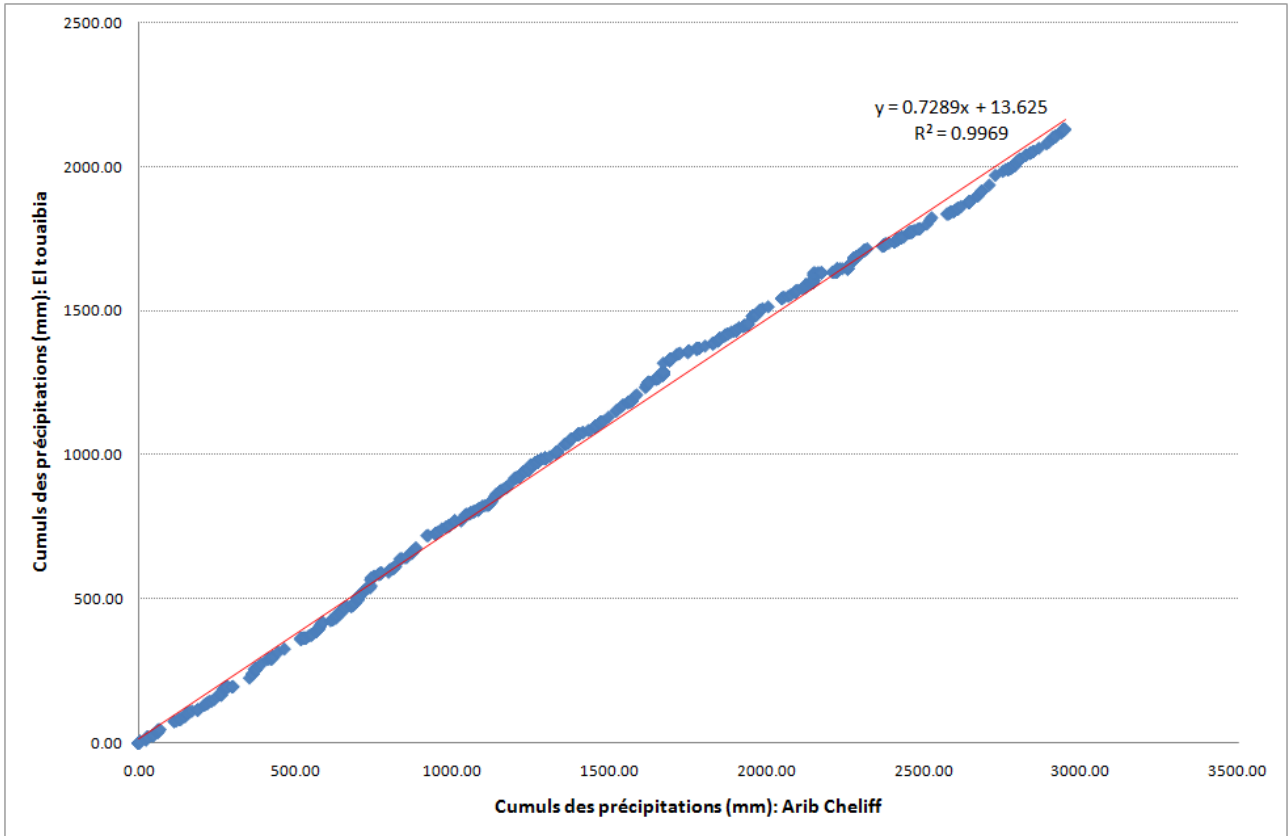
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



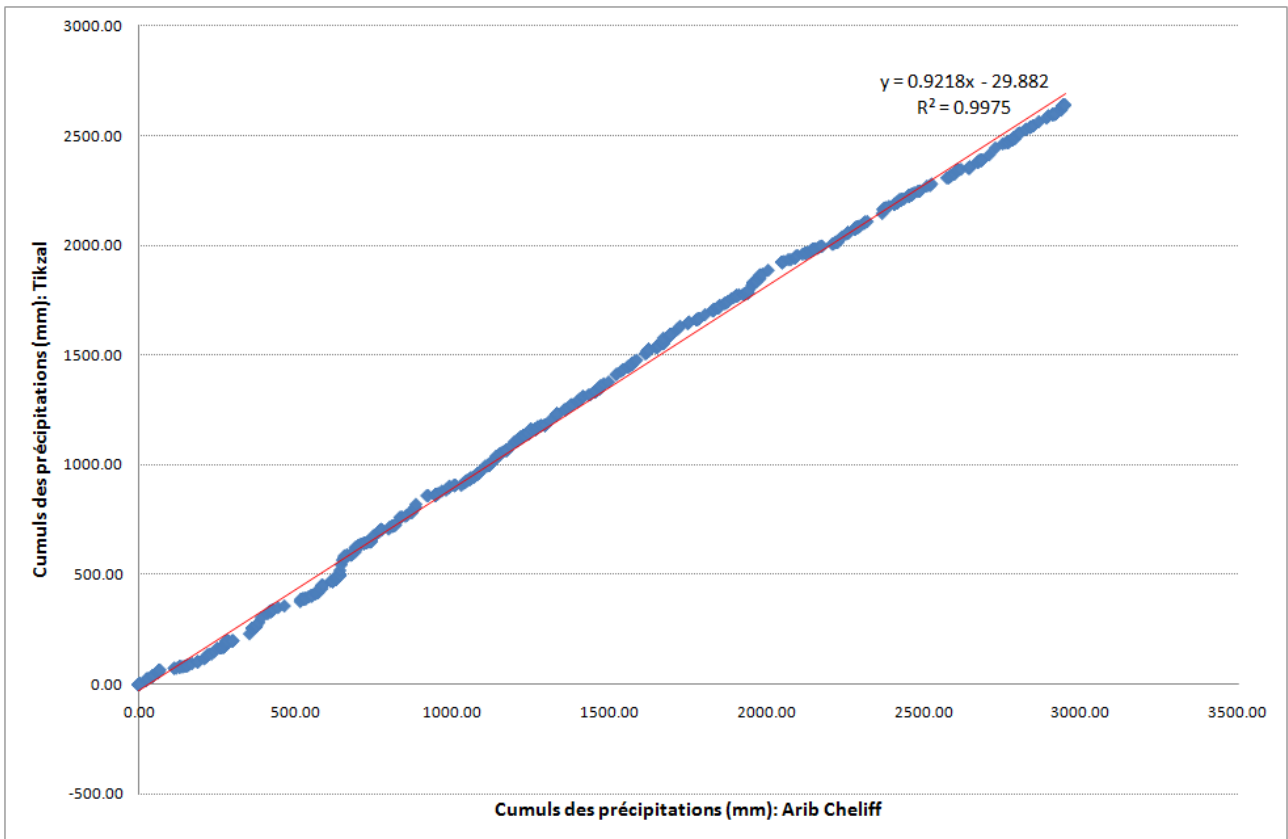
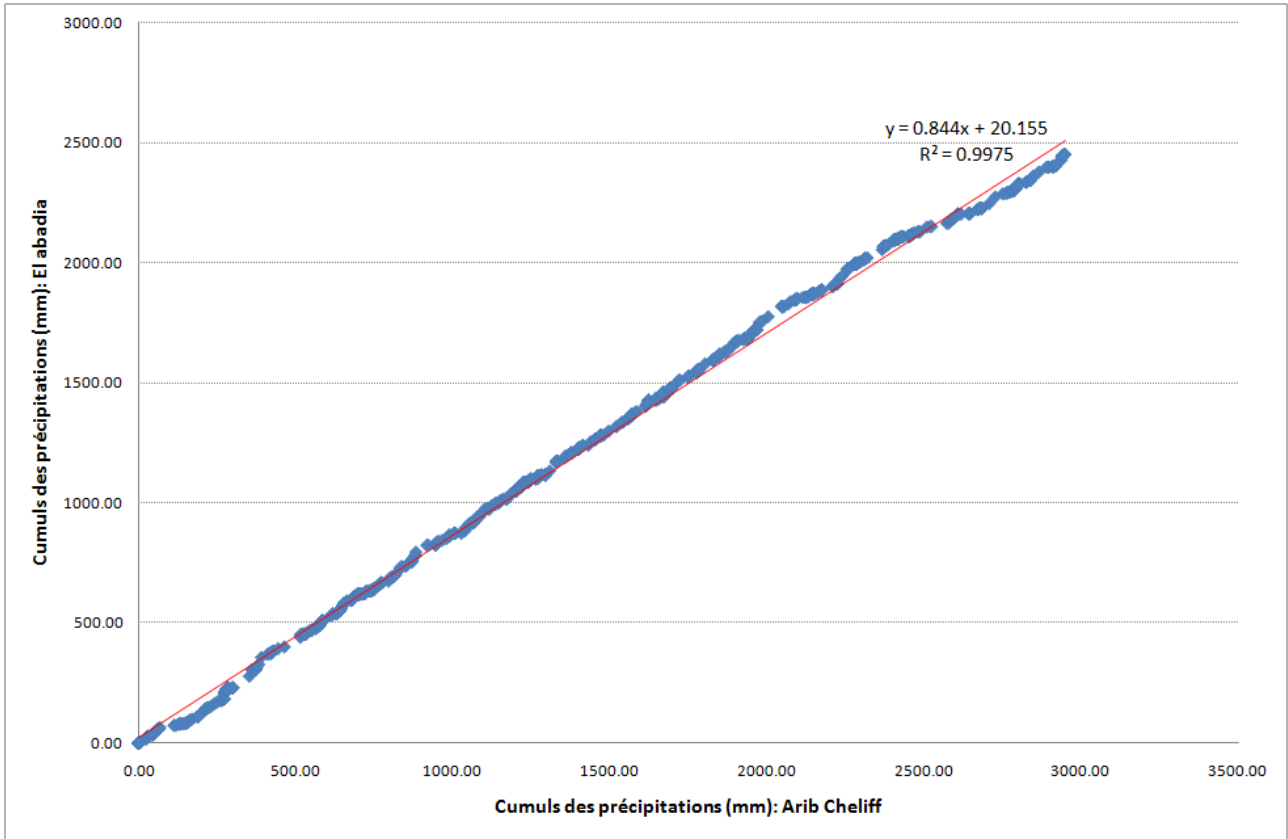
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



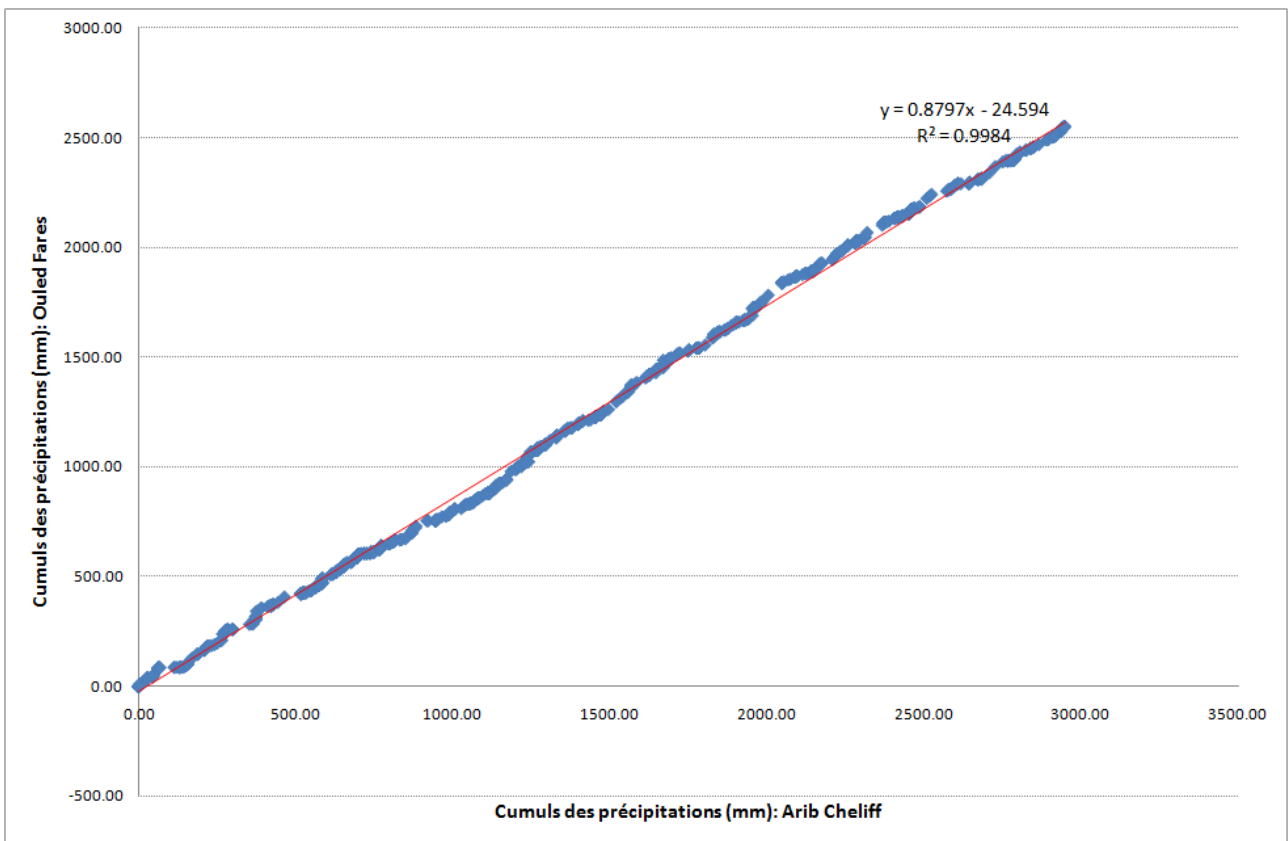
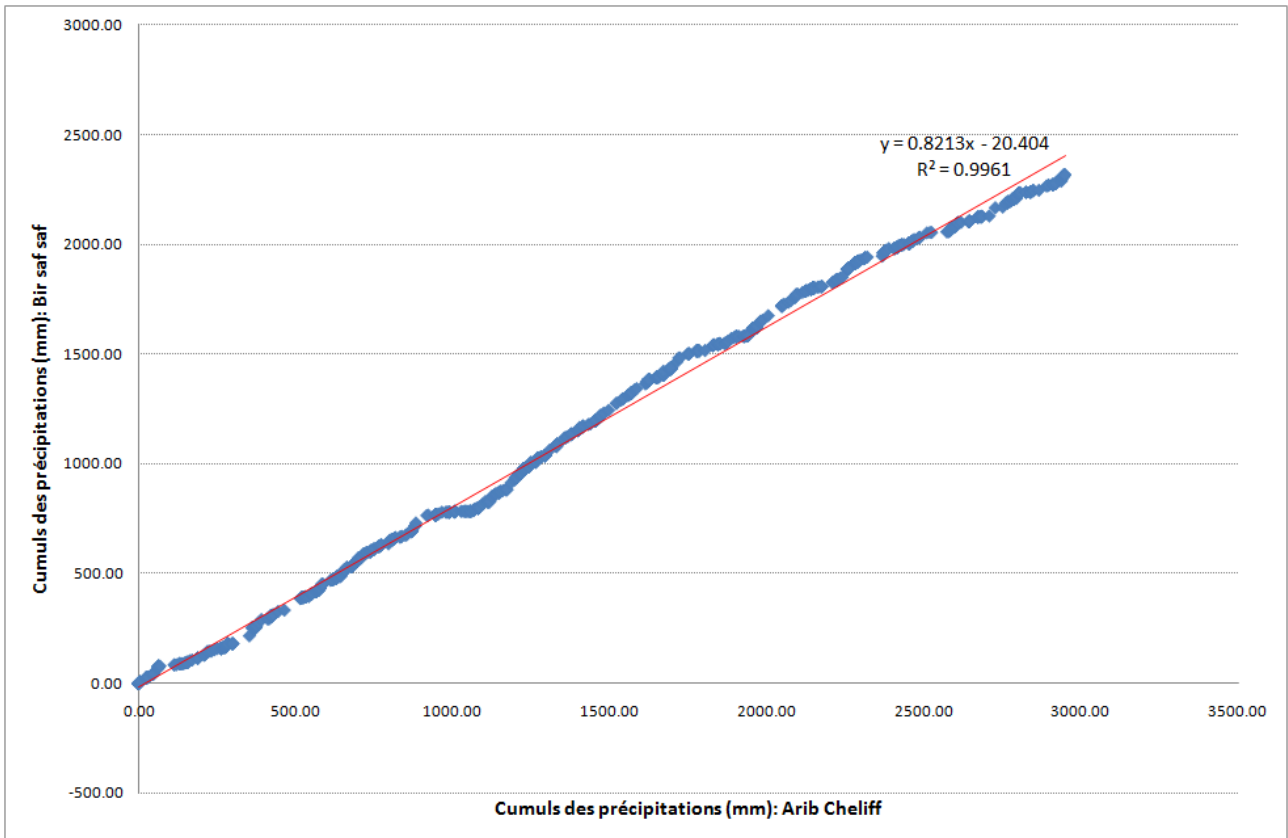
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



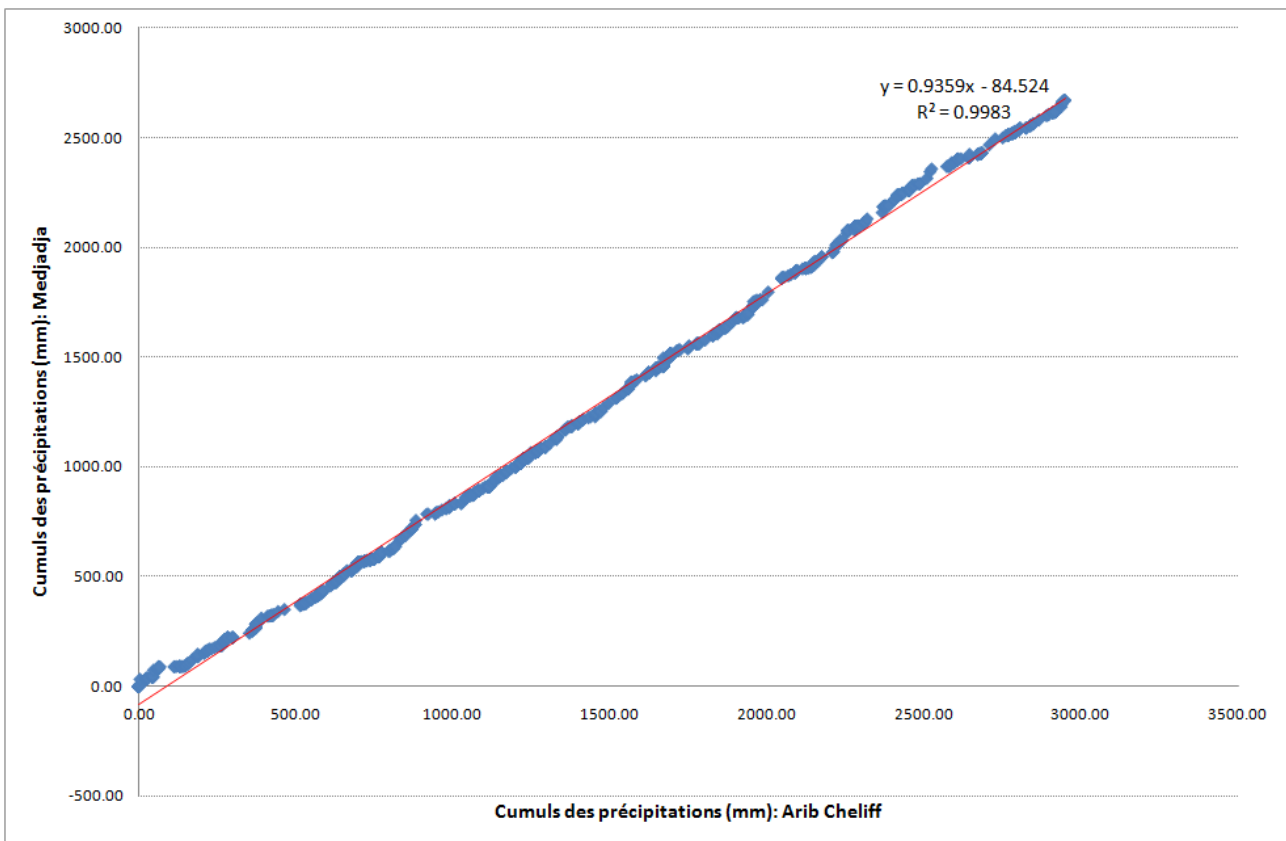
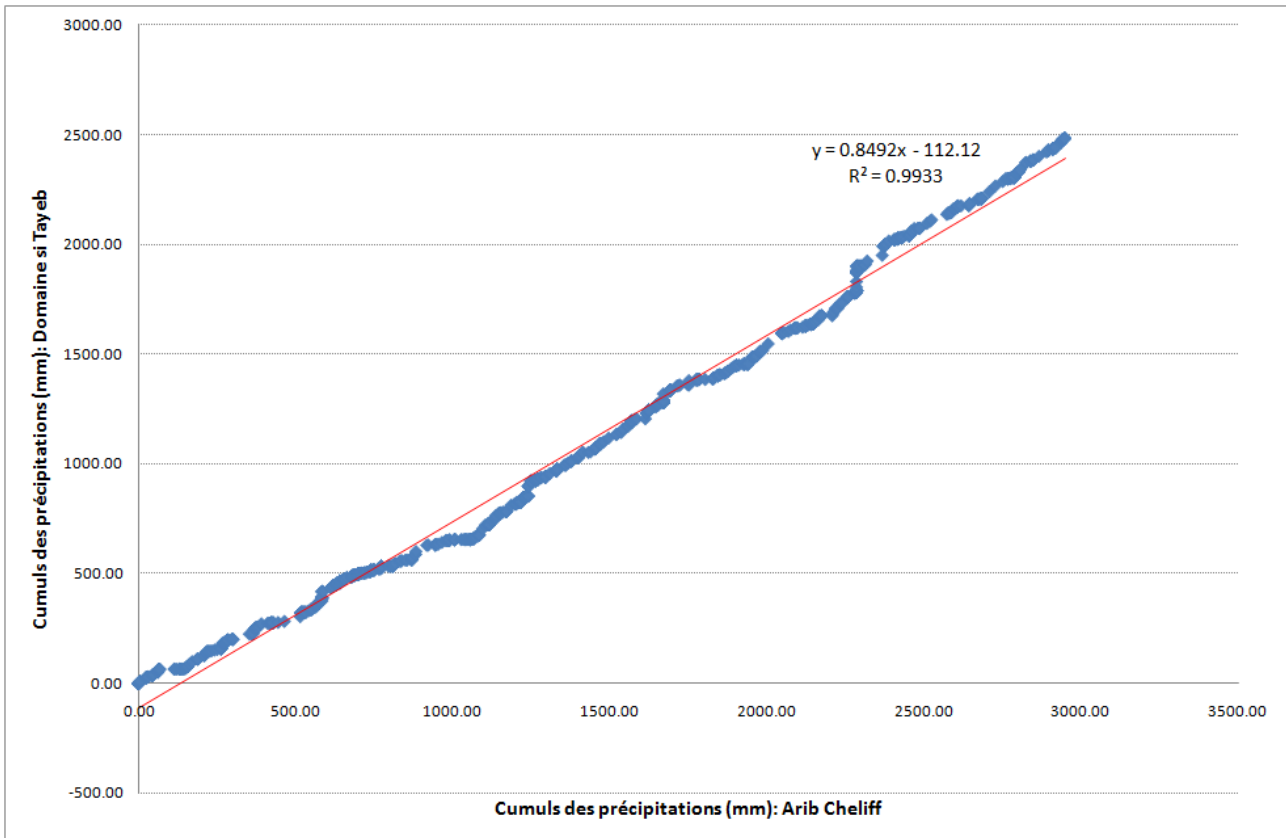
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



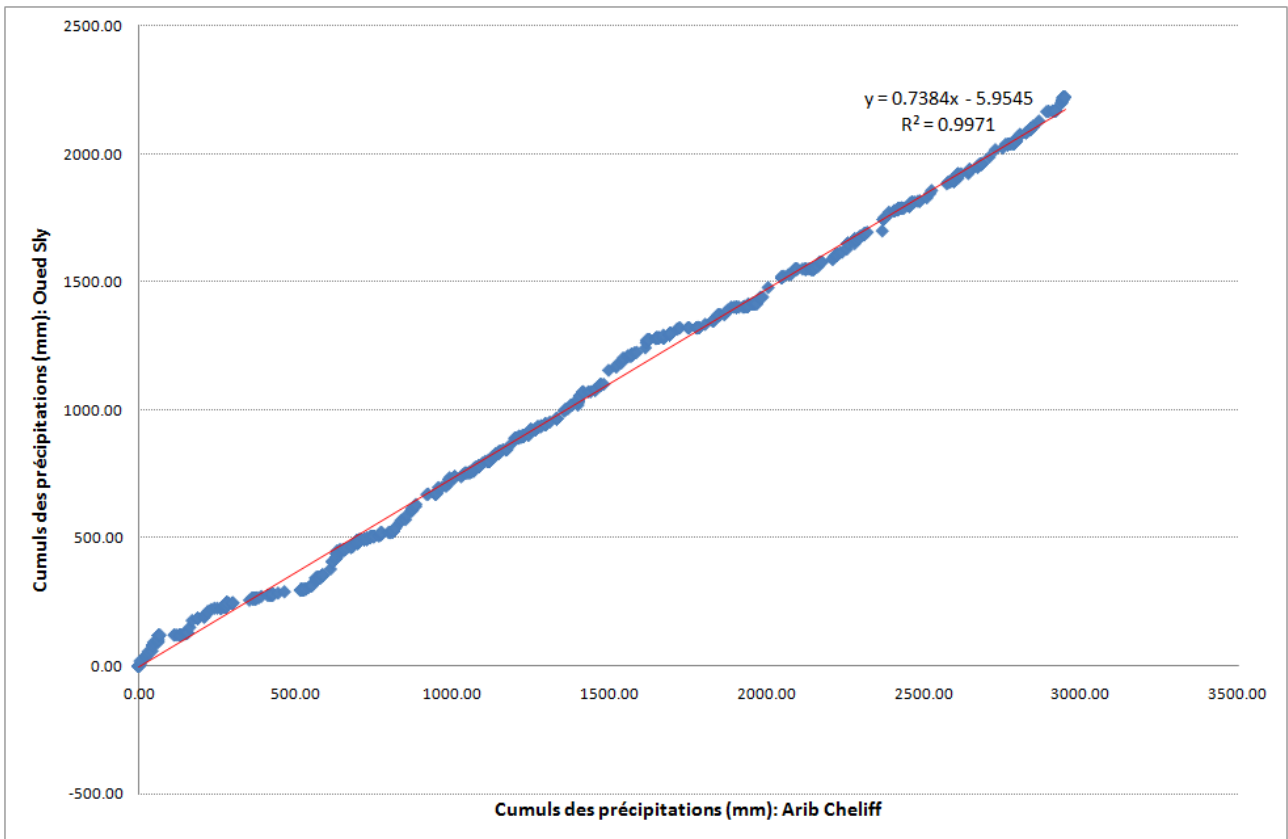
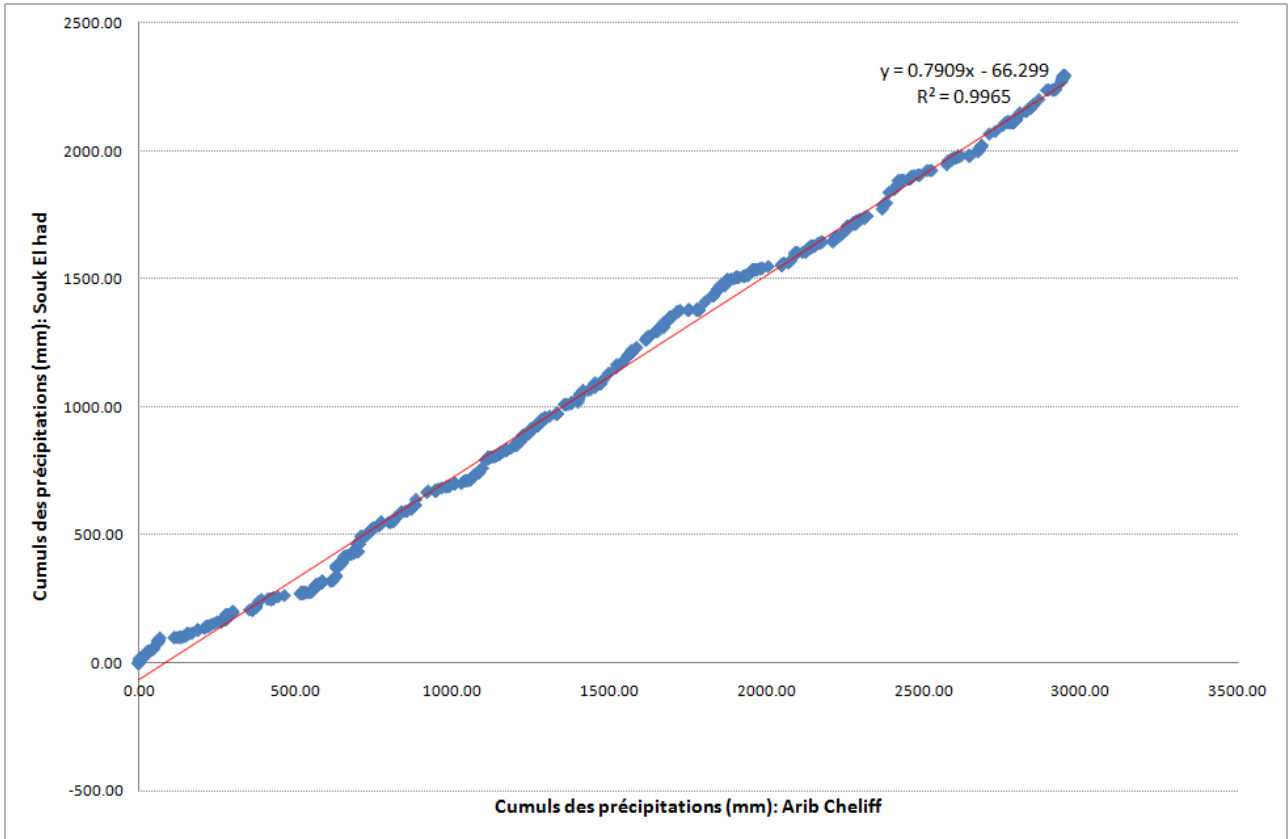
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



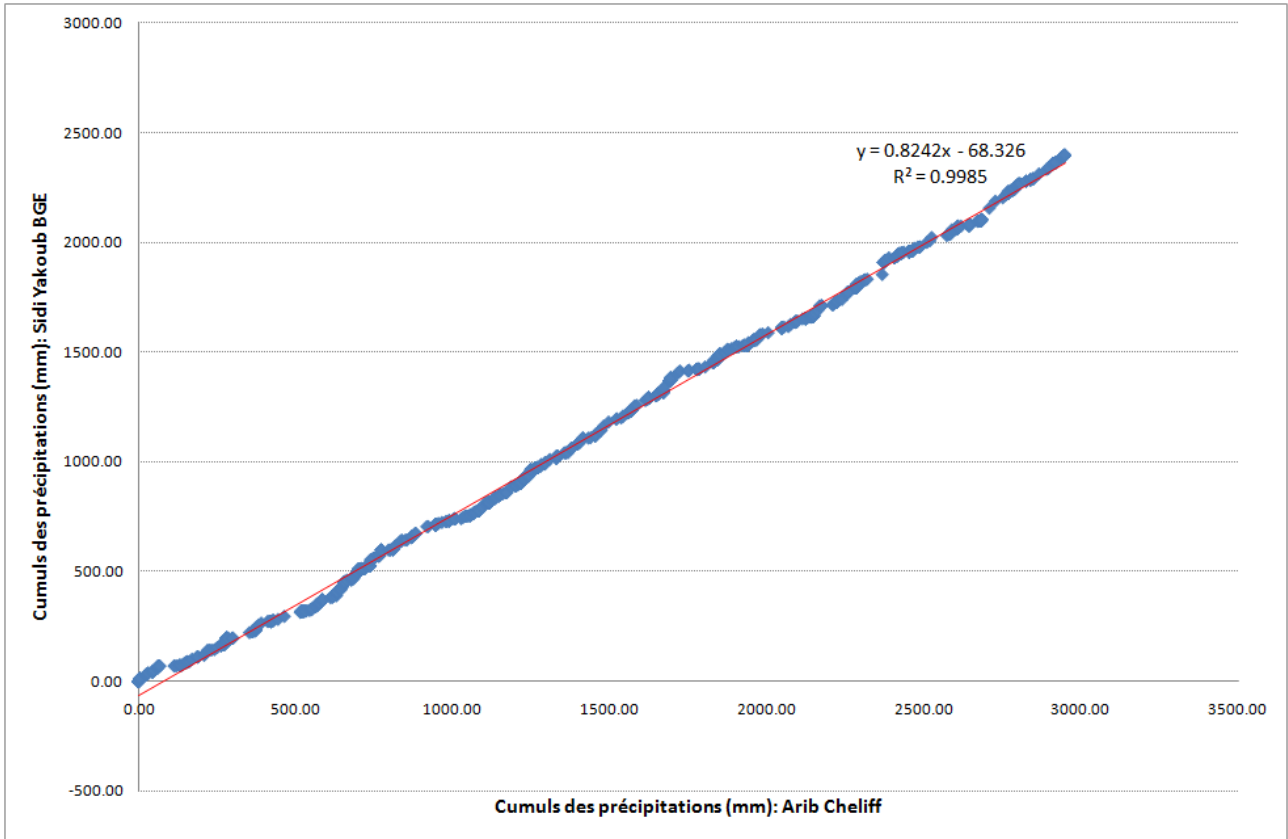
Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations



Annexe 01

Annexe 01 : Analyse des pluies journalières par la méthode de doubles masses entre la station de référence de Arib Cheliff et les autres stations

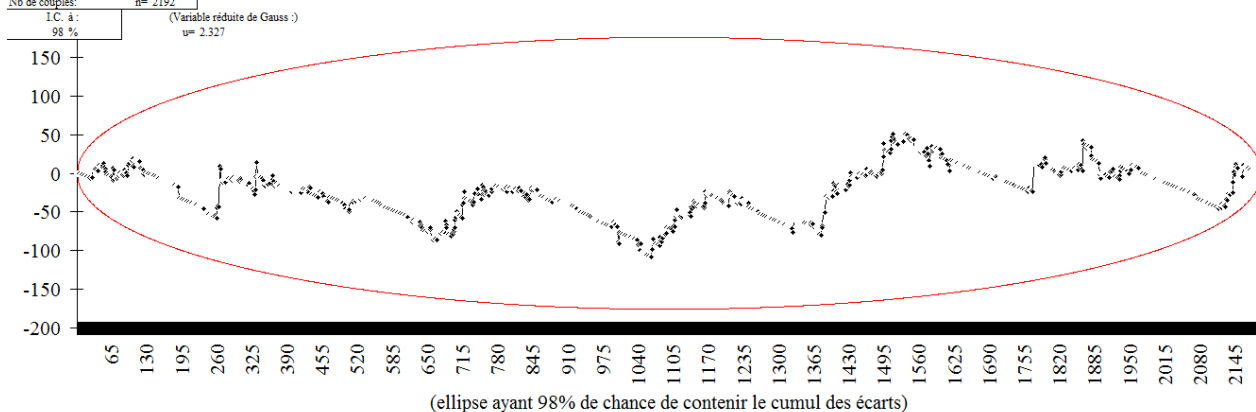


Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

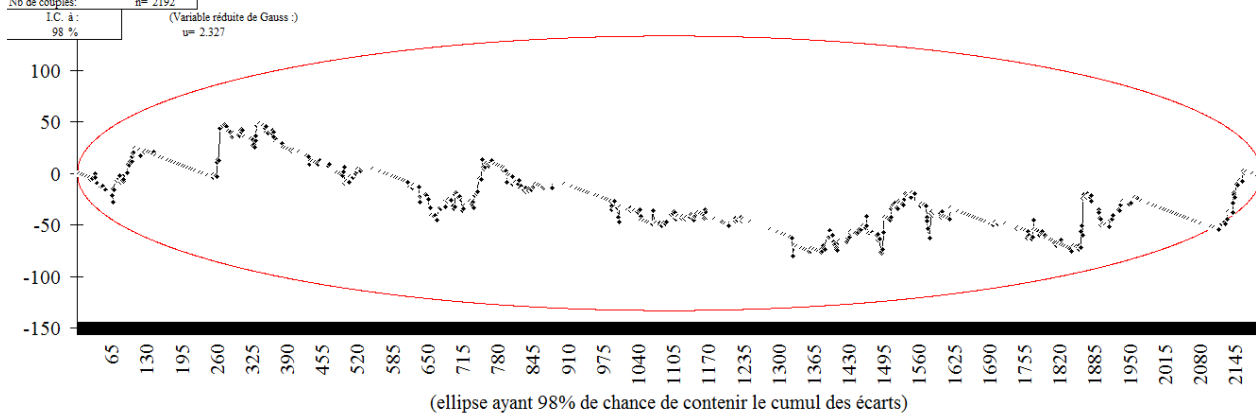
Droite de rég.:	a= 0.52826	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.2699	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.68859	Moy. VR = 2.0363949
E.T. des rés.:	Seps= 3.22707	E.T. VR = 5.8008314
Nb de couples:	n= 2192	

Station 011509



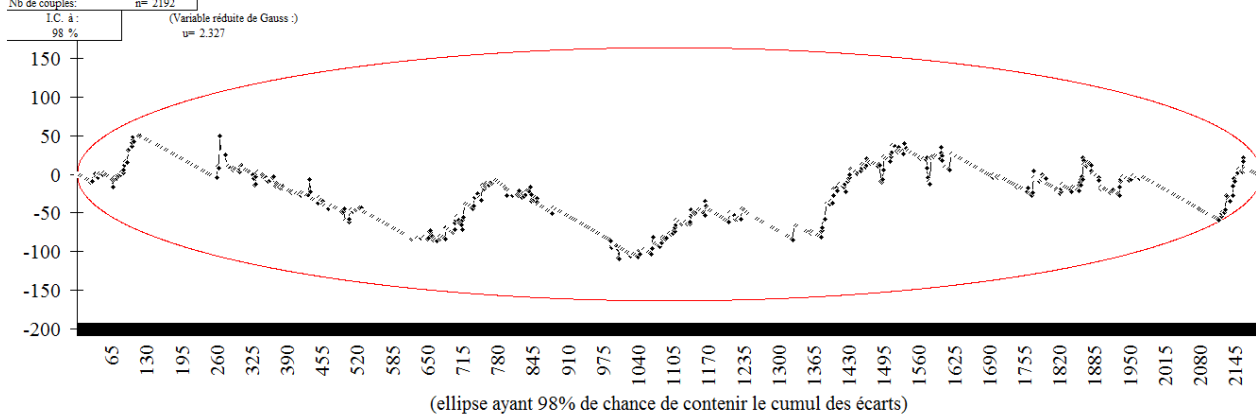
Droite de rég.:	a= 1.02704	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.19957	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.83569	Moy. VR = 1.11587591
E.T. des rés.:	Seps= 2.44402	E.T. VR = 3.62107828
Nb de couples:	n= 2192	

Station 011512



Droite de rég.:	a= 0.72369	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.3933	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.73795	Moy. VR = 1.31592153
E.T. des rés.:	Seps= 3.00322	E.T. VR = 4.53788929
Nb de couples:	n= 2192	

Station 011514

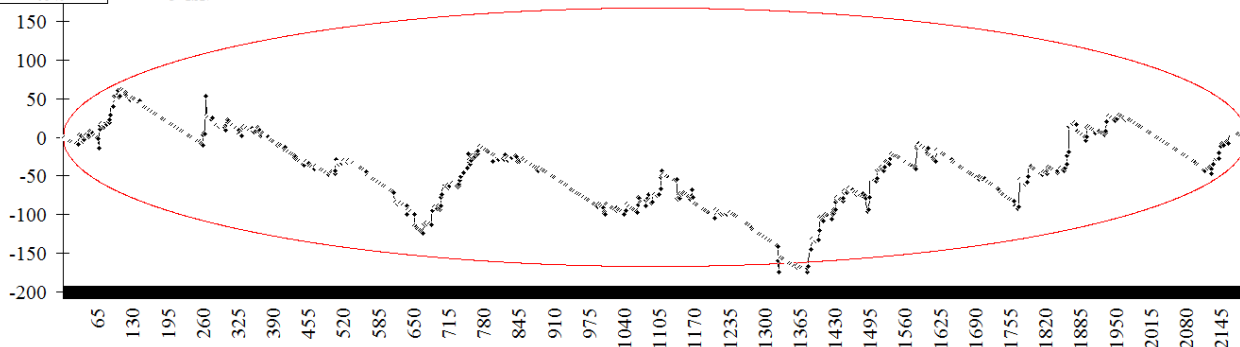


Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

Droite de rég :	a= 0.83784	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.44986	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor. :	r= 0.72477	Moy. VR = 1.0442062
E.T. des rés. :	Seps= 3.06615	E.T. VR = 3.75984856
Nb de couples :	n= 2192	
I.C. à :	(Variable réduite de Gauss :)	
98 %	u= 2.327	

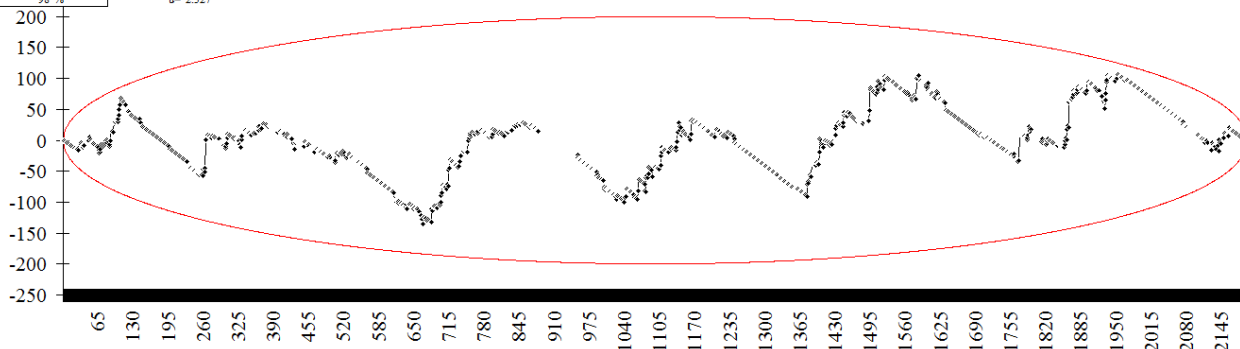
Station 011601



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég :	a= 0.69124	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.6528	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor. :	r= 0.56652	Moy. VR = 1.0028102
E.T. des rés. :	Seps= 3.66716	E.T. VR = 3.6472249
Nb de couples :	n= 2192	
I.C. à :	(Variable réduite de Gauss :)	
98 %	u= 2.327	

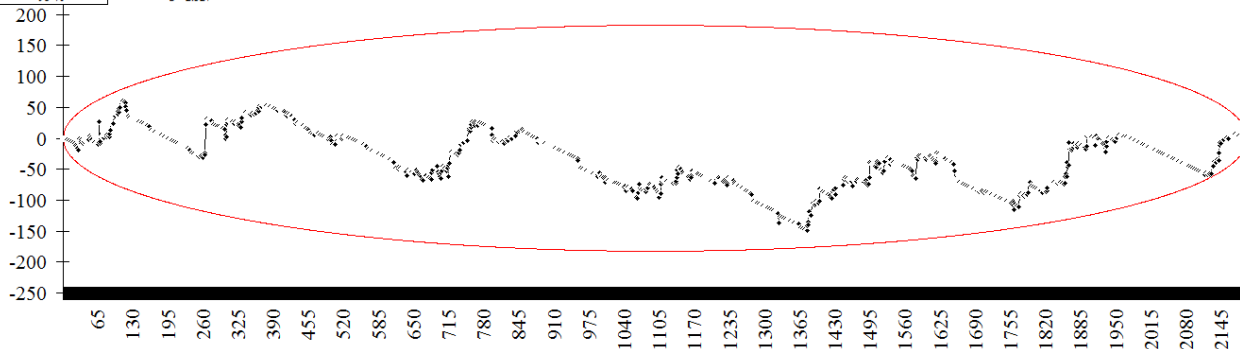
Station 011603



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég :	a= 0.58761	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.40809	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor. :	r= 0.65794	Moy. VR = 1.59549878
E.T. des rés. :	Seps= 3.53128	E.T. VR = 4.98283193
Nb de couples :	n= 2192	
I.C. à :	(Variable réduite de Gauss :)	
98 %	u= 2.327	

Station 011605



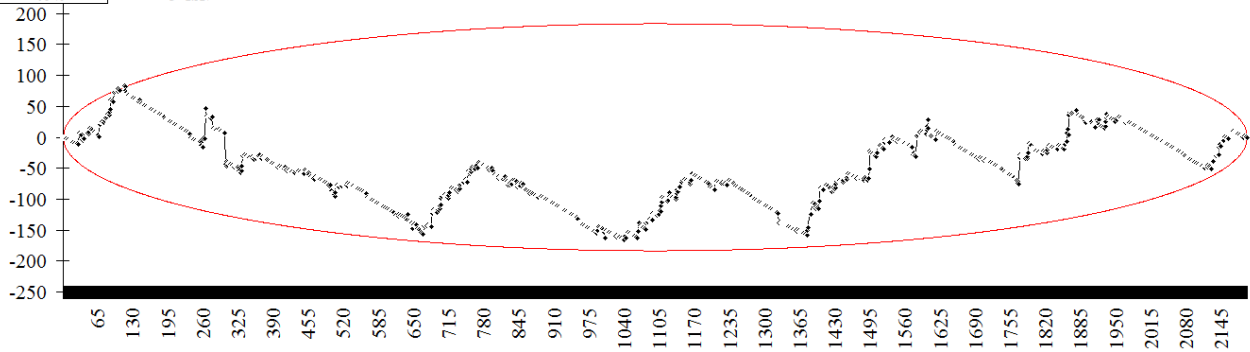
(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

Droite de rég:	a= 0.72998	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.50464	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.65348	Moy. VR = 1.15205292
E.T. des rés.:	Seps= 3.36855	E.T. VR = 3.98378793
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

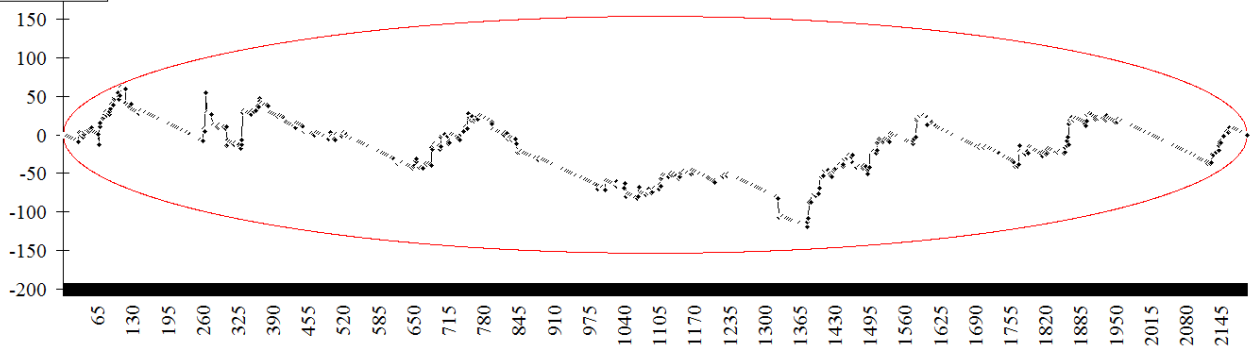
Station 011606



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég:	a= 0.88463	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.53338	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.77455	Moy. VR = 1.14425182
E.T. des rés.:	Seps= 2.81586	E.T. VR = 3.89542251
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

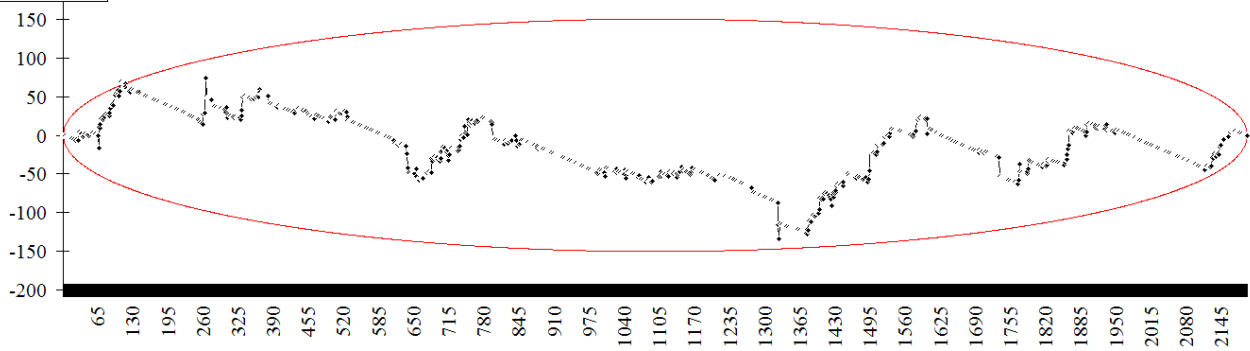
Station 011715



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég:	a= 0.84623	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.29633	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.78477	Moy. VR = 1.2399635
E.T. des rés.:	Seps= 2.75816	E.T. VR = 4.12698588
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 011718



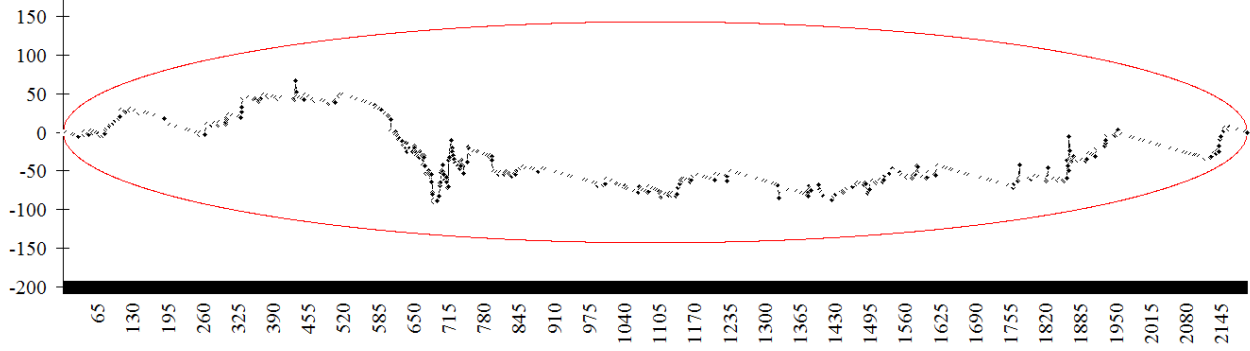
(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

Droite de rég:	a= 0.64403	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.1995	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.80784	Moy. VR = 1.77960766
E.T. des rés.:	Seps= 2.62297	E.T. VR = 5.58208316
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

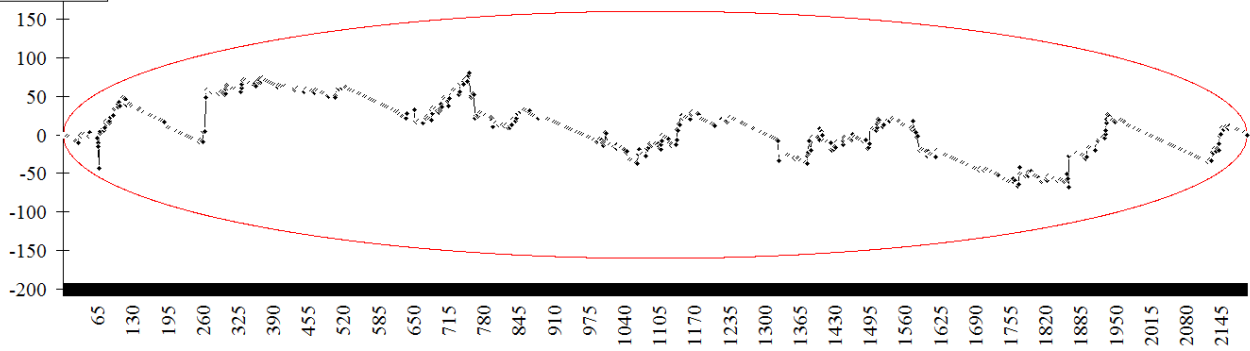
Station 011801



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég:	a= 0.62189	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.51891	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.75095	Moy. VR = 1.65095803
E.T. des rés.:	Seps= 2.93874	E.T. VR = 5.37372863
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

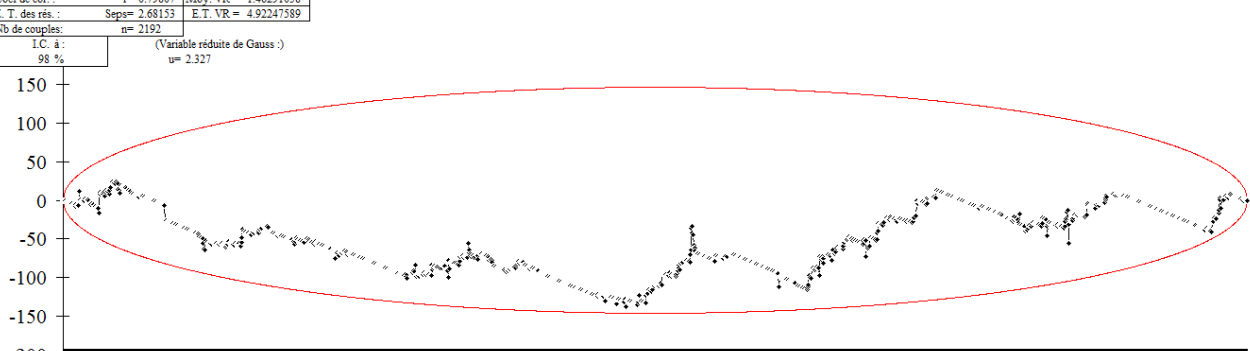
Station 011803



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég:	a= 0.7215	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.29014	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.79807	Moy. VR = 1.46291058
E.T. des rés.:	Seps= 2.68153	E.T. VR = 4.92247589
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 011804



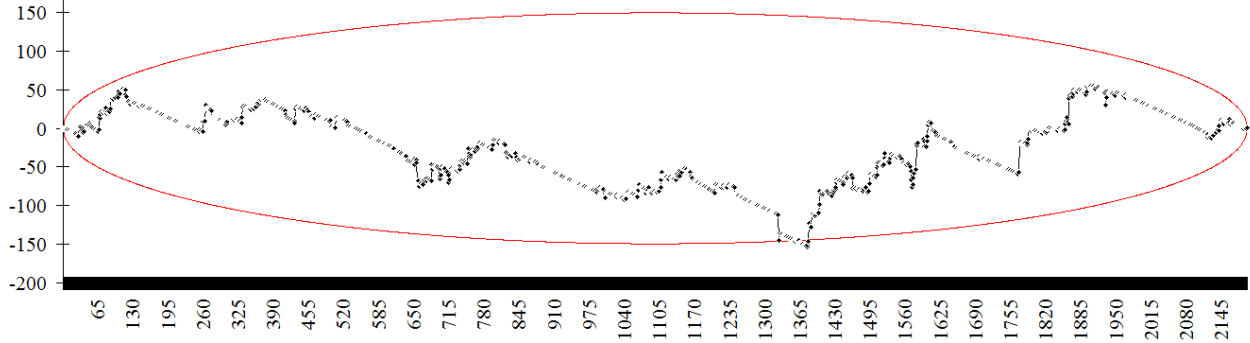
(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

Droite de rég.:	a= 1.0616	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.31443	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.78769	Moy. VR = 0.97135036
E.T. des rés.:	Seps= 2.74163	E.T. VR = 3.30194613
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

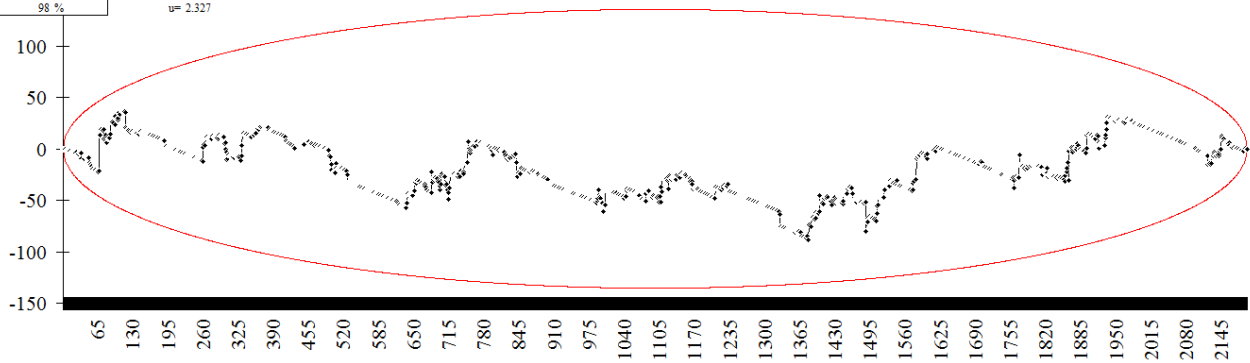
Station 011901



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég.:	a= 1.0239	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.20919	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.82941	Moy. VR = 1.10989964
E.T. des rés.:	Seps= 2.48604	E.T. VR = 3.60486481
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

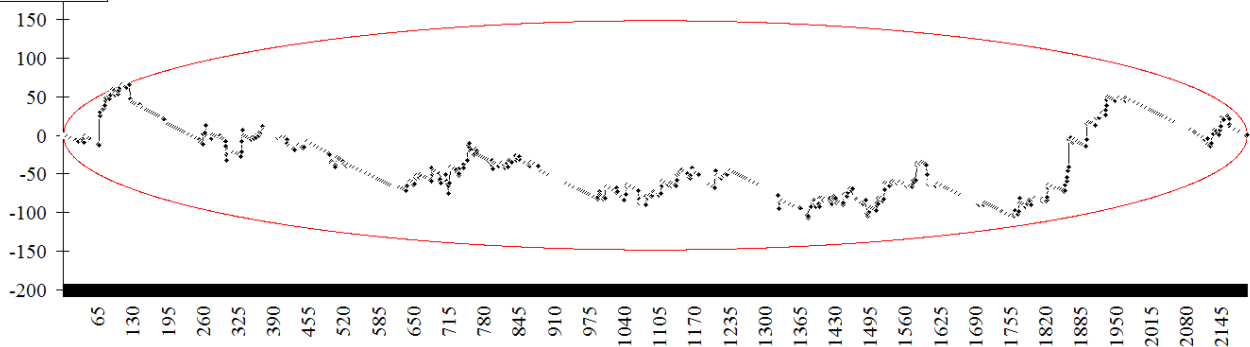
Station 011906



(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Droite de rég.:	a= 0.89672	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.34307	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.79138	Moy. VR = 1.11802007
E.T. des rés.:	Seps= 2.72051	E.T. VR = 3.92738157
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 012001



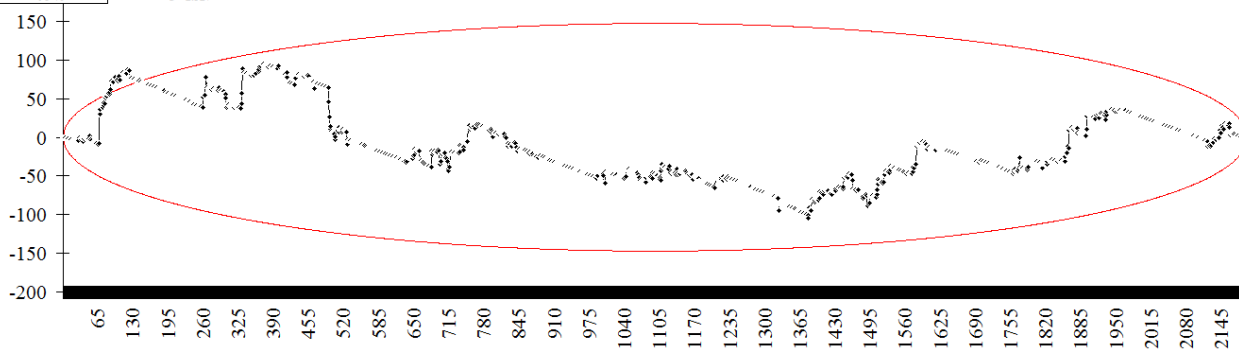
(ellipse ayant 98% de chance de contenir le cumul des écarts)

Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

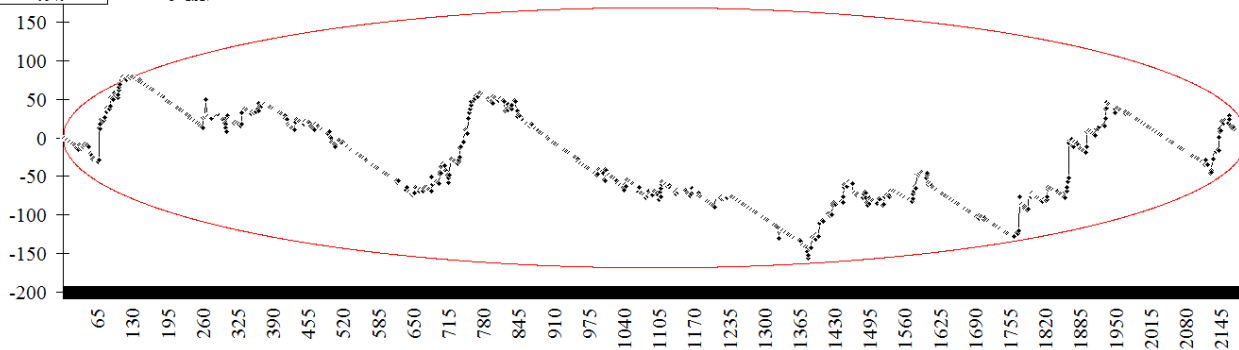
Droite de rég:	a= 0.9102	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.24907	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.79467	Moy. VR = 1.20474453
E.T. des rés.:	Seps= 2.70146	E.T. VR = 3.88532627
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 012004



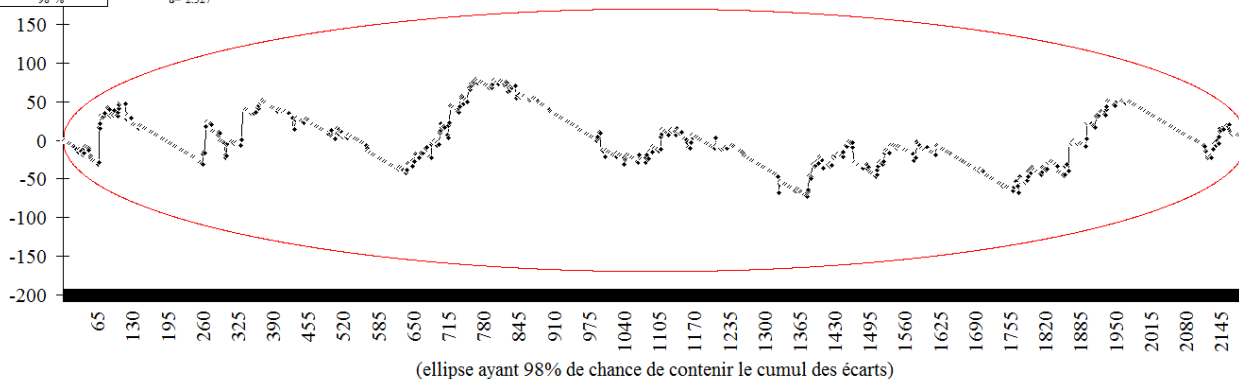
Droite de rég:	a= 0.8363	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.46277	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.71891	Moy. VR = 1.05365693
E.T. des rés.:	Seps= 3.09334	E.T. VR = 3.8254934
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 012007



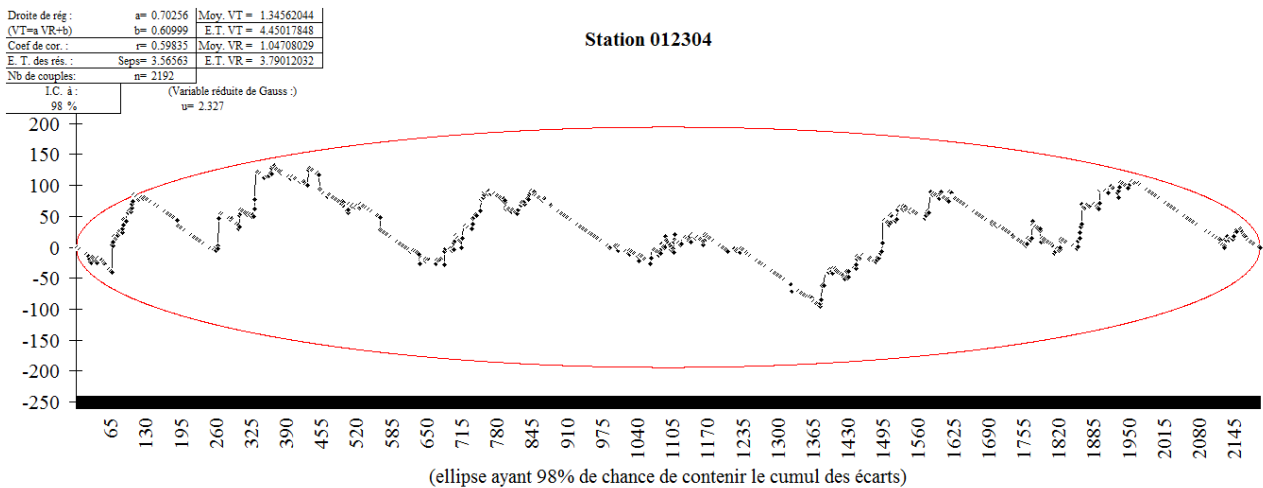
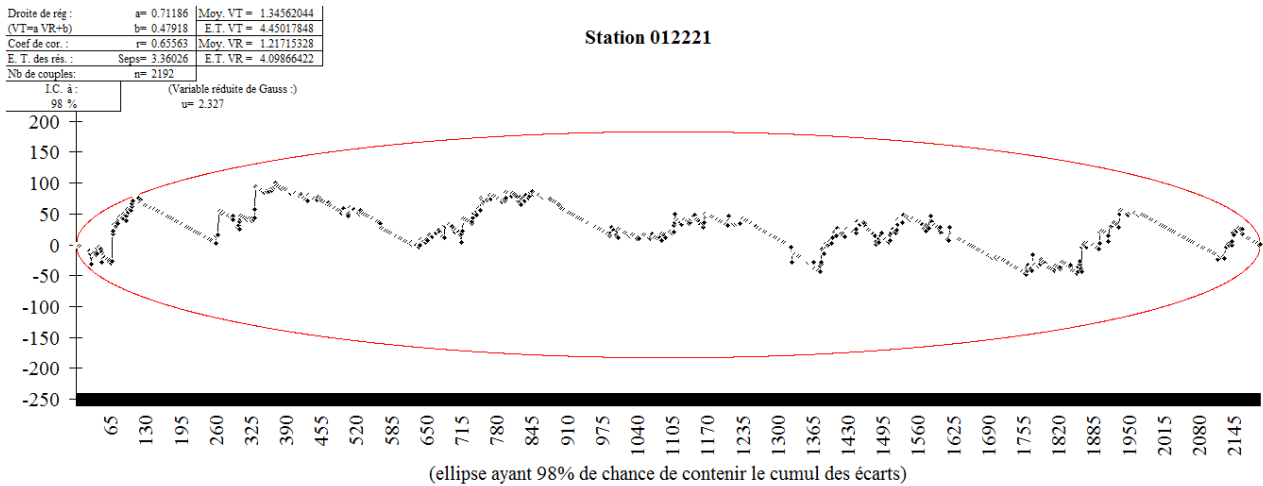
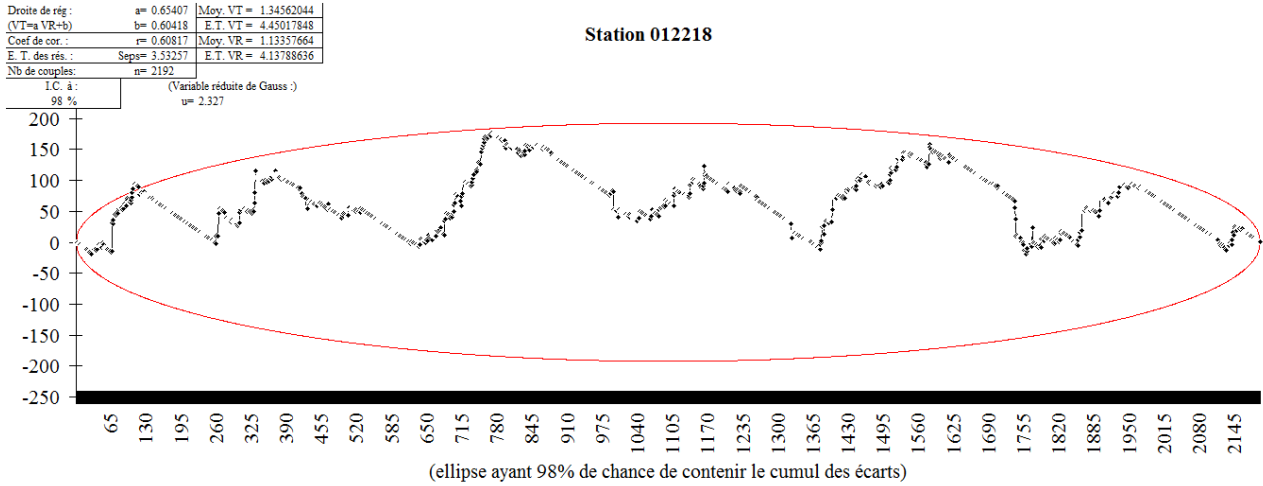
Droite de rég:	a= 0.80033	Moy. VT = 1.34562044
(VT=VR+b)	b= 0.41523	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.71398	Moy. VR = 1.1625
E.T. des rés.:	Seps= 3.11588	E.T. VR = 3.96998998
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 012201



Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

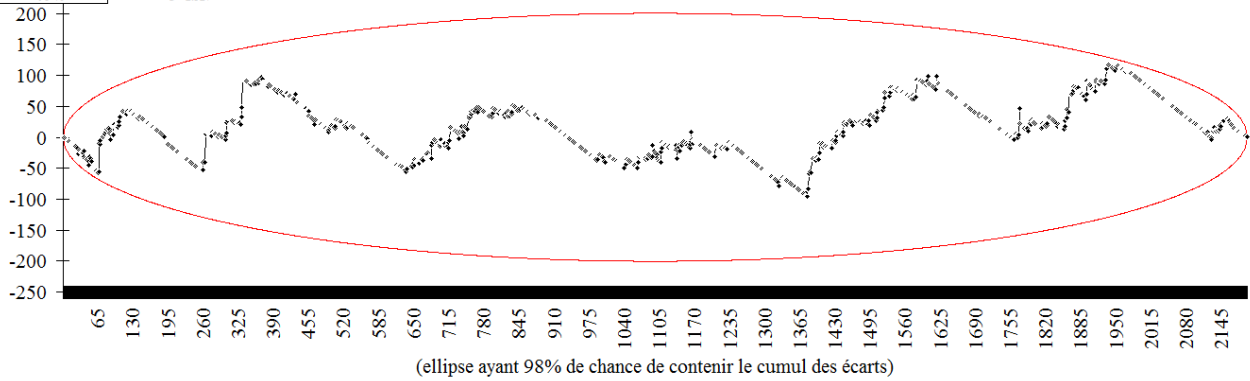


Annexe 02

Annexe 02 : Analyse des pluies journalières par la méthode de cumul des résidus entre la station de référence de Arib cheliff et les autres stations (Axe des ordonnées : Cumuls des résidus)

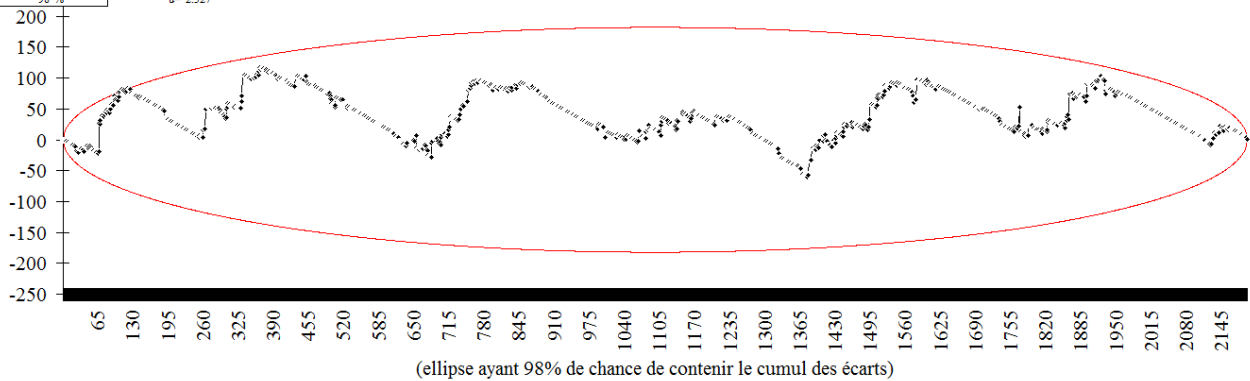
Droite de rég:	a= 0.64263	Moy. VT = 1.34562044
(VT=a VR+b)	b= 0.69487	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.56258	Moy. VR = 1.01263686
E.T. des rés.:	Seps= 3.67916	E.T. VR = 3.89586142
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 012309



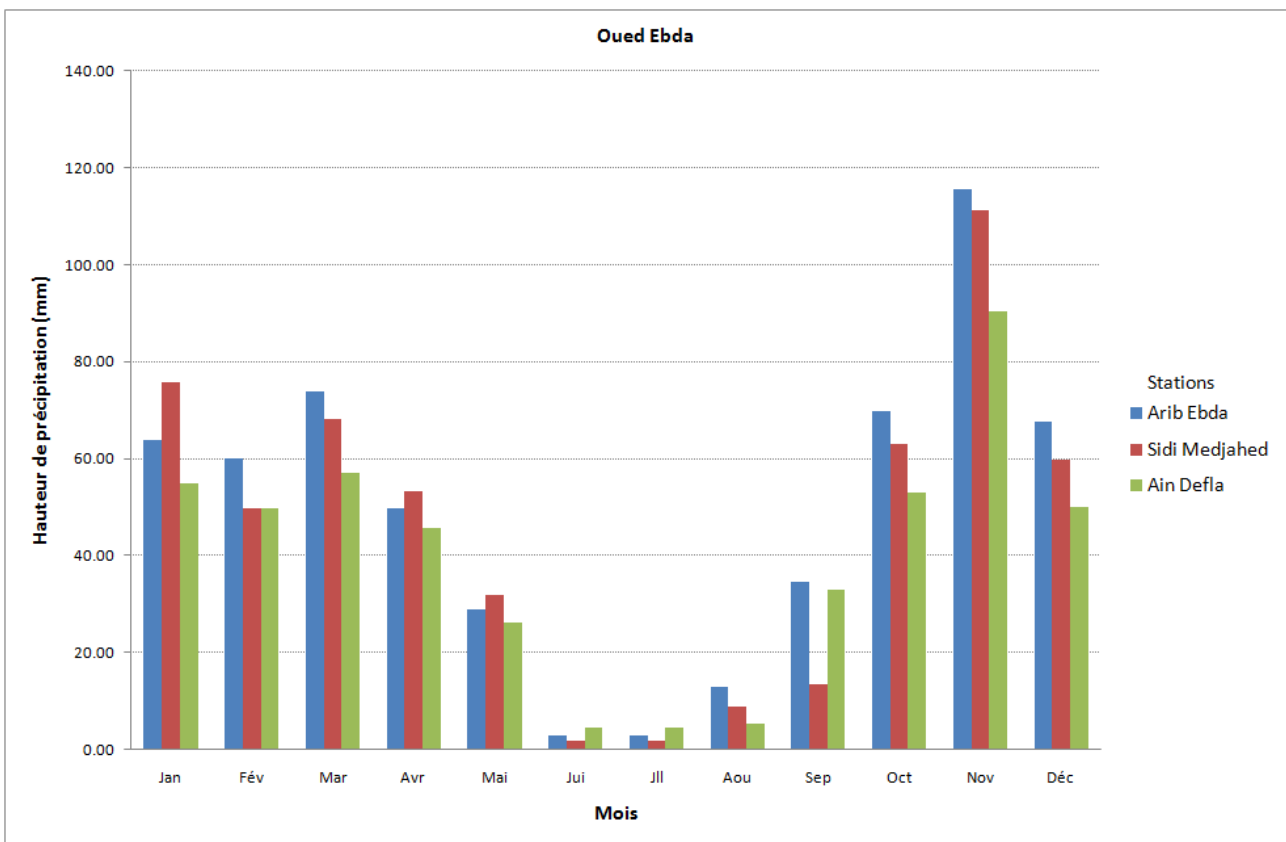
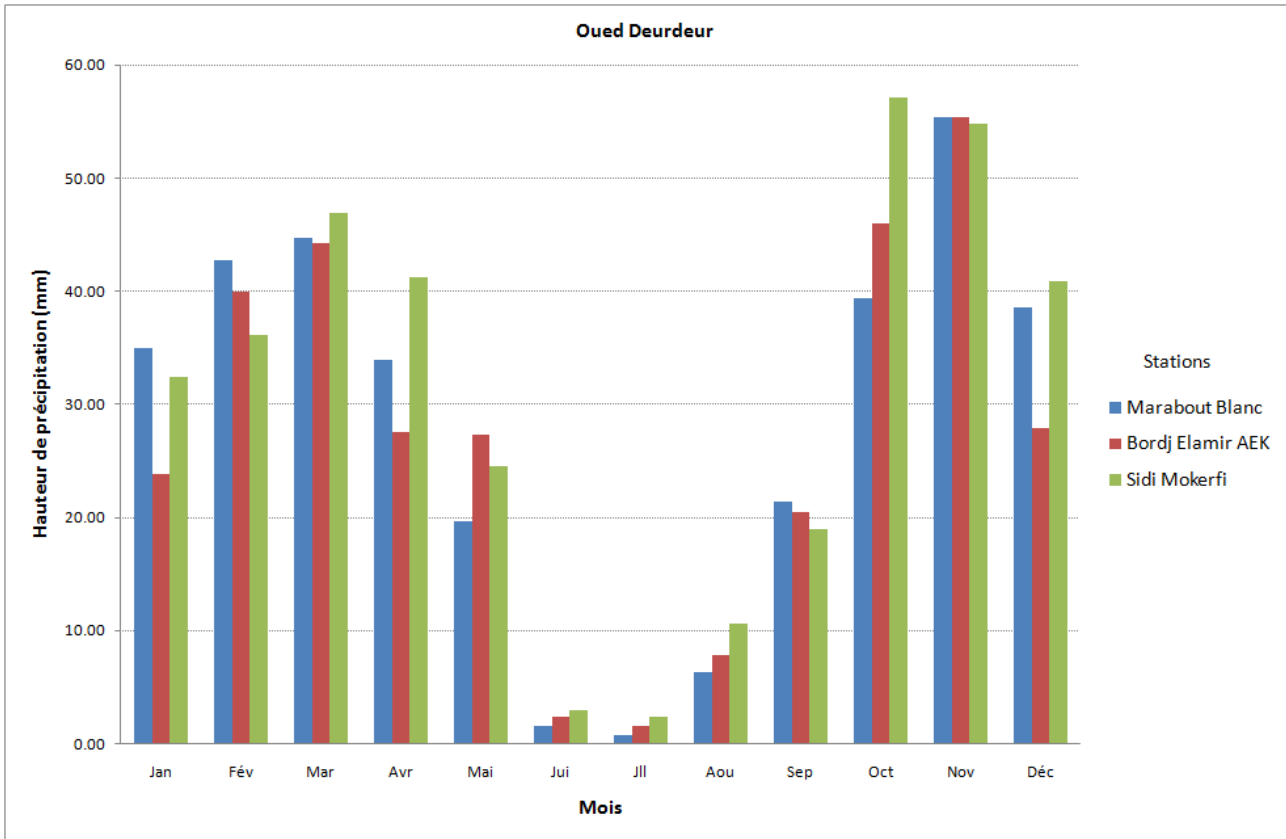
Droite de rég:	a= 0.77902	Moy. VT = 1.34562044
(VT=a VR+b)	b= 0.49207	E.T. VT = 4.45017848
Coef de cor.:	r= 0.66014	Moy. VR = 1.09566606
E.T. des rés.:	Seps= 3.34273	E.T. VR = 3.77103889
Nb de couples:	n= 2192	
I.C. à:		(Variable réduite de Gauss)
98 %		u= 2.327

Station 012318



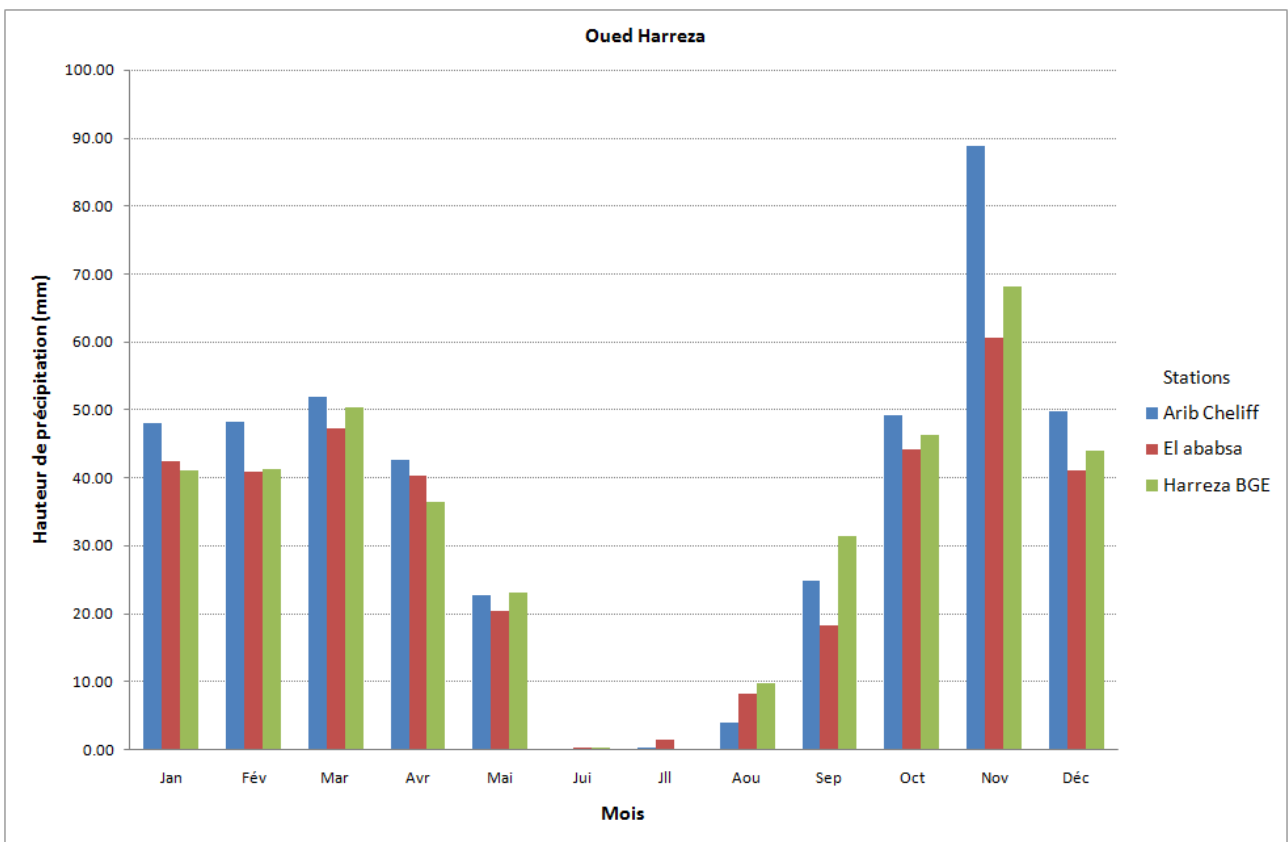
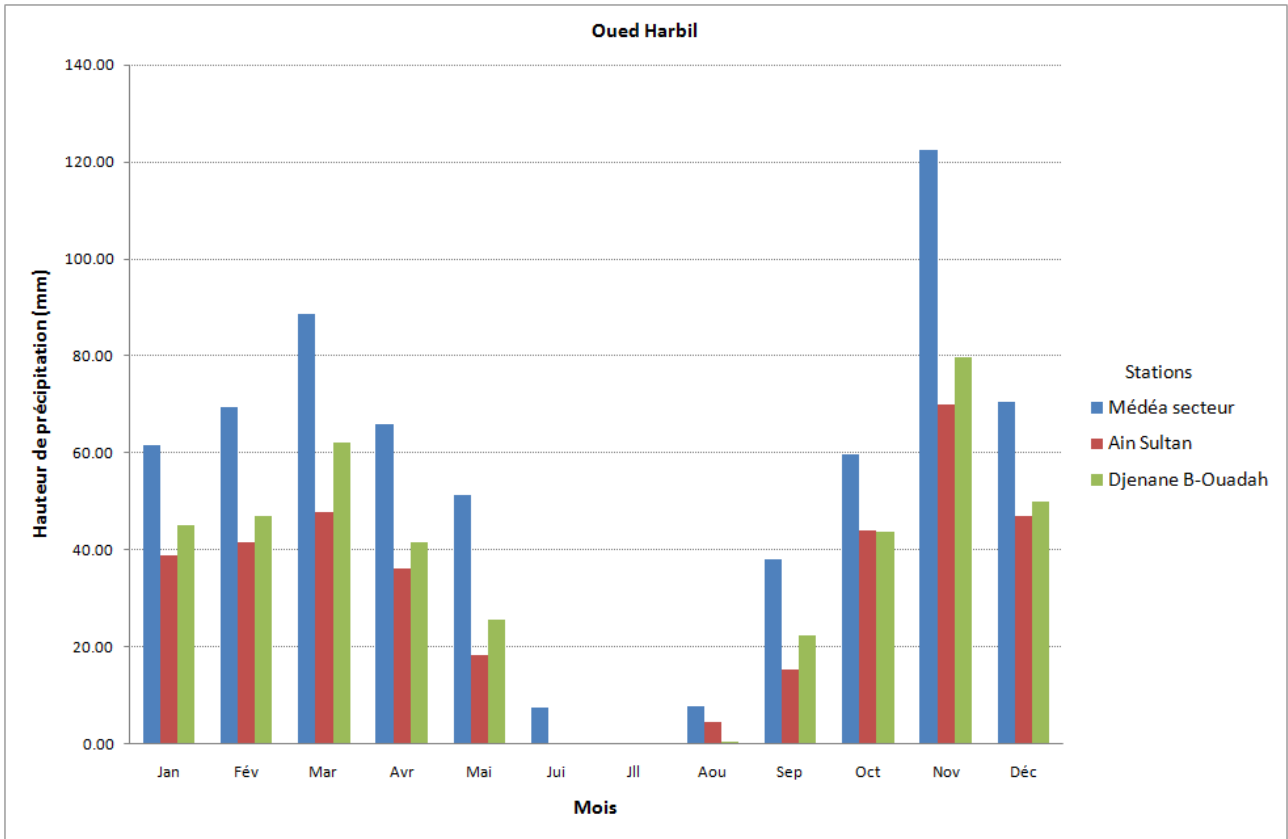
Annexe 03

Annexe 03 : Répartition mensuelle des précipitations (2003-2012)



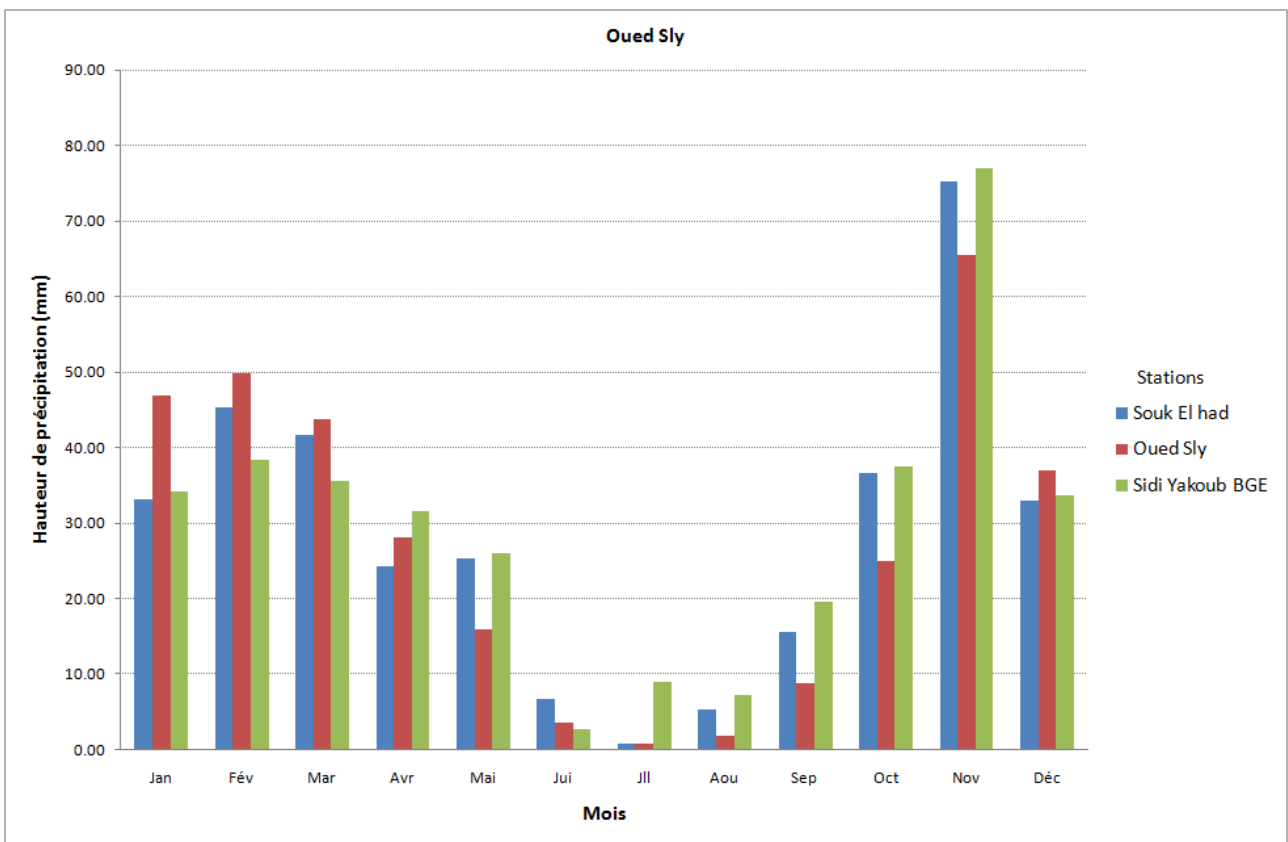
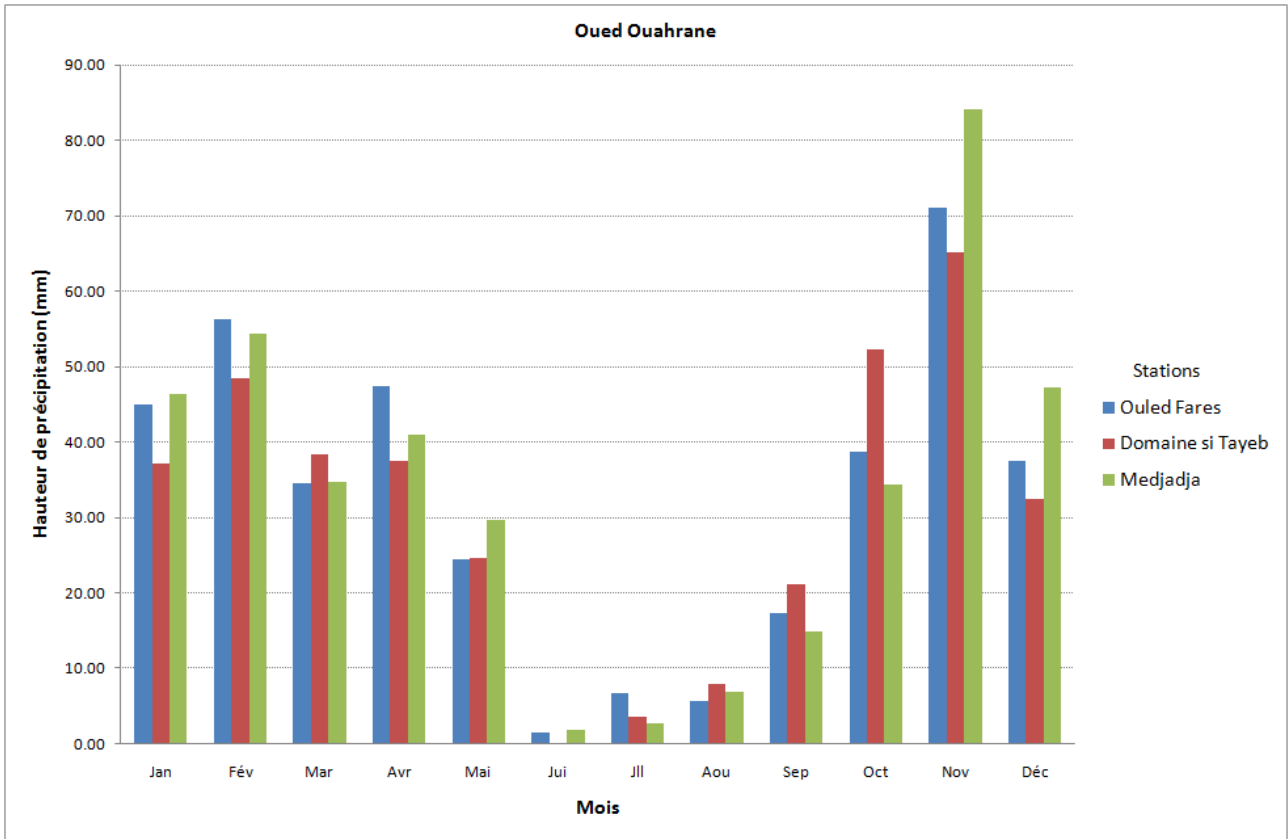
Annexe 03

Annexe 03 : Répartition mensuelle des précipitations (2003-2012)



Annexe 03

Annexe 03 : Répartition mensuelle des précipitations (2003-2012)



Annexe 03

Annexe 03 : Répartition mensuelle des précipitations (2003-2012)

