

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté des Sciences de la Nature et de Vie

Département des sciences Agronomiques et Biotechnologie



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Sciences agronomiques

Par

DALILA BEDDAL

Thème :

**Approche régionale de modélisation pluie-débit pour la gestion
des ressources en eau en zone semi-aride, cas du bassin versant de la
Macta**

Soutenue le 28/09/2021, devant le jury composé de :

Abdelkader BOUTHIBA	Professeur	Université Hassiba Benbouali - Chlef	Président
Mohammed ACHITE	Professeur	Université Hassiba Benbouali - Chlef	Directeur de thèse
Adda ABABOU	Professeur	Université Hassiba Benbouali - Chlef	Examineur
Abderazzak BOUANANI	Professeur	Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen	Examineur
Taha Hocine DEBIECHE	Professeur	Université Mohamed Seddik Benyahia- Jijel	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال تعالى : { يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَ الَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ }

سورة المجادلة : الآية 11

وفي الحديث القدسي : { من سلك طريقا يلتمس فيه علما سهل الله له به طريقا إلى الجنة } أخرجه مسلم.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات ما ختم جهد ولا تم سعي إلا بفضله

Approche régionale de modélisation pluie-débit pour la gestion des ressources en eau en zone semi-aride, cas du bassin versant de la Macta

Résumé

L'eau constitue une ressource précieuse, un enjeu de civilisation et un potentiel économique considérable de développement durable. De nos jours, la modélisation pluie-débit a pris une dimension importante dans la résolution des problèmes liés à la gestion rationnelle et durable des ressources en eau sur la base d'un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux spatialement et temporellement pour reproduire le débit observé. L'objectif de cette présente étude est de chercher le meilleur modèle pluie-débit adéquat pour reproduire les débits des oueds de la Macta par l'application de trois (03) approches à savoir **RLM**, **GR2M** et **RNA**. L'approche proposée est traitée pour la première fois au bassin versant de la Macta ce qui représente l'originalité du travail. Le grand bassin versant de la Macta (**14389 Km²**) situé au Nord-Ouest de l'Algérie septentrionale est caractérisé par un climat semi-aride, est marquée par une variabilité spatio-temporelle du régime hydro-climatique. L'analyse statistique de cette variabilité est traduite par une augmentation de la température sans rupture recensée durant la période d'étude (1983/84-2015/16) et est accompagnée d'une augmentation du régime pluviométrique durant les années 2000. Par conséquent, les débits des oueds de la Macta connaissent une variabilité considérable et instable.

L'application de trois (03) modèles pluie-débit montre que le modèle à base de neurones artificiels est performant pour prédire le débit liquide des oueds de la Macta à cause de leur aptitude à capturer l'effet stochastique de la non linéarité de la relation pluie-débit sans rentrer dans le processus hydrologique. Alors que les modèles à base linéaire **RLM** et à réservoirs **GR2M** ne sont pas adéquats et ne peuvent pas simuler le débit liquide des oueds étudiés de la Macta sous le climat semi-aride. La meilleure combinaison **M4** du modèle **RNA** est fonction des paramètres P_t , ETo_{t-1} , Q_{t-1} dont les critères statistiques **r** et **NSE** indiquent un niveau élevé de performance durant les deux périodes de calage (**0,81** et **95%** respectivement) et de validation (**0,7** et **91%** respectivement).

Mots clés: Approche régionale, pluie-débit, gestion de la ressource en eau, semi-aride, bassin versant de la Macta.

منهجية اقليمية لنموذج التدفق- الأمطار من أجل تسيير موارد المياه في المناطق شبه الجافة ، حالة حوض المقطع

ملخص

يعتبر الماء مورد ثمين و عامل حضاري و اقتصادي مهم في التنمية المستدامة. في الوقت الحاضر، اتخذت نمذجة علاقة التدفق-الأمطار بُعداً مهماً في حل المشاكل المتعلقة بالتسيير الرشيد للموارد المائية و ذلك بالاعتماد على مجموعة من المفاهيم الهيدرولوجية معبر عنها رياضياً ومرتبطة ببعضها مكانياً وزمناً و من أجل تمثيل التدفق المسجل على مستوى المحطات الهيدروغرافية. يهدف هذا العمل إلى إيجاد أفضل نموذج للعلاقة التي تربط التدفق بكمية الأمطار و التي تتناسب مع أودية حوض المقطع و هذا من خلال تطبيق ثلاثة نماذج: **RLM** و **GR2M** و **RNA**. المنهجية المقترحة هي الأولى من نوعها على مستوى حوض المقطع و هذا ما يميز نوعية العمل. يقع الحوض الهيدروغرافي الكبير للمقطع (**14389 كم²**) شمال غرب الجزائر و يتميز بمناخ شبه جاف ، كما لوحظت عليه تغيرات حيزية و وقتية في النمط الهيدرولوجي حيث أثبت التحليل الإحصائي للسلاسل السنوية الهيدرولوجية خلال الفترة الممتدة بين (16/2015-84/1983) حصول تغير مناخي موضح بارتفاع في درجة الحرارة السنوية المحلية دون تحديد سنة الانقطاع مع ارتفاع في المعدل السنوي لتساقط الأمطار خلال فترة سنوات 2000. هذا التغير أثر سلباً على تدفق الوديان و التي تغير تدفقها بشكل ملحوظ.

من جهة أخرى ، تظهر المقارنة بين النماذج الثلاثة (03) للعلاقة بين التدفق- الامطار أن النموذج **RNA** المرتكز على مبدأ الخلايا العصبية الاصطناعية هو الأفضل لتمثيل تدفق أودية حوض المقطع و ذلك لقدرته تمثيل العلاقة العشوائية بين التدفق المائي و كمية الامطار دون الدخول في تفاصيل العملية الهيدرولوجية التي تحول الامطار المتساقطة الى تدفق مائي. غير أن النموذج الخطي **RLM** ونموذج **GR2M** المعتمد على مبدأ الخزانات غير ملائمين لتمثيل التدفق المائي للاودية المدروسة لحوض المقطع تحت مناخ شبه جاف. يعتمد المزيج **M4** افضل نموذج مختار من نوع **RNA** حيث أنه يعتمد على المتغيرات (P_t, ET_{t-1}, Q_{t-1}) كما أن المعايير الاحصائية **NSE** و **r** كشفت عن نجاعة النموذج المختار خلال فترتي الانشاء (**0.81** و **95%** على التوالي) و التحقق (**0.7** و **91%** على التوالي).

الكلمات الرئيسية: نموذج إقليمي، التدفق-الأمطار، تسيير الموارد المائية، شبه الجاف، حوض المقطع.

Regionalization approach of Rainfall-Discharge modeling for the management of water resources in semi-arid area, case study of the Macta basin

Abstract

Water is a precious resource, a bet of civilization and a considerable economic potential for sustainable development. Nowadays, Rainfall-Runoff modeling has taken an important dimension used to resolve problems of rational management of water resources on the basis of a set of hydrological concepts expressed in mathematical language and linked together spatially and temporally to predict the observed data. The aim of this present work is to find the best Rainfall-Discharge model of the Macta wadis by application of the three (03) approaches namely **MLR**, **GR2M** and **ANN**. The proposed approach is new in the Macta basin and there is no study achieved before. The large basin of the Macta (**14389 Km²**) located in the North-west of Algeria is characterized by a semi-arid climate, which is marked by a spatial and temporal variability of the hydro-climatic system. The statistical analysis of hydro-climatic time series shows that the annual temperature was increased without break in stationary during the period (1983/84-2015/16). Furthermore, the average annual rainfall was increased in the years of 2000 which influence significantly the discharge of Macta wadis.

In addition, the comparison between three (03) **Rainfall-Discharge models** shows that the neuronal artificial model is the best to predict the discharge of studied Macta wadis. Whereas, the regression linear and tank models are inadequate to represent the really observed values under semi-arid climate. The **M4** of **ANN** model with the combination P_t, ETo_{t-1}, Q_{t-1} emerged as the best model of which the statistical criteria r , NSE shows a high level of accuracy during training (**0,81** and **95%** respectively) and test phase (**0,7** and **91%** respectively).

Key words: Regionalization approach, Rainfall-Discharge, management of water resources semi-arid, Macta basin.

إهداء

إلى أغلى الأشخاص على قلبي ،

نور عيوني و سببا وجودي و سندي الوحيد بعد الله ،أمي ،أمي ، أمي ثم أبي و اللذان
بدونهما لم أكن لأصل.

إلى رفقاء دربي أخوتي و أخواتي خصوصا أميرة و عبد المالك أعانهم الله في انهاء رسالة
الدكتوراه و الالتحاق بركب البحث العلمي .

REMERCIEMENTS

Aucun travail ne s'accomplit dans la solitude. Au terme de ce travail, je voulais remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Ma reconnaissance est grande pour mon **directeur de thèse Monsieur le Professeur ACHITE Mohammed** qui m'a renouvelé sa confiance, et auprès duquel j'ai trouvé les conseils, l'aide et l'appui durant toutes ces années du cycle de Magister au doctorat.

Je tiens également à présenter mes respects et ma reconnaissance à **Monsieur le président, le Professeur BOUTHIBA Abdelkader** qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce travail.

Je tiens également à remercier Messieurs les membres jury à savoir :

Le Professeur ABABOU Adda ;

Le Professeur Saaed AbdelEmir HAMOUDI ;

Le Professeur Abderazzak BOUANANI ;

Le Professeur Taha Hocine DEBIECHE.

Merci d'avoir acceptés d'examiner ce modeste travail en accordant le temps pour cela, veuillez accepter le respect et la reconnaissance de ma part.

Tous mes remerciements et ma considération sont adressés à l'ensemble du **personnel de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Oran** pour l'acquisition de toutes les données hydrologiques complémentaire nécessaires tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier aussi **le personnel de l'Office National de Météorologie(ONM) d'Alger** pour me faciliter l'accès aux données climatiques nécessaires.

Par ailleurs, Je manifeste une gratitude particulière au **Monsieur BAAHMED Djelloul. Maitre de conférence classe A- Université de Sidi Bel Abbes**, pour son collaboration, son aide et ses précieux conseils en m'orientant à trouver la bonne voie pour achever ce travail de recherche.

Je présente ma gratitude à **Monsieur NOURANI Vahid Professeur à l'université du proche orient (NEU) à Chypre** qui a accepté de me suivre et de m'aider dans mes recherches scientifiques durant mon séjour à chypre. Le séjour rentre dans le cadre du stage de longue durée, type PNE (Programme National Exceptionnel) de formation

résidentielle à l'étranger. Mille merci Pr Nourani pour l'opportunité que vous m'avez offert, les facilités que j'ai bénéficié à l'université (NEU) et les informations que j'ai pu acquérir à travers les cours d'hydrologie assistés, ce qui m'ont permis d'enrichir mon expérience et mes connaissances que je devrai transmettre aux étudiants notamment la manipulation des outils d'hydrologie et de l'intelligence artificielle.

Je ne pourrai jamais oublier l'aide de **Monsieur ALI El BARAKA Shaabane. Associate Professor- Université du proche orient (NEU)(Chypre)** d'avoir m'aidée sans cesse depuis mon arrivée à l'aéroport de Nicosie et tout au long de mon séjour, il m'a orienté et ma donné des coups de pouce à travers ses discussions enrichissantes, sa générosité et son appui pour réaliser ma première publication scientifique.

J'adresse mes remerciements à **Monsieur ABBA SI, Docteur à l'université de Kano-Nigéria** pour son aide dans l'apprentissage des réseaux de neurones artificiels par Matlab, ses réponses électroniques, ses discussions enrichissantes et qui m'ont été d'un grand intérêt à accomplir ma première publication scientifique.

Je voudrais remercier aussi mon collègue **Monsieur TOUBAL A.K maitre de conférence classa B à l'université Hassiba Ben Bouali (UHB) Chlef** pour son aide, son soutien moral et ses services fraternels et sa générosité malgré ses préoccupations.

Enfin, A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, à tous ceux qui m'ont montré leur intérêt, à vous tous **MERCI !!**

Table des matières

Résumé	II
ملخص.....	III
Abstract	IV
Dédicace.....	V
Remerciement	VI
Table des matières	VIII
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XVI
Liste des abréviations.....	XIX
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Définition de la modélisation pluie-débit.....	4
I.2 Prévision et prédiction hydrologique	5
I.3 Intérêt de la modélisation du débit.....	5
I.4 Eléments d'un modèle hydrologique	6
I.5 Etapes de modélisation pluie-débit	6
I.5.1 Calage.....	6
I.5.2 Validation	6
I.5.3 Techniques de calage-validation	7
I.6 Critères de performance d'un modèle pluie-débit.....	8
I.6.1 Coefficient de corrélation (r) et coefficient de détermination (R^2)	8
I.6.2 RMSE (erreur quadratique moyenne) et MAE (erreur moyenne absolue)	9
I.6.3 NSE	9
I.6.4 MAPE (Mean absolute percentage error).....	10
I.6.5 L'indice de Willmott (d)	10
I.6.6 RSR (Observation standard deviation ratio)	11
I.7 Qualités requises des modèles hydrologiques.....	11
I.8 Classification des modèles hydrologiques	12
I.8.1 Classification des modèles mathématiques	13

I.8.1.1 Modèles déterministes	13
I.8.1.2 Modèles conceptuels	13
I.8.1.3 Modèles empiriques.....	13
I.8.1.4 Modèles stochastiques	14
I.9 Architecture des modèles pluie-débit retenus	14
I.9.1 La régression linéaire multiple RLM	14
I.9.2 Modèle de génie rural GR2M.....	15
I.9.2.1 Bref historique des modèles GR.....	15
I.9.2.2 Principales caractéristiques	15
I.9.2.3 Architecture du modèle GR2M	16
I.9.2.4 Initialisation du système et période de mise en route	17
I.9.2.5 Application du modèle GR2M	17
I.9.3 Réseaux de neurones artificiels (RNA).....	17
I.9.3.1 Définition du RNA	18
I.9.3.2 Caractéristiques des RNA.....	18
I.9.3.3 Principe du fonctionnement.....	18
I.9.3.4 Types de fonctions d'activation.....	19
I.9.3.5 Typologie des RNA	20
I.9.3.6 Apprentissage des RNA	22
I.9.3.7 Algorithmes d'apprentissage des RNA	23
I.10 Problèmes de la modélisation pluie-débit	24

Chapitre II : Cadre d'analyse et données d'analyse

II.1 Localisation géographique.....	25
II.2 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des sous bassins de la Macta....	27
II.3 Relief	30
II.4 Cadre géologique et hydrogéologique	30
II.5 Etude climatique	34
II.5.1 Précipitations.....	34
II.5.2 Température	35
II.5.3 Indice d'aridité annuelle de DE MARTONNE (I).....	36
II.6 Bilan hydrique	37

II.6.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle "ETP"	37
II.6.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle "ETR" et l'excédent "EXC"	39
II.7 Occupation du sol	41
II.8 Ressources en eau	42
II.8.1 Ressources en eau souterraines	43
II.8.2 Ressources en eau superficielles	43
II.9 L'agriculture comme activité principale	44
II.10 Données d'analyse	45
II.10.1 Données hydrométriques	45
II.10.2 Données pluviométriques	46
II.10.3 L'évapotranspiration de référence ETo	47
II.10.4 Comblement des lacunes et détection des erreurs	48

Chapitre III : Etude du régime hydro-climatique

III.1 Etude du régime pluviométrique	52
III.1.1 Distribution temporelle des précipitations	52
III.1.2 Analyse en composantes principales des précipitations annuelles	54
III.1.2.1 Résultats de l'ACP	54
III.1.3 Distribution mensuelle des précipitations et régime saisonnier	58
III.2 Etude du régime hydrométrique	63
III.2.1 Distribution des débits moyens annuels et interannuels	63
III.2.2 Analyse en composantes principales des apports liquides	64
III.2.2.1 Résultats de l'ACP	65
III.2.3 Distribution mensuelle des débits liquides	69
III.2.3.1 Coefficient mensuel de débits (CMD)	69
III.3 Analyse des tendances des variables hydro-climatiques	73
III.3.1 Analyse de tendance des précipitations	73
III.3.2 Test de rupture dans les séries pluviométriques	76
III.3.3 Analyse de tendance des débits liquides	78
III.3.4 Test de rupture dans les séries hydrométriques	78
III.3.5 Analyse de tendance des débits liquides	81
III.3.6 Test de rupture dans les séries de température	82

Chapitre IV : Application de la modélisation pluie-débit au bassin versant de la Macta

IV.1 Choix des variables hydrologiques de la modélisation pluie-débit.....	84
IV.2 Choix des modèles hydrologiques pluie-débit appliqués.....	86
IV.3 Méthodologie de modélisation adoptée	86
IV.3.1 Modélisation par RLM, RNA.....	86
IV.3.2 Modélisation par GR2M	87
IV.4 Résultats de modélisation.....	87
IV.4.1 Résultats du modèle RLM.....	88
IV.4.2 Résultats du modèle GR2M	92
IV.4.2.1 Résultats du calage	94
IV.4.2.2 Résultats de validation.....	95
IV.4.2.3 Comparaison des résultats avec des travaux similaires	95
IV.4.3 Résultats du modèle RNA	96
IV.4.4 Comparaison des résultats des trois (03) modèles.....	100
Conclusion générale & recommandations	116

Références bibliographiques

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I.1 : Principe de la modélisation pluie-débit	4
Figure I.2 : Schématisation de la procédure different proxy-catchment test	7
Figure I.3 : Schématisation de la technique du double échantillon	8
Figure I.4 : Les différentes types de modèles pluie-débit	12
Figure I.5 : Schéma de fonctionnement du modèle GR2M	16
Figure I.6 : Principe d'un neurone artificiel	19
Figure I.7 : Allure de la fonction logistique	19
Figure I.8 : Allure de la fonction logistique	20
Figure I.9 : Structure du perceptron multicouche (MLP)	20
Figure I.10 : différents architectures neuronales	22
Figure I.11 : Algorithme de rétro-propagation des gradients	23

Chapitre II : Cadre naturel et données d'analyse

Figure II.1 : Localisation géographique, Modèle numérique du terrain et réseau hydrographique du bassin versant de la Macta	26
Figure II.2 : Nouvelle délimitation des sous bassins versants étudié de la Macta	28
Figure II.3 : Carte géologique du bassin versant de la Macta	32
Figure II.4 : Précipitations mensuelles moyennes aux stations étudiées	34
Figure II.5 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales aux stations étudiées	35
Figure II.6 : Diagramme de DE MARTONE des trois stations climatologiques	36
Figure II.7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Macta	42

Figure II.8 : Ressources en eau superficielles et souterraines dans le bassin versant de la Macta 44

Figure II.9 : Localisation des stations hydrométriques, pluviométriques et climatiques dans le bassin versant de la Macta..... 46

Figure II.10: Principe de la méthode des doubles masses 49

Figure II.11: Doubles masses des séries pluviométriques étudiées 50

Chapitre III : Etude du régime hydro-climatique

Figure III.1 : Projection des variables pluviométriques sur les plans (CP1xCP2) 57

Figure III.2 : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)..... 58

Figure III.3 : Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP2) 67

Figure III.4 : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2) 68

Figure III.5 : Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP3) 68

Figure III.6 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de la Macta (1975/76-2015/16)..... 73

Figure III.7 : Variabilité des débits liquides et droites linéaires de tendance des stations hydrométriques étudiées dans le bassin versant de la Macta 78

Figure III.8 : Variabilité de la température et droites linéaires de tendance des points satellitaires étudiés dans le bassin versant de la Macta (1983/84-2015/16)..... 81

Chapitre IV : Application de la modélisation pluie-débit au bassin versant de la Macta

Figure IV.1 : Extraction des zones d'influence des postes pluviométriques par la méthode de Thiessen..... 85

Figure IV.2 : Exemple de structure du réseau neuronal utilisé dans l'apprentissage..... 97

Figure IV.3 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S1, (b) : Visualisation de la phase calage 101

Figure IV.4 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S1, (b) : Visualisation de la phase validation	101
Figure IV.5 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S2, (b) : Visualisation de la phase calage	102
Figure IV.6 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S2, (b) : Visualisation de la phase validation	102
Figure IV. 7 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S3, (b) : Visualisation de la phase calage	103
Figure IV.8 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S3, (b) : Visualisation de la phase validation	103
Figure IV.9 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S4, (b) : Visualisation de la phase calage	104
Figure IV.10 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S4, (b) : Visualisation de la phase validation	104
Figure IV.11 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S5, (b) : Visualisation de la phase calage	105
Figure IV.12 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S5, (b) : Visualisation de la phase validation	105
Figure IV.13 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S6, (b) : Visualisation de la phase calage	106
Figure IV.14 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S6, (b) : Visualisation de la phase validation	106
Figure IV.15 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S7, (b) : Visualisation de la phase calage	107
Figure IV.16 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S7, (b) : Visualisation de la phase validation	107

Figure IV.17 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S8, (b) : Visualisation de la phase calage	108
Figure IV.18 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S8, (b) : Visualisation de la phase validation	108
Figure IV.19 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S9, (b) : Visualisation de la phase calage	109
Figure IV.20 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S9, (b) : Visualisation de la phase validation	109
Figure IV.21 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S10, (b) : Visualisation de la phase calage	110
Figure IV.22 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S10, (b) : Visualisation de la phase validation	110
Figure IV.23 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S11, (b) : Visualisation de la phase calage	111
Figure IV.24 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S11, (b) : Visualisation de la phase validation	111
Figure IV.25 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S12, (b) : Visualisation de la phase calage	112
Figure IV.26 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S12, (b) : Visualisation de la phase validation	112
Figure IV.27 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S13, (b) : Visualisation de la phase calage	113
Figure IV.28 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S13, (b) : Visualisation de la phase validation	113

Liste des Tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I.1 : valeurs des paramètres du GR2M sur un large échantillon de bassin versants . 16

Chapitre II : Cadre naturel et données d'analyse

Tableau II.1 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du nouveau découpage des sous bassins versant de la Macta..... 29

Tableau II.2 : Stratigraphie du bassin versant de la Macta..... 33

Tableau II.3 : Caractéristiques des stations climatologiques utilisées..... 34

Tableau II.4 : Indice d'aridité (I) annuelle de DE MARTONNE des trois (03) stations climatologiques 36

Tableau II.5 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Ghriss..... 38

Tableau II.6 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Sidi Belabbes 38

Tableau II.7 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Saida..... 38

Tableau II.8 : Bilan hydrique à la station de Ghriss par Thornthwaite..... 40

Tableau II.9 : Bilan hydrique à la station de Sidi Belabbes selon Thornthwaite..... 40

Tableau II.10 : Bilan hydrique à la station de Saida par Thornthwaite 40

Tableau II.11 : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol dans le bassin versant de la Macta..... 41

Tableau II.12 : Ressources en eau dans le bassin versant de la Macta..... 43

Tableau II.13 : Caractéristiques des barrages existants dans le bassin versant de la Macta... 43

Tableau II.14 : Périmètres irrigués existants dans le bassin versant de la Macta 44

Tableau II.15 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues dans le bassin versant de la Macta 45

Tableau II.16 : Caractéristiques des stations pluviométriques retenues dans le bassin versant de la Macta 47

Tableau II.17 : Caractéristiques des points satellitaires..... 48

Chapitre III : Etude du régime hydro-climatique

Tableau III.1 : Caractéristiques des séries pluviométriques annuelles dans le bassin versant de la Macta (1975/76-2015/16) 53

Tableau III.2 : Valeurs propres et variances expliquées..... 54

Tableau III.3 : Matrice de corrélation entre les stations pluviométriques 55

Tableau III.4 : Projection des variables sur les principaux axes 56

Tableau III.5 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières enregistrées au niveau des stations pluviométriques (1975-2016)..... 59

Tableau III.6 : Régime saisonnier des précipitations dans le bassin versant de la Macta 62

Tableau III.7 : Caractéristiques hydrologiques des stations hydrométriques du bassin versant de la Macta 64

Tableau III.8 : Valeurs propres et variances expliquées..... 65

Tableau III.9 : Matrice de corrélation entre les stations hydrométriques..... 66

Tableau III.10 : Projection des variables sur les principaux axes 66

Tableau III.11 : Distribution mensuelle des débits et leurs caractéristiques statistiques 70

Tableau III.12 : Résultats des tests d'homogénéité et années de ruptures des séries pluviométriques annuelles étudiées (1975/76-2015/16) 77

Tableau III.13 : Résultats des tests d'homogénéité et années de ruptures dans les séries hydrométriques annuelles étudiées..... 80

Tableau III.14 : Résultats des tests d'homogénéité et années de ruptures dans les séries de température annuelle dans le bassin versant de la Macta..... 82

**Chapitre IV : Application de la modélisation pluie-débit au bassin versant
de la Macta**

Tableau IV.1 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle RLM.....	88
Tableau IV.2 : Résultats du meilleur modèle pluie-débit par RLM.....	90
Tableau IV.3 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle GR2M	93
Tableau IV.4 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle RNA.....	97
Tableau IV.5 : Résultats du meilleur modèle pluie-débit par RNA.....	99

Liste des abréviations

ABH O.C.C	: Agence du Bassin Hydrique Oranais Chott Chergui
ACP	: Analyse en composantes principales
AHPE	: Automne Hiver Printemps Eté
ANBT	: Agence Nationale des Barrages et des Transferts
ANRH	: Agence nationale des ressources hydriques
APHE	: Automne Printemps Hiver Eté
CMD	: Coefficient mensuel de débit
Cv	: Coefficient de variation
D	: Déficit hydrique
ENVI	: Environment for Visualizing Images
ETo	: Evapotranspiration de référence
ETP	: Evapotranspiration potentielle
ETR	: Evapotranspiration réelle
EXC	: Excédent
GR2M	: Génie rural à deux paramètres au pas du temps mensuel
HAPE	: Hiver Automne Printemps Eté
HPAE	: Hiver Printemps Automne Eté
I	: Indice d'aridité annuelle de DE MARTONE
INRAE	: Institut National de recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
MNT	Modèle numérique du terrain
NSE	: Nash
ONM	: Organisme National de Météorologie
PHAE	: Printemps Hiver Automne Eté
RFU	: Réserve facilement utilisable
RLM	: Régression linéaire multiple
RMSE	: Root Mean Square Error
RNA	: Réseau de neurones artificiels
r	: Coefficient de corrélation
R²	: Coefficient de détermination
Var	: Taux de variation de la moyenne

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'eau constitue une ressource précieuse, un enjeu de civilisation et un potentiel économique considérable de développement durable et si l'on ne prend pas garde, cette ressource naturelle risque à terme de s'imposer comme « facteur limitant ».

Toutefois, de par sa situation géographique, l'Algérie septentrionale a connu une variabilité climatique au début des années soixante-dix ; la partie occidentale est particulièrement plus touchée. Cette variabilité a fait diminuer les ressources en eau ce qui limite leurs accessibilité à moyen et à long terme notamment avec l'accroissement démographique et la demande progressive en eau du secteur économique (agriculture, industrie) (Meddi et Hubert, 2003 ; Bouanani et al, 2005 ; Meddi et Meddi, 2007 ; Meddi et al, 2009 ; Meddi et al., 2010; Bakreti et al., 2013 ; El Mahi et al., 2014 ; Baahmed et al., 2015; Achite et al., 2017; Zamoum et Souag-Gamane, 2019; Lakache et al., 2019; Hallouz et al., 2019; Berhail et al., 2021). Le bassin versant de la Macta situé au Nord-Ouest de l'Algérie septentrionale, est reconnu par sa vocation agricole lui rendant un excellent pôle agricole de l'ouest algérien a été touché par cette variabilité climatique dont l'action anthropique a accentué l'aspect quantitatif de la ressource en eau (régime d'écoulement des oueds, alimentation des nappes phréatiques, remplissage des barrages) (Meddi et al, 2009 ; Baahmed et al., 2015; Chibane et al., 2015 ; Elouissi et al., 2017; Baahmed et Oudin, 2017; Otmane et al., 2017 ; Otmane et al., 2018 ; Berhail et al., 2021).

A cet effet, l'introduction de méthodes d'évaluation de ces ressources s'est révélée utile et indispensable pour aider les décideurs et les autorités locales dans la gestion rationnelle et durable des ressources en eau (Benkaci et Dechemi, 2004). Cela passe par la modélisation du comportement hydrologique du bassin versant qui est devenu un outil essentiel dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à l'évaluation et à la gestion optimale des ressources en eau en maîtrisant la relation pluie –débit. Il s'agit d'une représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux temporellement et spatialement pour reproduire la variable observée dans la nature. Cependant, divers types de modèles hydrologiques existent dans la littérature qui sont soit conceptuelles, soit physiques ; global ou distribué à toutes les échelles de temps. A l'échelle

interannuelle, il y a tendance à une régularisation des régimes par compensation des années humides et sèches. Nous citons quelques modèles développés par [Medinger \(1948\)](#), [Coutagne \(1949\)](#), [Kabouya \(1990\)](#), [Taibi \(1993\)](#), [Mouilhi \(2003\)](#), [Touazi et al.\(2004\)](#). Au pas de temps mensuel, l'approche est plus complexe qui est d'une part à la non linéarité de la relation pluie-débit et d'autre part ; la difficulté de quantifier certains paramètres de la modélisation en particulier l'évapotranspiration réelle du sol ([Dechemi et al., 2003](#) ; [Oudin et al., 2005](#)). Nous citons quelques modèles au pas de temps mensuel développés par [Kabouya \(1990\)](#), [Makhlouf et Michel \(1994\)](#), [Mouelhi \(2003\)](#).

Sur la base de ce qu'a été décrit précédemment, notre travail de recherche a pour objectif de trouver un modèle pluie-débit adéquat pour simuler les débits liquides des oueds de la Macta parmi les trois (03) approches proposées. Pour cela, la modélisation pluie-débit du bassin versant de la Macta a été réalisée au pas de temps mensuel, prenant en compte la distribution spatiale des différents sous-bassins. Les modèles à tester sont : le modèle à base de régression linéaire multiple (RLM), le modèle conceptuel à réservoir à deux paramètres (GR2M) et le modèle à base des réseaux de neurones artificiels (RNA). L'approche proposée est traitée pour la première fois au bassin versant de la Macta dans le cadre de ce travail ce qui représente l'originalité de cette recherche.

Pour aboutir à cet objectif, Nous acheminons le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre concerne les notions de la modélisation pluie-débit et une littérature des différents modèles existants au pas du temps mensuel en présentant l'architecture des trois (03) modèles adoptés.
- Le deuxième chapitre traite deux points essentiels : i) une description soignée du bassin versant de la Macta ; principalement : la situation géographique, caractéristiques morphométriques, climatiques, hydrographiques, géologiques et hydrogéologiques. ii) présentation des différentes données nécessaires à l'analyse et l'étude de la thématique de la recherche. Ces données sont de nature climatique (Précipitations, température moyenne de l'air) et de nature hydrométrique (débit).
- Le troisième chapitre porte sur l'étude du régime des variables hydro-climatiques, s'ensuit d'une évaluation de la répercussion de la variabilité climatique sur les ressources en eau des oueds de la Macta.

- Le quatrième chapitre expose la modélisation pluie-débit au pas du temps mensuel par une évaluation de la performance et la robustesse des modèles (GR2M, RLM et RNA) appliqués aux sous bassins versant de la Macta. En suivant le protocole de comparaison, le modèle le plus approprié est choisi.
- Nous finissons notre modeste travail par une conclusion générale des observations et résultats des analyses faites et nous proposons des perspectives et recommandations pour élargir le champ d'application du modèle retenu pour aider les gestionnaires et les autorités locales dans la gestion quantitative des ressources en eau superficielles du bassin versant de la Macta.

CHAPITRE I :

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Introduction

Le cycle hydrologique est complexe et la modélisation de phénomènes intervenant dans celui-ci est devenue un outil indispensable notamment avec le développement des approches informatiques. Dans ce chapitre, le point est mis sur des notions générales de la modélisation pluie-débit ainsi qu'une description de l'architecture des modèles adoptés de simulation et de prévision du débit, fonctionnant au pas de temps mensuel.

I.1 Définition de la modélisation pluie-débit

Est une figuration rapprochée des systèmes hydrologiques complexes, basée sur la représentation mathématique ou physique des processus de transformation de la pluie en débit (figure I.1) (Ardoin, 2000).

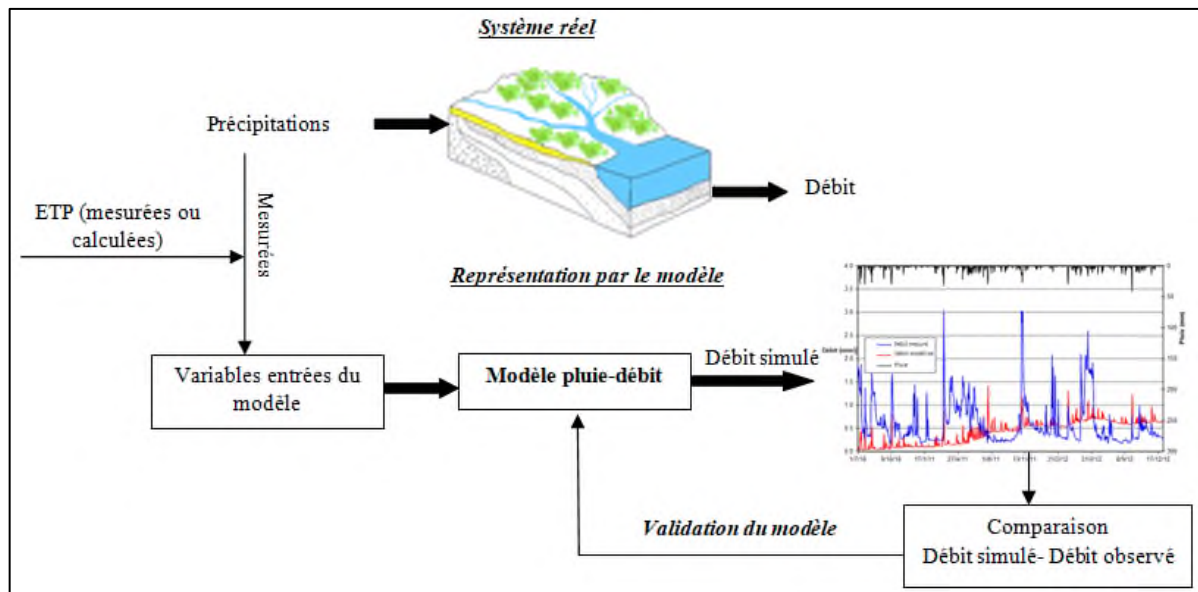


Figure I.1 : Principe de la modélisation pluie-débit

La modélisation pluie-débit est définie selon deux (02) dimensions ;(i)l'échelle d'espace, allant d'une maille de quelques mètres carrés au bassin versant de quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés.(ii) l'échelle du temps ; du pas de temps horaire jusqu'au pas de temps pluriannuel (Mouelhi, 2003).

I.2 Prévision et prédiction hydrologique

La prévision concerne l'estimation des conditions futures à une date donnée, ou durant un intervalle de temps spécifique, alors que *la prédiction* représente l'estimation des conditions futures, sans référence à un temps spécifique (Lettenmaier et Wood, 1993).

I.3 Intérêt de la modélisation du débit

La modélisation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est indispensable pour de nombreuses applications qui dépendent de l'utilisateur et des questions auxquelles il cherche à répondre, à savoir :

- ✓ **La modélisation comme outil de recherche** : Cela demeure le champ d'application privilégié de la modélisation hydrologique. La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées dont différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants pouvant être confrontés aux mesures (Korichi et Hazzab, 2012 ; Otmane et al., 2019).
- ✓ **La modélisation comme outil de prévision** : Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques pour étudier l'évolution future du débit d'un cours d'eau, exemple : la prévision des crues ou des étiages (Lehbab-Boukezzi et al., 2016 ; Fotovatikhah et al., 2018 ; Mosavi et al., 2018).
- ✓ **La modélisation comme outil d'extrapolation** : Il s'agit de la reconstitution de séries de débits manquantes ; exemple la délimitation de zones inondables pour la prévention des risques. D'où il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages (Korichi et Hazzab, 2012 ; Chea et Oeurng, 2017).

I.4 Eléments d'un modèle hydrologique

Selon [Singh et al. \(1995\)](#), un modèle hydrologique est généralement défini par:

- **Lois**, sont les principes de base utilisés pour construire les équations qui régissent les phénomènes se produisant sur le bassin versant comme le ruissellement, l'infiltration, l'évaporation, ...etc).
- **Structure**, c'est le nombre et le type d'équation qui va représenter le système et les hypothèses.
- **Variables d'entrée**, sont les données d'entrée du modèle, qui sont indépendantes.
- **Variables de sortie**, il s'agit de la réponse du système.
- **Variables d'état** : il s'agit des variables internes du système, qui évoluent en fonction du temps et qui caractérisent l'état ou l'image du système à un moment donné.
- **Paramètres** : sont des éléments caractéristiques du site de prévision ayant une pseudo-signification physique plus ou moins précise qui permettent d'ajuster le modèle aux différentes configurations hydrologiques traitées.

I.5 Etapes de modélisation pluie-débit

Toute modélisation hydrologique doit passer par deux (02) étapes essentielles, à savoir :

I.5.1 Calage

Un modèle de prévision doit être ajusté pour reproduire au mieux les séries chronologiques observées en procédant au calage des paramètres du modèle ([Laurent, 1996](#)). L'estimation des paramètres peut se faire manuellement par une procédure « essai et erreur » ou automatiquement par une fonction d'optimisation permettant d'améliorer la cohérence entre la réponse observée et celle simulée ([Gherissi, 2018](#)).

Pour vérifier si le modèle est calibré ou non, on doit observer l'auto-corrélation des écarts entre les débits observés et ceux modélisés ([Fortin et al., 1997a](#)).

I.5.2 Validation

Est une étape indispensable pour vérifier la qualité du modèle calibré sur une portion des données non utilisée lors du calage et en comparant les résultats aux valeurs mesurées correspondantes ([Fortin et al., 1997a](#)).

I.5.3 Techniques de calage-validation

Selon [Refsgaard et Storm \(1990\)](#), quatre (04) types de procédures de validation sont proposées :

- *Split-sample test* ; consiste à diviser la série des données en deux (02) parties égales et réaliser le calage sur une partie et la validation sur le reste de la série.
- *Différent split-sample test* ; la série des données est divisée selon le changement des conditions d'une variable caractéristique (exemple : Précipitations).
- *Proxy-catchment test* ; deux (02) bassins adjacents similaires sont utilisés, les données d'un bassin sont utilisées au calage et la validation se fait sur les données du deuxième bassin.
- *Different proxy-catchment test* ; pour chaque bassin la série des données est divisée en période sèche et humide et dont le calage se fait sur une période pour un bassin et la validation se fait sur une autre période du deuxième bassin (Figure I.2).

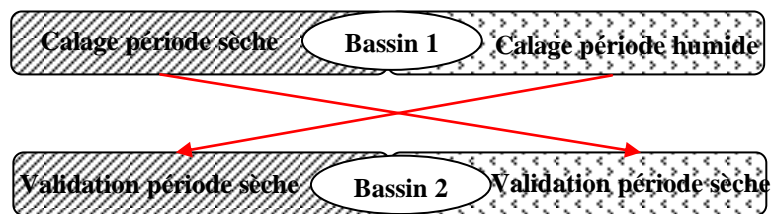


Figure I.2 : Schématisation de la procédure différent proxy-catchment test

- Une autre technique utilisée dans le calage-validation d'un modèle est celle du double échantillon qui consiste à subdiviser la série d'observation en sous périodes avec calage sur une période et la validation sur le reste de la période. Cette tâche est répétée successivement afin de caler le modèle sur toutes les sous périodes tout en réservant une période de mise en route (S_0) (Figure I.3) ([Mouelhi, 2003](#)). Cette technique est utilisée dans les modèles conceptuels à réservoirs par [Mouelhi \(2003\)](#).

En général, la phase de calibration contient environ 2/3 du total de la série alors que le reste des données sera réservé à la validation du modèle ([Dawson et Wibly, 1998](#) ; [Abba et al., 2017](#) ; [Chea et Oeurng, 2017](#) ; [Zamoum et Souag-Gamane, 2019](#) ; [Hai et al., 2020](#)).

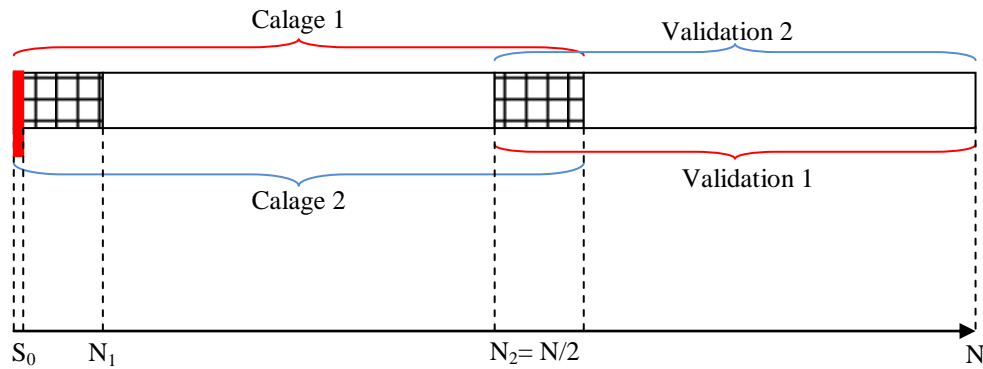


Figure I.3 : Schématisation de la technique du double échantillon Source : (Mouelhi, 2003)

I.6 Critères de performance d'un modèle pluie-débit

Pour évaluer l'efficacité d'un modèle pluie-débit donné, on procède à estimer l'amplitude des erreurs de modélisation par le biais des critères statistiques. Ci-après, les critères les plus utilisés en hydrologie:

I.6.1 Coefficient de corrélation (r) et coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de corrélation est donné par la formule suivante :

$$r = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Q_o})(Q_{si} - \overline{Q_s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{si} - \overline{Q_s})^2}} \right) \quad (I.1)$$

Avec :

Q_{oi} : débit observé au temps i ;

Q_{si} : débit simulé au temps i ;

$\overline{Q_o}$: débit observé durant la période d'observation n ;

$\overline{Q_s}$: débit simulé durant la période d'observation n .

Le coefficient de corrélation (r) est primordial qui indique le taux de corrélation entre les valeurs observées et celle simulées. Les valeurs de r varient entre -1 et 1, une valeur positive signifie une corrélation directe tandis que la valeur négative montre une corrélation négative (Yassen et al., 2019). Alors que la variance calculée au moyen du coefficient de détermination R^2 qui est un estimateur global linéaire indiquant comment la précision du modèle suit la variation des valeurs observées. La valeur R^2 varie de 0 à 1 avec un seuil de satisfaction d'un modèle donné est de 0,5 ($R^2 > 0,5$) (Moriasi et al., 2007). Néanmoins, R^2 ne

peut pas interpréter les performances du modèle dans la reproduction des valeurs individuelles observées (Chung *et al.*, 2002).

I.6.2 RMSE (erreur quadratique moyenne) et MAE (erreur moyenne absolue)

Ils sont donnés par les formules suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad (I.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{oi} - Q_{si}| \quad (I.3)$$

Avec :

Q_{oi} : débit observé au temps i ;

Q_{si} : débitsimulé au temps i ;

n : nombre d'observation ;

RMSE et MAE sont des indicateurs de qualité de l'ajustement absolus qui représentent l'ampleur de l'erreur globale (moyenne ponctuelle) pendant la période. Lorsqu'ils sont de valeurs petites, cela indique de faibles erreurs de modélisation et par conséquent l'efficacité du modèle (Djrbouai et Souag-Gamane, 2016). Ils sont acceptés pour les variables continues, qui décrivent les valeurs observées et prévues dans les unités appropriées (Djrbouai et Souag-Gamane, 2016). L'erreur relative métrique RMSE est largement applicable lorsque la distribution d'erreur du modèle développé est normale alors que MAE est utile quand il est uniforme. Mais à eux seuls, ils peuvent ne pas montrer la vraie validation d'un modèle développé.

I.6.3 NSE

Il a été proposé par Nash et Sutcliffe (1970) et est donné par :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (I.4)$$

Avec :

Q_{oi} : débit observé au temps i ;

Q_{si} : débitsimulé au temps i ;

\bar{Q}_o : débit observé durant la période d'observation n .

Le NSE est un outil d'évaluation de modèle normalisé basé sur le carré des différences entre les données observées et simulées pour lesquelles une pondération égale pourrait être donnée aux débits faibles et élevés (Deo et al., 2017). Il permet de fournir des informations complémentaires à r, RMSE et MAE. Il varie entre $-\infty$ et 1, avec un résultat parfait proche de 1. Le seuil de satisfaction d'un modèle en utilisant le critère NSE est 0,5 ($NSE > 0,5$) (Chen et al., 2012 ; Chea et Oeurng, 2017) alors que Perrin et al. (2007) exige le seuil de 0,7.

I.6.4 MAPE (Mean absolute percentage error)

Il indique le degré d'erreur de prédiction par rapport à la valeur réelle observée, est donné par la formule suivante :

$$MAPE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{oi} - Q_{si}}{Q_{oi}} \right| \right] \times 100 \quad (I.5)$$

Avec :

Q_{oi} : débit observé au temps i ;

Q_{si} : débit simulé au temps i ;

n : nombre d'observation ;

Ce paramètre est très utile lorsque la taille de la variable de prédiction est très significative pour évaluer l'exactitude de la simulation (De Myttenaere et al., 2016; Khair et al., 2017).

I.6.5 L'indice de Willmott (d)

Appelé aussi l'indice de convention (Index of agreement). Il a été développé par Willmott (1982).

$$d = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (|Q_{si} - \bar{Q}_o| + |Q_{oi} - \bar{Q}_o|)^2} \right] \quad (I.6)$$

Avec :

Q_{oi} : débit observé au temps i ;

Q_{si} : débit simulé au temps i ;

\bar{Q}_o : débit observé durant la période d'observation n .

Cet indice varie entre 0 et 1, est sensible aux valeurs extrêmes (Legates et McCabe Jr, 1999).

I.6.6 RSR (Observation standard deviation ratio)

Est un modèle développé par (Moriassi et al., 2007) qui est le rapport entre le RMSE et l'écart type des données observées comme indiqué en équation 7.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2}} \quad (I.7)$$

Avec :

Q_{oi} : débit observé au temps i ;

Q_{si} : débitsimulé au temps i ;

$\overline{Q_o}$: débit observé durant la période d'observation n .

La valeur de RSR est positive, variant de 0 à une grande valeur positive mais plus la valeur de RSR est basse la performance de la simulation est meilleure avec une limite supérieure de 0,7 ($RSR < 0,7$) (Moriassi et al., 2007 ; Chen et al., 2012).

Un modèle du domaine hydro-environnemental peut être évalué efficacement en utilisant au moins un paramètre d'ajustement (exemple r , NSE) et une mesure d'erreur absolue (exemple RMSE) (Elkiran et al., 2019; Sharghi et al., 2019). Selon Fotovatikhah et al. (2018) la plupart des recherches scientifiques publiées utilisent seulement le coefficient de corrélation r et RMSE comme critères d'évaluation alors que les autres critères tel que RE (relative error), MAE (mean absolute error), MSE (mean square error) and SSE (sum of squares error) sont les moins utilisés.

I.7 Qualités requises des modèles hydrologiques

Face à la diversité des bassins versants, un modèle hydrologique pré-sélectionné doit satisfaire certaines qualités pour son mise en œuvre :

- ✓ Le modèle doit être basé sur des fondements scientifiques sains ;
- ✓ Les données nécessaires au bon fonctionnement du modèle doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci ;
- ✓ La complexité du modèle doit être aussi limitée que possible pour atteindre l'objectif de performance (Grayson et al., 2002);
- ✓ Le modèle doit être correctement validé en fonction des résultats qu'il fournit, transposable et robuste (Benkaciet Dechemi, 2004).

I.8 Classification des modèles hydrologiques

Dans la bibliographie il existe plusieurs types de modèles dont plusieurs critères permettent de les classer. Cependant, un modèle peut être :

- Physique ou mathématique selon le critère d'abstraction.
- Déterministe ou stochastique selon la nature des variables.
- Global ou distribué selon la discrétisation spatiale.
- Conceptuel ou empirique selon la description des sous processus.

L'ensemble de ces critères sont récapitulés en figure I.4 pour obtenir une classification assez nette des modèles hydrologiques (Assaba, 2004).

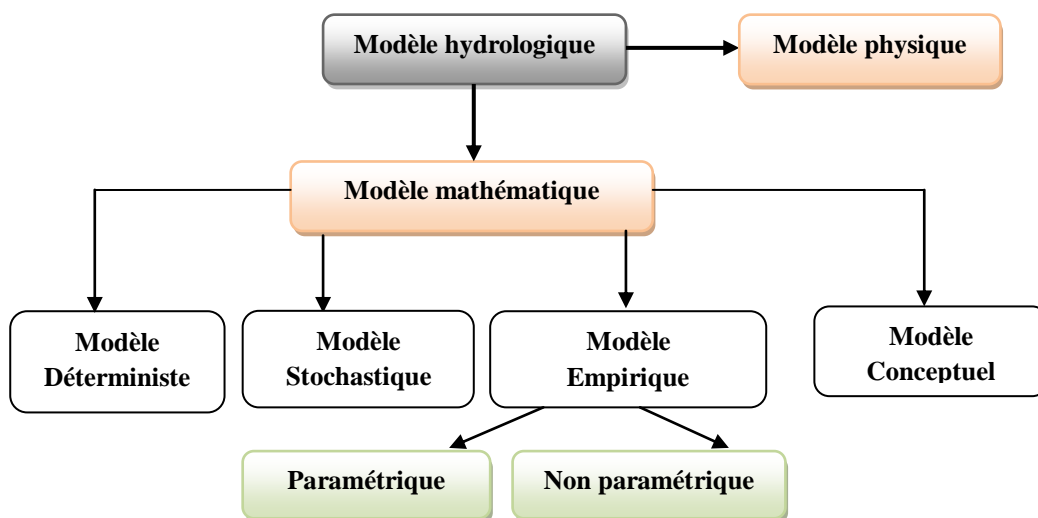


Figure I.4 : Les différents types de modèles pluie-débit

- **Modèles physiques** : ce sont des représentations de la réalité sous forme d'une maquette ou un modèle réduit au laboratoire.
- **Modèles mathématiques** : ils sont de nature soit déterministe, se basant sur des équations physiques, ou bien sur des schémas de fonctionnement (modèle conceptuel). Il existe aussi des modèles de nature probabiliste (modèle stochastique) (Assaba, 2004).

Les modèles mathématiques peuvent être distribués (modèle distribué) ou agrégés (modèle global) selon l'introduction ou non de la notion de la discrétisation spatiale de l'unité du bassin versant d'étude.

I.8.1 Classification des modèles mathématiques

I.8.1.1 Modèles déterministes

Ce type de modèle consiste à décrire les processus qui se déroulent dans un bassin, en s'appuyant sur des mesures physiques entre les facteurs internes (sols, couverts végétaux, nappes souterraines) et externes (pluviométrie et température) du bassin versant (Fortin et al., 1997a ; Kamni, 2017). Les modèles déterministes sont appliqués dans la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages hydrauliques, la prévision des crues, la délimitation des zones inondables dans la gestion du territoire, la quantification des impacts des changements climatiques (Fouchier, 2010).

I.8.1.2 Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels appelés aussi modèles « boîte grise », tentent à représenter le bassin versant par des analogies et des concepts. L'analogie la plus réputée en hydrologie est la représentation des fonctionnements des sols et des nappes par des réservoirs d'humidité (d'où l'appellation modèle à réservoir) interconnecté suivant une dimension verticale, dont le débit de vidange de chaque réservoir dépend du taux de remplissage (Ambroise, 1999). Les paramètres de vidange des réservoirs sont obtenus de façon empirique par calage, sans signification physique. Les modèles de génie rural GR est un exemple de modèles conceptuels pour des applications d'ingénierie. Au pas de temps mensuel, nous citons le modèle GR3M développé par Kabouya (1991) dans sa thèse de doctorat et le modèle GR2M développé par Mouilhi et al. (2006).

I.8.1.3 Modèles empiriques

Appelés aussi des modèles « boîte noire », qui sont pour la plupart de nature global, permettant de décrire la relation structurelle entre les observations des variables d'entrée et de sortie (le débit) du bassin versant à partir des données. Mais les facteurs influençant sur la réponse du système ne sont pas toujours mesurés et/ou mesurables (Fortin et al., 1997b). C'est pour cela on parle souvent de modèles probabilistes. Ce type de modèle s'adapte mieux dans l'interpolation que dans l'extrapolation (Kamni, 2017).

Nous citons quelques tentatives de modélisations à l'échelle moyenne inter-annuelle réalisées par Medinger (1948), Coutagne (1949), Deri (1977), Taibi (1993), Touazi (2003). La limite principale de ces approches, outre leur complexité est le nombre de paramètres à

considérer. De plus, tous les processus hydrologiques impliqués ne sont pas assez bien compris pour pouvoir être décrits par un ensemble d'équations (Fortin et al., 1997b).

Parmi les modèles empiriques, nous distinguons les modèles paramétriques comme la *régression linéaire* et le *modèle de BOX et JENKINS* ; ainsi qu'une approche non paramétrique comme la *méthode des k voisins les plus proches*. Il y a aussi les modèles à base de réseaux de neurones artificiels (RNA), les méthodes de régression floue, ainsi que les modèles de systèmes chaotiques (Fortin et al., 1997a).

I.8.1.4 Modèles stochastiques

Les modèles stochastiques décrivent par des lois de probabilité des phénomènes non observables. Ce type de modèle est utilisé dans la conception d'ouvrage d'évacuateur de crue ou à vérifier les performances d'ouvrages existants (Kamni, 2017).

I.9 Architecture des modèles pluie-débit retenus

Nous présentons l'architecture des modèles adoptés dans cette recherche fonctionnant au pas de temps mensuel. L'ensemble analysé comporte trois (03) modèles de différentes origines fonctionnant à l'échelle de temps mensuelle; un modèle de la régression linéaire multiple (RLM), un modèle conceptuel de type GR2M. Un troisième modèle à base du réseau de neurones artificiels (RNA).

I.9.1 La régression linéaire multiple RLM

Selon Fortin et al. (1997a), la prévision des débits Q_t peut s'écrire :

$$Q_t = \sum_{t^*=t-r}^t (\varphi_{t^*} \cdot Q_{t^*} + \lambda_{t^*} \cdot X_{t^*}) + \varepsilon_t \quad (\text{I.8})$$

Où :

φ_t : Coefficient d'ajustement associé à la variable observé Q_t ;

$\lambda_t = (\lambda_{1,t}, \lambda_{2,t}, \dots, \lambda_{k,t})$: Vecteur de coefficients d'ajustement associé au vecteur de variables explicatives $X_t = (X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{k,t})$;

ε_t : un bruit normal $N(0, \sigma)$.

La régression est un outil de modélisation très puissant et bien connu, mais parfois mal utilisé pour la prévision à moyen terme (débits mensuels) (Fortin et al., 1997a). Selon Dechemi et al. (2003), l'essai d'une régression linéaire pluie-débit à l'échelle mensuelle s'avère

inefficace à cause du coefficient de corrélation souvent peu significatif ($R^2 < 0,5$) ainsi que le risque d'obtention des débits négatifs.

Malgré le développement de l'outil informatique et des modèles hydrologiques, le recours à la RLM demeure essentiel dans la comparaison avec d'autres nouveaux modèles. Nous citons quelques récents travaux [Zounemat-Kermani et al.\(2013\)](#),[Nourani et al. \(2019a\)](#),[Hai et al. \(2020\)](#).

I.9.2 Modèle de génie rural GR2M

I.9.2.1 Bref historique des modèles GR

Les modèles GR sont élaborés et développés par l'IRSTEA (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'agriculture). L'idée a été lancée par [Michel \(1983\)](#) après l'analyse d'un modèle conceptuel à neuf paramètres où il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en œuvre et du calage. L'idée s'est développée alors et plusieurs versions ont été proposées successivement par [Kabouya \(1990\)](#),[Kabouya et Michel \(1991\)](#),[Makhlouf \(1994\)](#),[Makhlouf et Michel\(1994\)](#),[Mouelhi \(2003\)](#),[Mouelhi et al.\(2006\)](#) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle ([Perrin et al., 2007](#)).

I.9.2.2 Principales caractéristiques

Les principales caractéristiques des modèles GR sont :

- Au niveau du processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique du processus à petite échelle ([Perrin et al., 2007](#)).

La transformation de la pluie en débit est régie par deux (02) processus ; une fonction de production permettant de modéliser la transformation de la pluie brute en pluie nette à partir des données d'entrée grâce à un premier réservoir. Alors que la fonction de transfert a pour but de modéliser la transformation de la pluie nette en débit.

- Au niveau de l'espace : les modèles GR sont de nature global, les tentatives de distribution progressive n'ont pas abouti à des résultats intéressants jusqu'à présent à cause du comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité ([Kabouya et Michel, 1991](#);[Perrin et al., 2007](#)).

- Nature des données d'entrée : Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie (P) et d'évapotranspiration potentielle (ETP).

I.9.2.3 Architecture du modèle GR2M

Est un modèle pluie-débit global au pas de temps mensuel à deux paramètres. Il est appelé dans la littérature anglo-saxonne « modèles de bilan en eau » (Kabouya et Michel, 1991). La version présentée en figure I.5 est celle de Mouelhi et al. (2006) avec les équations relatives aux différentes phases.

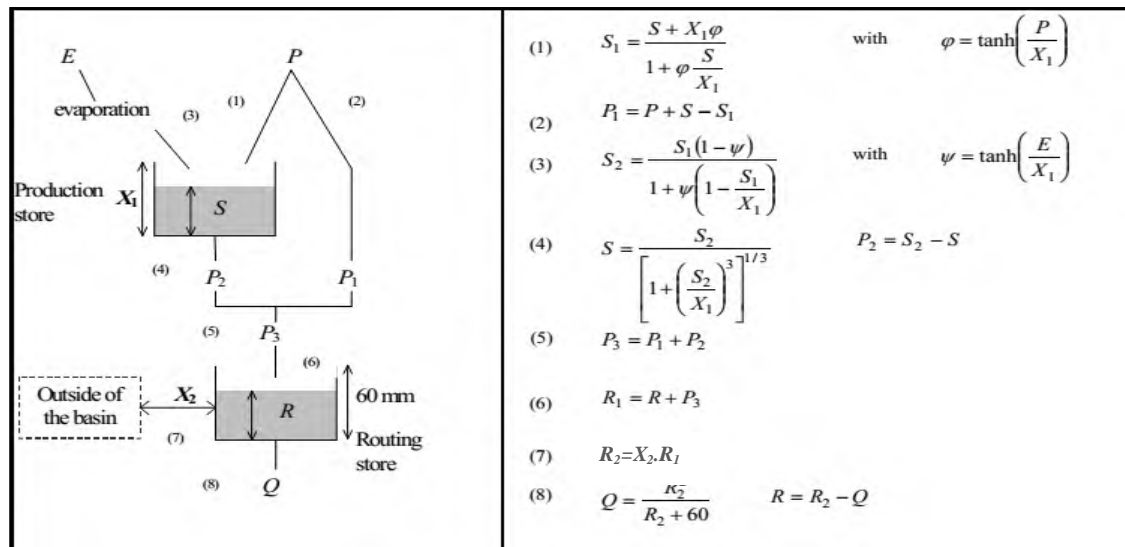


Figure I.5 : Schéma de fonctionnement du modèle GR2M

La modélisation par GR2M est régie par deux (02) réservoirs: un réservoir de production de suivi d'humidité du sol et un réservoir de routage de capacité fixe à 60mm. Les paramètres de calage par ce modèle sont :

- ✓ X_1 : la capacité maximale du réservoir sol (paramètre libre) en mm.
- ✓ X_2 : il représente les échanges latéraux du bassin avec les autres bassins versants. Il est adimensionnel et a comme référence la valeur de 1 (i.e $X_2 < 1$ signifie que le bassin alimente les bassins adjacents (perte), $X_2 > 1$ signifie que le bassin est alimenté à partir des autres bassins (réception)) (Zamoum, 2020).

Selon Perrin et al. (2007), les valeurs des paramètres du modèle GR2M obtenus sur un large échantillon des bassins versants étudiés sont limitées aux intervalles indiqués au tableau I.1.

Tableau I.1 : valeurs des paramètres du GR2M sur un large échantillon de bassin versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X_1 (mm)	380	140-2640
X_2	0,92	0,21-1,31

Le comportement hydrologique du bassin par GR2M présenté en figure I.5 est décrit par les étapes suivantes :

- ✓ Sous l'influence de la pluie P , le niveau S dans le réservoir de suivi d'humidité devient S_1 (Eq.01) dont $X_1 > 0$ (mm). La pluie en excès devient P_1 (Eq.02).
- ✓ Sous l'effet de la température, une quantité d'eau est prélevée du réservoir et le niveau S_1 devient S_2 (Eq.03).
- ✓ Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 et son niveau S est prêt pour les calculs du mois suivant (Eq.04).
- ✓ La pluie P_3 qui atteint le réservoir de routage est la somme de P_1 et P_2 (Eq.05) et le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 (Eq.06).
- ✓ L'insertion d'un terme d'échange en eau souterraine X_2 conduit à une augmentation considérable de l'efficacité du modèle et le niveau R_1 dans le réservoir devient alors R_2 (Eq.07).
- ✓ Le niveau R du réservoir de routage de capacité maximale fixée à 60 mm. Le réservoir se vidange suivant une fonction quadratique et le débit simulé est ainsi calculé (Eq.08).

I.9.2.4 Initialisation du système et période de mise en route

Elle consiste à prédéfinir des valeurs des paramètres du modèle à partir d'un état initial du système avant de passer à la phase d'optimisation. La période de mise en route est une manière de pré-chauffer le modèle, est définie de façon arbitraire par le modélisateur. Au pas de temps mensuel, 12 observations est fixée comme période de mise en route (Mouelhi, 2003).

I.9.2.5 Application du modèle GR2M

Le modèle GR2M a été testé sur différents bassins et des contextes climatiques variés. Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications telles que la gestion quantitative de la ressource en eau comme les travaux de Zamoum et Souag-Gamane (2019), Ditthakit et al. (2021), Etude d'impact (Mrad et al. (2014), Boufekane et Saighi (2018), Boulariah et al. (2019), Ouhamdouch et al. (2020)).

I.9.3 Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Ils sont issus des travaux du domaine de l'intelligence artificielle du cerveau humain réalisés par McCulloch et Pitts (1943). Avec la puissance de l'outil informatique et de la complexité des phénomènes hydrologiques, les recherches se sont approfondies vers ce

type d'approche. Nous citons quelques travaux hydrologiques dans les domaines de : Gestion de ressources en eau : [Riad et al. \(2004\)](#), [Machado et al. \(2011\)](#), [Zeroual et al. \(2016\)](#), [Sharghi et al. \(2019\)](#). Etude des éléments climatiques : [Zakhrouf et al. \(2016\)](#), [Nourani et al. \(2019a\)](#). Transport solide : [Boukhrissa et al. \(2013\)](#), [Tachi et al. \(2016\)](#), [Bouzeria et al. \(2017\)](#), [Campos et Pedrollo \(2021\)](#), [Meshram et al. \(2021\)](#). Etude des phénomènes extrêmes : [Zounemat-Kermani et al. \(2013\)](#), [Kourgialas et al. \(2015\)](#), [Djrbouai et Souag-Gamane \(2016\)](#). Qualité des eaux : [Abba et Elkiran \(2017\)](#), [Abba et al. \(2017\)](#), [Elkiran et al. \(2019\)](#).

I.9.3.1 Définition du RNA

Est un assemblage d'éléments appelés « neurones » interconnectés entre eux sous forme de réseau. Ces neurones sont organisés en couches et travaillant conjointement en s'envoyant des signaux (Figure I.6) à travers des liens (connexions synaptiques) pour résoudre un problème donné ([Dawson et Wilby, 1998](#)).

I.9.3.2 Caractéristiques des RNA

Selon [Dawson et Wilby \(1998\)](#), un RNA est caractérisé par :

- Le nombre de couches internes du réseau.
- Le nombre de neurones dans chaque couche.
- Le paramètre w_k de chaque connexion.
- La fonction d'activation ou de transfert.

I.9.3.3 Principe du fonctionnement

La figure I.6 est une représentation rapprochée du fonctionnement d'un neurone artificiel dont chacuna des vecteurs d'entrées de x_1 à x_n . Un poids w_k est associé à chaque vecteur, qui joue le rôle d'une synapse (zone de contact) ; élément principal d'interaction entre les neurones par lequel toutes les valeurs passantes par le neurone sont multipliées sous la forme $x_k \cdot w_k$. Le signal (s) arrivé au neurone de la couche cachée est la somme du produit scalaire entre un vecteur d'entrée et un vecteur poids, suivi d'un terme bw_0 appelé « biais ». Pour fournir la sortie finale du neurone, une fonction d'activation est attribuée à la valeur S qui permet à un neurone de changer d'état en fonction des signaux qu'il reçoit c'est alors sa fonction de transfert.

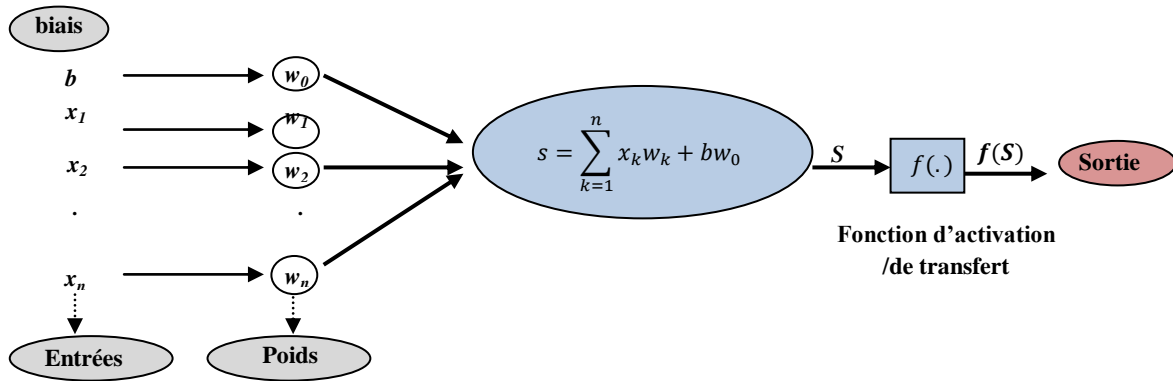


Figure I.6 : Principe d'un neurone artificiel

En hydrologie, à cause de la non linéarité de la relation pluie-débit, la fonction d'activation doit être non linéaire, continue dérivable et monotone qui sert à limiter la sortie du neurone dans un intervalle prédéfini et/ou augmenter la non linéarité du neurone (Dawson et Wilby, 1998).

I.9.3.4 Types de fonctions d'activation

Parmi les fonctions d'activation les plus utilisées, on retrouve la fonction sigmoïde ou la fonction log-sigmoïde, qui peuvent avoir une forme logistique ou hyperbolique (Dawson et Wilby, 1998; Dechemi et al., 2003 ; Borne et al., 2007).

a. La fonction logistique

L'expression de la fonction logistique s'écrit par la formule I.9 comme suit :

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (\text{I.9})$$

Les valeurs de cette fonction oscillent dans l'intervalle $[0,1]$ (figure I.7). La moindre variation de x causera une variation significative de $f(x)$, ce qui rend cette fonction très performante pour les entrées proches de 0.

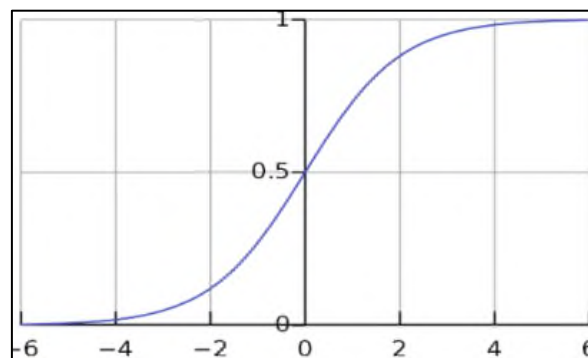


Figure I.7 : Allure de la fonction logistique

b. La fonction hyperbolique (tanh)

L'expression s'écrit comme suit :

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1 \quad (\text{I.10})$$

Les valeurs de sortie de cette fonction varient entre -1 et +1 (figure I.8), traduisant par un gradient plus important que celle de la fonction logistique.

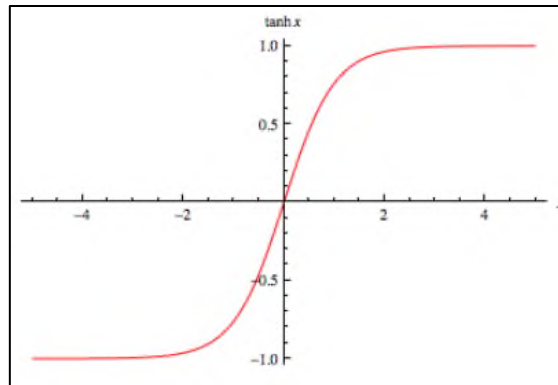


Figure I.8 : Allure de la fonction logistique

I.9.3.5 Typologie des RNA

a. Selon la structure et l'organisation des neurones au sein du réseau, plusieurs variétés d'agencements possibles de neurones artificiels existent.

- ✓ *Le réseau de neurones monocouche* : appelé aussi Perceptron et est constitué de deux (02) couches seulement ; une couche d'entrée et une autre de sortie reliées entre elles. Le réseau dispose que d'une matrice de poids ce qui lui rend un classificateur linéaire de données (Wira, 2009).
- ✓ *Le réseau de neurones multicouches (Perceptron multicouche (MLP))* : Il est composé d'une ou plusieurs couches cachées (Figure I.8) dont chacune prend ses entrées sur les neurones de la couche précédente et le nombre de couches correspond aux nombre de matrices de poids du réseau (Wira, 2009). Ce type est mieux adapté pour traiter les types de fonction non linéaires, exp : prévision des débits (Dechemi et al., 2003).

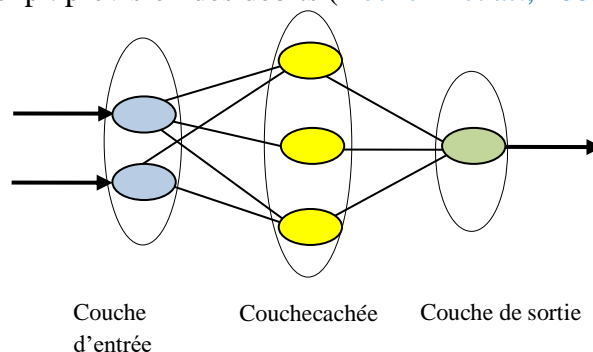


Figure I.9 : Structure du perceptron multicouche (MLP)

b. Selon la procédure du traitement de l'information, on distingue :

- ✓ *Réseau de neurones à propagation avant (Feed-forward)* ; est un type statique dans lequel le signal traverse le réseau d'entrée à la sortie sans retour en arrière de l'information (Msaaf et Belmajdoub, 2015). Il peut être monocouche ou multicouches (figure I.10).
- ✓ *Réseau de neurones récurrent (RNN) (Feed-back)* ; il permet de traiter l'information plusieurs fois autrement dit c'est le traitement en cycle en réintroduisant les sorties des neurones intermédiaires dans les neurones d'entrée, après leur avoir subi un délai d'une unité de temps. Ce type de réseau récurrent forme une classe de modèles non linéaires autorégressifs avec moyenne mobile (NARMA) adaptés pour estimer des processus et des systèmes dynamiques et non linéaires (Lapedes et Farber, 1987). Les RNN se composent d'une ou plusieurs couches classés en trois (03) groupes (figure I.10) : Les réseaux récurrents à couches (e.g : Réseau de Jordan), Les réseaux à compétition (e.g : Self-organisation mapping) et les réseaux à connexions symétriques (e.g : Réseau de Hopfield) (Borne et al., 2007). Le modèle de Hopfield est le réseau de neurones récurrent d'une seule couche le plus connu.
- ✓ *Les réseaux de neurones à résonance* ; cette appellation fait référence à son fonctionnement. En effet, au sein de ce type de réseau, l'activation de tous les neurones est renvoyée à tous les autres neurones en provoquant des oscillations (Stolc et al., 2011). Ils peuvent prendre différentes formes avec des degrés de complexité plutôt élevés.
- ✓ *Les réseaux de neurones auto-organisés* ; ils sont adaptés au traitement de l'information spatiale (Zamoum et Souag-Gamane, 2019). Par des méthodes d'apprentissage non supervisé, ce type de réseau est capable d'étudier la répartition des données dans des grands espaces. Le modèle le plus connu est la carte auto-organisatrice de Kohonen développée par Kohonen en 1982 qui est très utilisée dans le domaine des ressources en eau, nous citons à titre d'exemple les travaux de Kalteh et al. (2008), Razavi et Coulibay (2013).

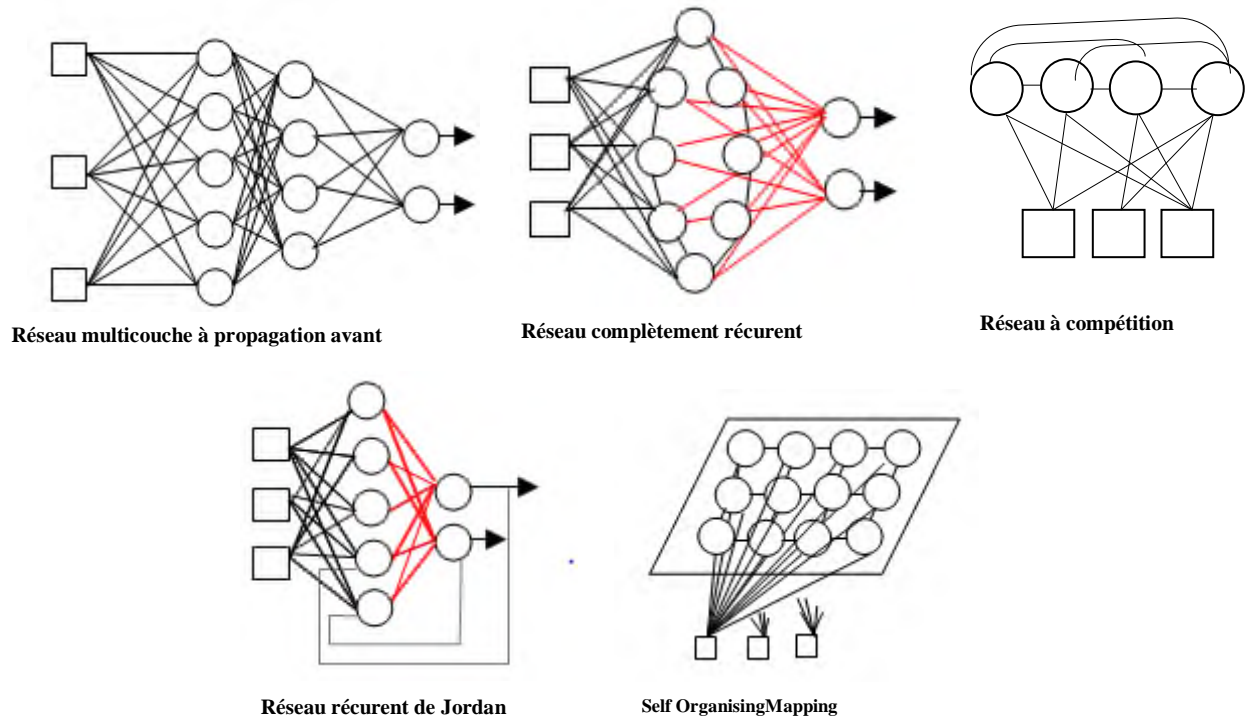


Figure I.10 : différents architectures neuronales Source : (Belouz, 2009)

I.9.3.6 Apprentissage des RNA

La modélisation par le RNA consiste à trouver le nombre optimal de neurones dans la couche cachée ainsi que le nombre d'itérations pour aboutir au modèle le plus performant. A cet effet, le comportement du réseau neuronal (i.e poids synaptiques) est modifié en réaction avec les stimulations qu'il reçoit de son environnement jusqu'à minimiser l'erreur de modélisation et par conséquent améliorer les performances du réseau (Belouz, 2009), c'est l'apprentissage ou le calage.

Il existe plusieurs règles d'apprentissage regroupé en trois (03) catégories :

1. *L'apprentissage non supervisé* : il s'agit d'apporter au réseau des entrées sans faire appel à la réponse désirée, en ajustant les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données d'entrée (Dechemi et al., 2003). Il est utilisé pour visualiser ou analyser les données mais il est le moins utilisé (Belouz, 2009).
2. *L'apprentissage renforcé ou semi-supervisé* : une similitude avec l'apprentissage non supervisé est fourni sans définir les variables à la sortie du réseau. Par la suite, sur la base des indications obtenues ; un superviseur juge l'évolution de l'apprentissage au

moyennant une mesure de degrés de performance (un grade ou score) après quelques itérations (Dechemi et al., 2003).

3. *L'apprentissage supervisé* (ou à partir d'exemple) : il fait appel à des exemples de comportement où on associe une réponse spécifique à chaque signal d'entrée autrement dit présenter des couples (entrées-sorties désirées) (Belouz, 2009). La procédure s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur entre les sorties du réseau et les résultats observés soit minimisée (Dechemi et al., 2003).

I.9.3.7 Algorithmes d'apprentissage des RNA

Pour minimiser l'écart entre les réponses réelles du réseau et ses réponses désirées, des méthodes d'optimisation non linéaire peuvent s'appliquer aux réseaux multicouches appelées « algorithmes d'apprentissage ». Ces méthodes explorant les poids du réseau à partir d'un point de départ fixé pour les mettre à jour (Belouz, 2009). L'algorithme le plus utilisé dans l'apprentissage supervisé est la rétro-propagation du gradient de l'erreur (Dawson et Wilby, 1998) (figure I.11). L'erreur est d'abord définie à la sortie, par rapport à des valeurs souhaitées mesurées sur un système puis propagée jusqu'à la couche des entrées. Par conséquent, l'ensemble des poids entre les neurones des couches successives se mettent à jour à chaque itération et l'erreur est minimisée (Dechemi et al., 2003).

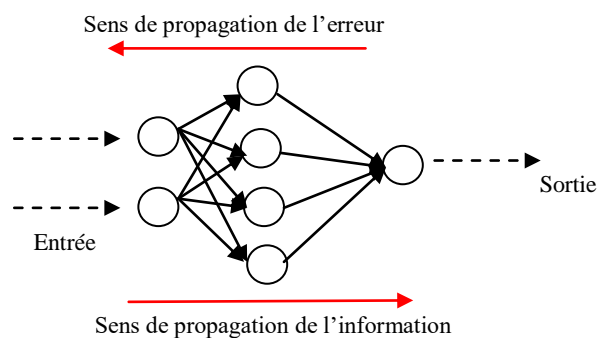


Figure I.11 : Algorithme de rétro-propagation des gradients

Selon Wira (2009), plusieurs règles d'apprentissage peuvent s'appliquer aux réseaux multicouches, parmi elles : *Une méthode batch* (eg. l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM)). *Des méthodes itératives* (eg. Backpropagation through time (BPTT) et la descente de gradient) et *des méthodes semi-directes* (eg. le gradient conjugué, l'algorithme Espérance-Maximisation (EM), le récurrent Extended Kalman Filter (EKF)).

La règle de Levenberg-Marquardt (LM) est la plus connue qui assure la convergence la plus rapide, permettant d'obtenir des erreurs quadratiques moyennes les plus faibles (Belouz, 2009).

I.10 Problèmes de la modélisation pluie-débit

Au pas de temps mensuel, l'approche est plus complexe notamment en climat semi-aride, dû à :

- Non linéarité de la relation pluie-débit;
- Difficulté de quantifier certains paramètres de la modélisation en particulier l'évapotranspiration réelle du sol ;
- Erreurs de mesures des données hydro-pluviométriques, leur non homogénéité durant le mois (Bergstrom, 2006);
- La transposition de ces approches de modélisation avec le climat de l'Algérie qui est généralement semi-aride. Or, la plupart de ces modèles sont conçus dans des pays généralement à climat humide (Benkaci et Dechemi, 2004).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des modèles hydrologiques de simulation du débit. L'accent a été mis sur trois (03) modèles adoptés à savoir RLM, GR2M et RNA qui vont être testés aux oueds du bassin de la Macta afin de juger leurs adaptations.

CHAPITRE II :

CADRE NATUREL ET DONNÉES

D'ANALYSE

Chapitre II

Cadre naturel et données d'analyse

Introduction

Ce chapitre cerne les grands traits caractéristiques du grand bassin versant de la Macta ainsi que les différentes données hydro-climatiques utilisées, constituant une base à la compréhension et à l'interprétation de la modélisation pluie-débit.

II.1 Localisation géographique

Le bassin versant de la Macta est situé au Nord-Ouest de l'Algérie septentrionale ; dans le carré constitué par le $34^{\circ}34'$ et $35^{\circ}79'$ de latitude Nord et entre les longitudes $0^{\circ}56'$ Est et $1^{\circ}06'$ Ouest (Figure II.1). Il est délimité par les hauts plateaux de Ras El Ma, les plaines de Maalif et la dépression du chott Chergui au sud ; par le plateau de Telagh et les monts de Tlemcen à l'Ouest ; par les monts de Tessala au nord-ouest ; par le plateau de Tighenif et les monts de Saïda à l'Est. Il se jette directement dans la mer méditerranée par l'intermédiaire du marais de la Macta.

Le bassin versant de la Macta s'étend sur une superficie de l'ordre de $14\ 389\ \text{Km}^2$, est géré par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H) et l'agence du bassin hydrographique (A.B.H O.C.C) Oranais Chott Chergui, sous le code 11. Administrativement, les wilayas incluses dans le bassin de la Macta sont Mascara, Sidi Belabbes, Saida ; et partiellement les wilayas de Relizane, Mostaganem, Oran et Tlemcen.

Remarque : l'ensemble des cartes présentées dans ce travail ont été réalisées par le logiciel d'information géographique ArcGis version 10.2.

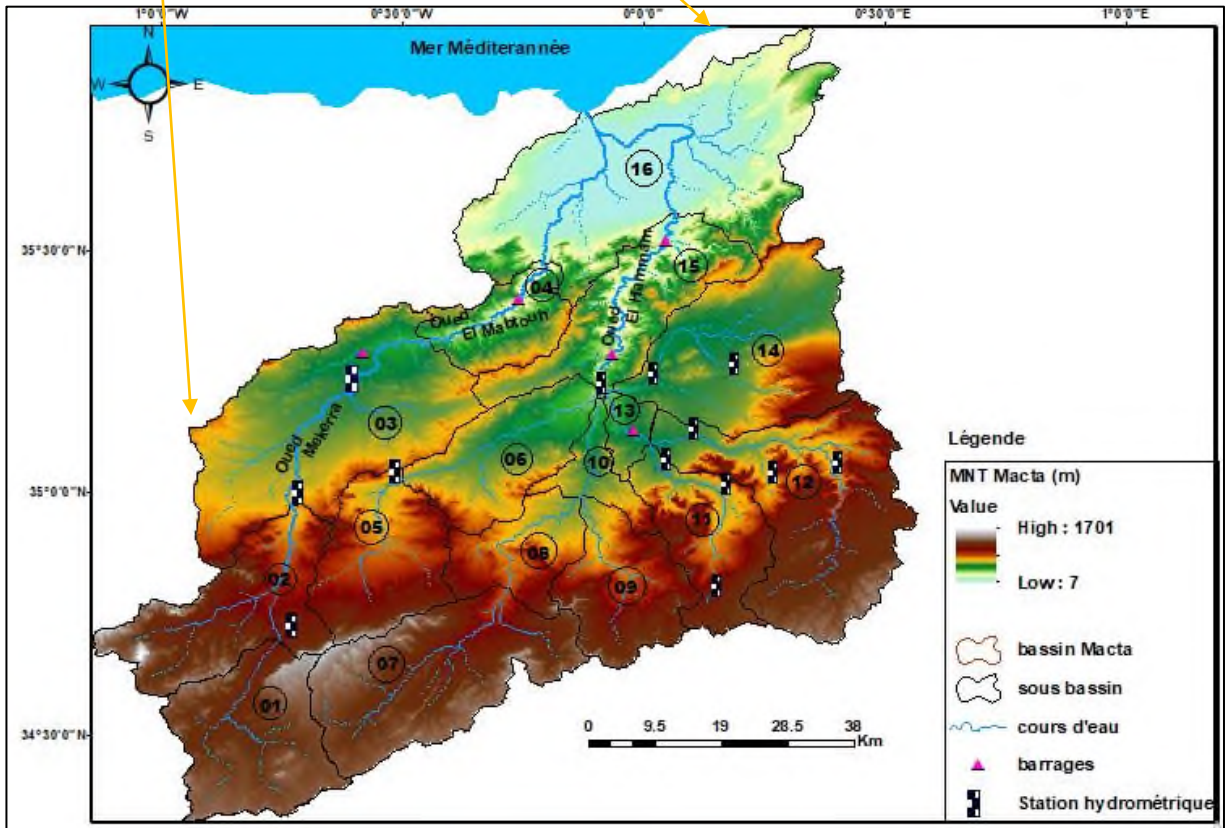
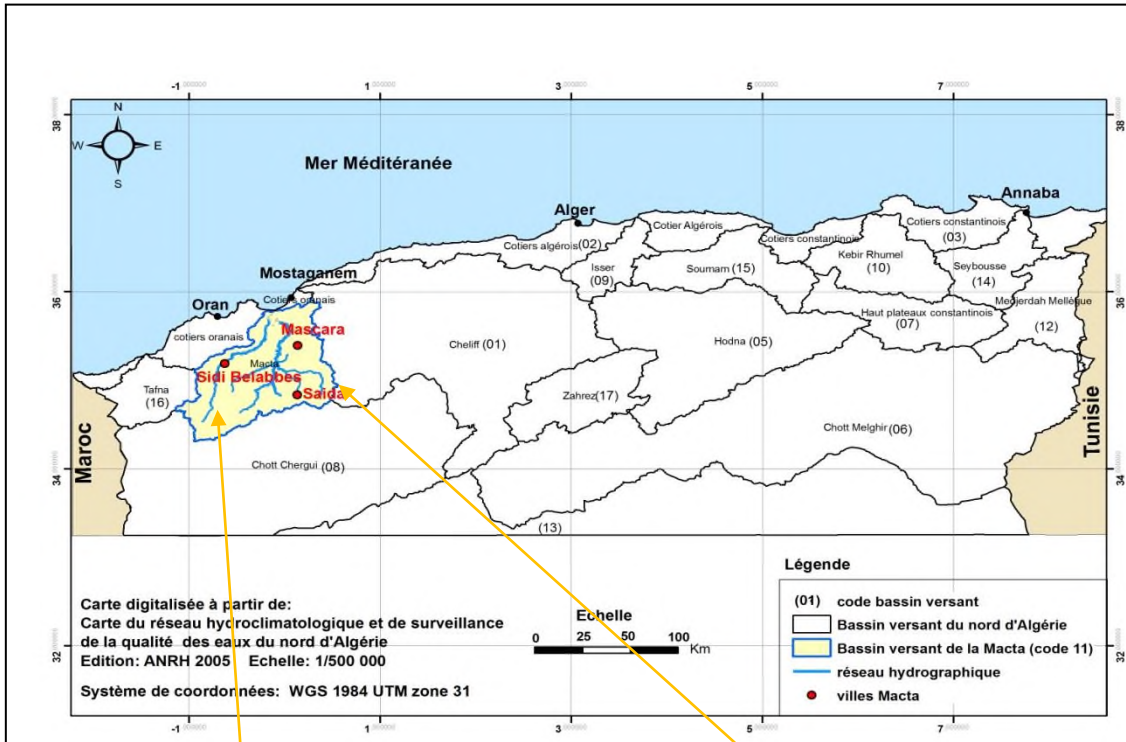


Figure II.1: Localisation géographique, Modèle numérique du terrain et réseau hydrographique du bassin versant de la Macta

II.2 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des sous bassins de la Macta

Selon le découpage de l'agence nationale des ressources hydriques (A.N.R.H), le bassin versant de la Macta est composé de seize (16) sous bassins versants (Figure II.1) drainés par des oueds temporaires de longueurs total égale à 8115 Km. Ces principaux oueds sont : Oued Mekerra et Oued El Mabtouh à l'Ouest et Oued El Hammam à l'Est qui se rejoignent pour traverser les basses plaines au nord en formant la Macta avant de se déverser à la mer. Les affluents du bassin versant de la Macta prennent naissance des massifs calcaires des monts de Dhaya et Saïda au sud (Khalidi, 2005).

Pour étudier la modélisation pluie-débit des oueds du bassin versant de la Macta, une nouvelle délimitation des sous bassins a été établie en considérant chaque station hydrométrique comme étant exutoire d'une surface de drainage où les stations choisies doivent être non influencées par un barrage en amont (Figure II.2). Ce choix est important dans la modélisation pluie-débit afin que les modèles choisis puissent reproduire les débits naturels des oueds de la Macta.

Les nouvelles surfaces de drainage ont été obtenues à l'issue de plusieurs étapes :

- ❖ Acquisition du MNT du bassin versant de la Macta (Figure II.1);
- ❖ Extraction du réseau hydrographique ; le chevelu hydrographique est obtenu en utilisant la fonction « hydrologie » intégrée dans ArcMap10.2 ;
- ❖ Une fois le réseau hydrographique est déterminé, les nouveaux sous-bassins seront délimités en fonction de l'exutoire arrêté.

Les caractéristiques morphométriques et hydrographiques des nouvelles surfaces sont mentionnées au tableau II.1.

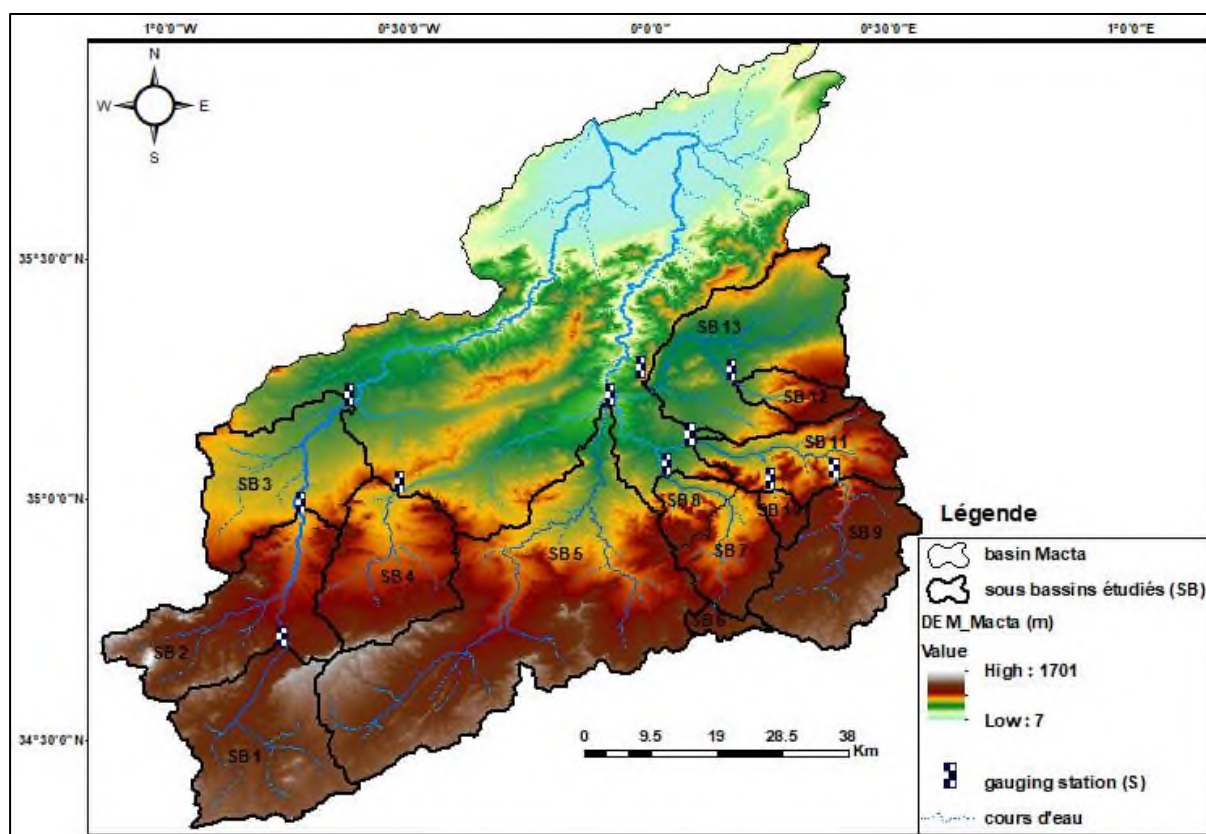


Figure II.2 : Nouvelle délimitation des sous bassins versants étudiés de la Macta

Au regard des résultats du tableau II.1, treize (13) nouveaux sous bassins ont été obtenus dont leur surface totale est de 3135 km². La surface des sous bassins varie de 60,6 km² (Saida PN03) à 2669 km² (Sidi Belabbes) avec une forme généralement allongée ($K_c > 1$). La pente moyenne est grande (>9‰) au sud du bassin (Sidi Ali ben youb, Hounet, Saida, Taria et Ghriss) ce qui reflète le caractère montagneux de la Macta. La densité de drainage D_d est variable (1,50 à Ghriss et 3,50 à Sidi Belabbes).

Tableau II.1:Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du nouveau découpage des sous bassins versant de la Macta

Code SBV	Nom SBV	Nouveau SBV	Nouveau code	S	P	K_c	L	I_m	D_d
01	Mekerra amont	Ras El Ma	SB1	955	127	1,15	21	5,95	2,70
02	Mekerra moyen	Sidi Ali Benyoub	SB2	1871,2	257,2	1,66	56	8,30	2,87
03	Mekerra aval	Sidi Belabbes	SB3	2669	329	1,78	113	7,27	3,50
05	Louza	Louza	SB4	743	120	1,23	19	7,46	2,90
10	Hounet	Hounet	SB5	2612	313,6	1,72	34	8,03	2,78
11	Saida	Saida PN 03	SB6	60,6	35,5	1,28	7	5,71	1,95
		P.Kilomètre 50	SB7	385,7	94	1,34	21	8,16	2,53
		Saida	SB8	597	130	1,49	35	10,92	2,91
12	Taria	Sidi Mimoune	SB9	689,5	133,5	1,42	29	8,64	2,90
		DneBouchikhi	SB10	116,7	48,1	1,25	1	7,00	2,33
		Taria	SB11	1349	198	1,51	37	9,89	2,83
14	Ain Fekan	Ghriss	SB12	199,8	70	1,39	10	9,72	1,50
		Fekan	SB13	1189	158	1,28	16	6,73	2,94

Avec :

SBV : Sous bassin versant ; S: Surface drainée par le sous bassin versant (Km^2) ;

P: Périmètre (Km) ; K_c : Indice de forme ;L : longueur de l'oued principal (Km).

I_m : Pente moyenne du sous bassin versant (m/Km ou ‰) ;

D_d :Densité de drainage (Km/Km^2) ;

Les indices K_c , I_m et D_d sont calculés par les formules suivantes :

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \text{(II.1)}$$

$$I_m = \frac{\Delta H \cdot l}{S} \text{(II.2)}$$

ΔH : Équidistance entre deux (02) courbes de niveau consécutives ;

l : Longueur des courbes de niveau qui traversent chaque surface (m) ;

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \text{(II.3)}$$

$\sum_{i=1}^n L_i$: Somme des longueurs de tous les cours d'eau d'ordre i drainés par la surface (Km).

II.3 Relief

Le relief du bassin versant de la Macta est le résultat numérique d'un modèle du terrain (MNT) disponible gratuitement sur le site internet (<https://opentopography.org>) et subissant ultérieurement des traitements et analyses par des logiciels spécifiques (Arc Gis10.2) dont des couleurs sont attribuées à des fourchettes d'altitude donnée (Figure II.1). Le relief du bassin versant de la Macta est distingué selon trois (03) classes:

✓ **Massifs montagneux** : qui donne un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin ; les monts de Tessala (point culminant à 1061m) au Nord-Ouest qui sont traversés par l'oued Mebtouh et au Sud-Ouest, les monts de Tlemcen (pic à 1412m au djebel Ouargla) (Meddi et al., 2009). Les monts de Beni Chougrane (700m) occupant une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant et remonte, à l'Est, jusqu'aux monts de Saïda (1201m au djebel Tiffrit) et au Sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455m au djebel Mezioud) et les hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (1415m au djebel Beghira) (El Mahi et al., 2012).

✓ **Plaines alluviales** : Ce sont des étendues plates (400-500m d'altitude), insérées dans la partie centrale du bassin, comme la plaine de Sidi Bel Abbès associée à l'oued Mekerra à l'Ouest et la plaine de Ghriss à l'Est drainée par l'oued Fekane (Bekoussa et al., 2008 ; Faraoun et Benabdeli, 2010).

✓ **Plaines littorales** : Situées au nord du bassin comme la plaine de Habra-siget reconnue par des altitudes les plus faibles (inférieures à 9m), qui favorise la présence de plans d'eau, du marais et de steppes plus ou moins humides (Chibane et al., 2015).

II.4 Cadre géologique et hydrogéologique

Le bassin versant de la Macta occupe la partie occidentale de l'atlas tellien. En référence avec le relief du bassin qui est très varié, la géologie des terrains l'est aussi ; allant de l'âge primaire au quaternaire (Froget, 1980), est montré en figure II.3 et tableau II.2.

➤ Le sud du bassin (Monts de Dhaya) est formé de marnes et de grès du jurassique reposant sur un socle rigide (El Mahi et al., 2012). Les monts de Saïda sont formés presque totalement de matériaux jurassiques moyens et supérieurs et de crétacés inférieur et moyen. Ce massif peu plastique du Mésozoïque est disloqué par deux systèmes de failles qui sont

dus à la tectonique cassante des terrains carbonatés avec constitution de blocs dolomitiques déterminant les caractéristiques hydrogéologiques très particulières des régions karstiques (Sourisseau, 1973). A Ain Fekan, cet ensemble calcéiro-dolomitique du jurassique supérieur est limité par une faille qui le met en contact avec le crétacé inférieur argilo-gréseux. Cette interruption soudaine de la perméabilité des terrains est à l'origine des sources des Aïoune Fekan, où le Crétacé constitue un véritable barrage souterrain (Ouis, 2012). A l'Est du bassin, un prolongement de la série montagneuse de Béni Chougrane qui a une ossature crétacé et à recouvrement tertiaire très épais représentant des vestiges de l'ancien sillon méditerranéen, effondrés et transportés par charriage en deux ensembles principaux ; le crétacé moyen et supérieur et le nummulitique (Eocène et oligocène) (Ouis, 2012).

- Les plaines intérieures sont de vastes cuvettes d'effondrement à topographie plane provenant de la désagrégation des reliefs qui l'entourent (Benstaali et Benayada, 2017). Le substratum est argilo-marneux, gris et vert imperméable, d'âge miocène ou pliocène inférieur, comblée par des formations quaternaires détritiques ; principalement de l'argile et de marne dans la région de Habra et de l'argile sableuse avec des passages de gravier dans la région de Ghriss (Maizi et al., 2020).

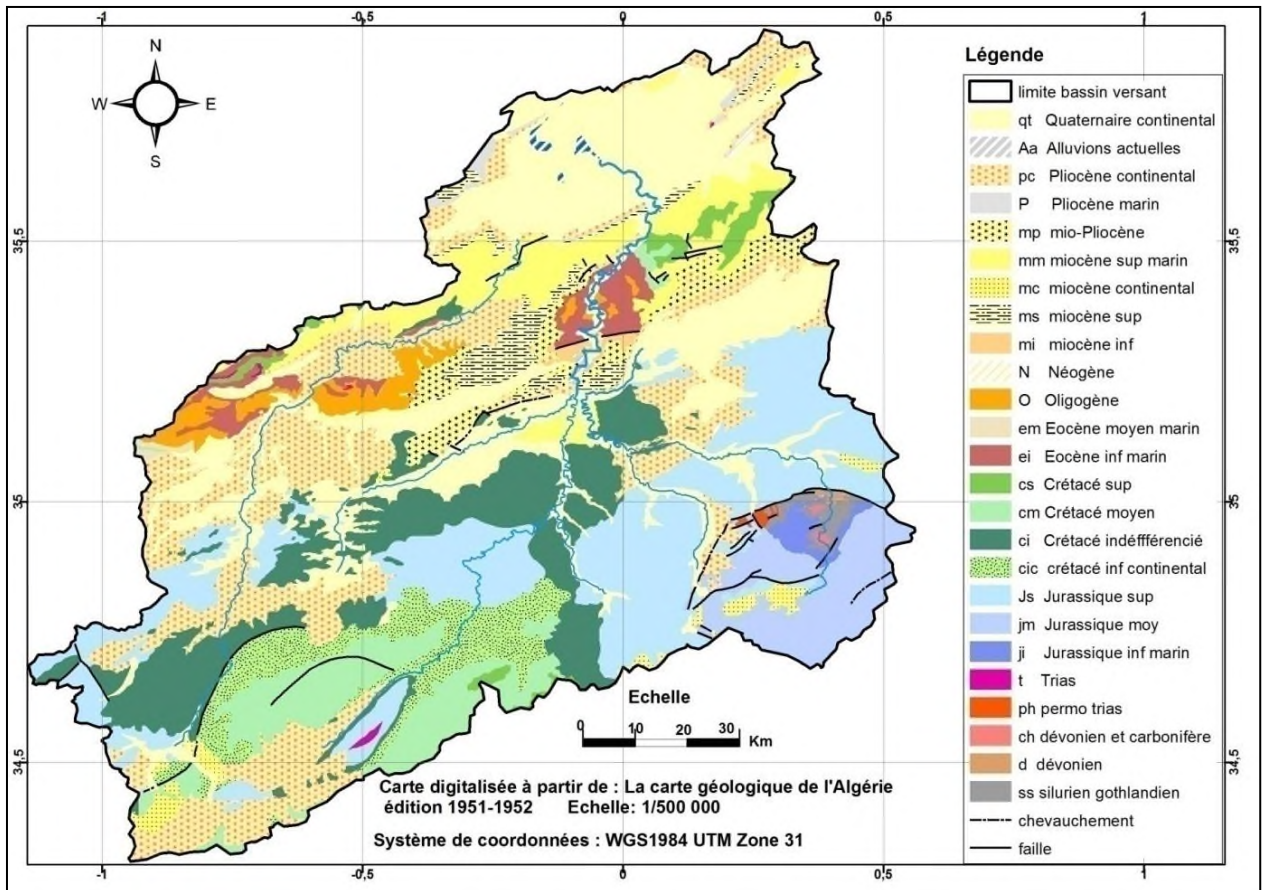


Figure II.3 : Carte géologique du bassin versant de la Macta

La stratigraphie des terrains du bassin versant de la Macta est donnée en détail au tableau II.2.

Les aquifères présents dans le bassin versant de la Macta sont de 02 natures (Figure II.8) :

- Les aquifères karstiques de nappe libre ou captive, constitués par des formations calcaires. Les eaux souterraines de ces aquifères réapparaissent en surface grâce aux failles qui déterminent les seuils hydrogéologiques comme le cas des dolomies de Nador (monts de Saida) et dolomite kimméridgienne (monts de Tlemcen) et le calcaire dolomitique de Ain Fekan ; représentant les plus importants réservoirs du bassin. Les exutoires naturels de ces aquifères sont les sources, comme celles de Sidi Ali Ben youb, de Ain Zarga et les sources de Ain Fekan (Ouis, 2012 ; Maizi et al., 2020).
- Les aquifères alluviaux stockés dans les grandes plaines et sont alimentés par les pluies et les oueds qui les traversent. Ils sont caractérisés par une bonne perméabilité et des profondeurs moyennes (100 à 300 m) qui les rendent productifs et accessibles comme les aquifères de Sidi Bel Abbas, Mascara et Habra-Sig (Maizi et al., 2020).

Tableau II.2 : Stratigraphie du bassin versant de la Macta

Ere	Période/ Epoque	Description	A(Km ²)	A (%)	
Quaternaire	Quaternaire	conglomérats, argiles, limons, argiles sableuses, alluvions, croute calcaires	2069,14	14,38	
Tertiaire	Pliocène	Grès marin, grès calabriens, sables, argiles sableuses rouge détritiques, calcaire lacustre	1854,74	12,89	
	Miocène	supérieur	Marnes grises à bancs de grès et à lentilles de galets plus ou moins cimentés.	188,50	1,31
		inférieur	Argiles et des marnes grises ou blanchâtres intercalés par des bancs de grès	14,39	0,10
	Oligocène	Couche argilo marneuse avec des bancs de grès, conglomérats	893,56	6,21	
	Eocène	moyen	Calcaires d'origine marine, grès mal assortis avec cimentation carbonatée.	18,71	0,13
		inférieur	Calcaires, grès marins en alternance avec des marnes colorées.	673,41	4,68
Secondaire	Crétacé Supérieur	Marnes salifères avec des bancs de calcaires, calcaires dolomitiques, grès de Franchetti	271,95	1,89	
	Crétacé inférieur	Calcaire gréseux devenant argileux en profondeur, grès fins argileux	1395,73	9,70	
	Jurassique supérieur	Marnes gris-vert, Calcaire variées souvent gréseux	4417,42	30,70	
	Jurassique moyen	Dolomies cristallines, calcaires, argiles, formation marno-calcaires, formation argilo gréseuse	1387,10	9,64	
	Jurassique inférieur	Alternance de grès quartziques, dolomies, roches limoneuses et marnes	746,79	5,19	
	Trias	Marne bariolée, dolomites, gypses	158,28	1,10	
Primaire	Permo-trias	Rhyolites, tufs associées	61,87	0,43	
	carbonifère	Granites	31,66	0,22	
	Dévonien	Schistes, quartzites	12,95	0,09	
	Silurien Gothlandien	Basaltes et tufs associées	192,81	1,34	
Total			14389	100	

II.5 Etude climatique

Le bassin versant de la Macta est soumis à l'influence de la mer et du relief. Les données climatiques des trois (03) stations climatologiques (Tableau II.3 et figure II.9) ont été utilisées pour identifier son régime climatique.

L'ensemble des données climatiques analysées ont été fournies par les services de l'Office National de Météorologie (O.N.M) d'Alger.

Tableau II.3:Caractéristiques des stations climatologiques utilisées

Nom de la station	Symbole station	Coordonnées			Année de mise en service	Période d'observation
		Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)		
Sidi Belabbes	C1	35°12 N	00°37W	475	1985	1985-2015
Saida	C2	34°52 N	00°09 E	750	1977	1977-2015
Ghriss	C3	35°13 N	00°09 W	511	1977	1977-2015

II.5.1 Précipitations

C'est un facteur primordial dans la détermination du régime climatique. Les précipitations mensuelles interannuelles enregistrées aux trois (03) stations climatologiques étudiées sont présentées ci-dessous (Figure II.4).

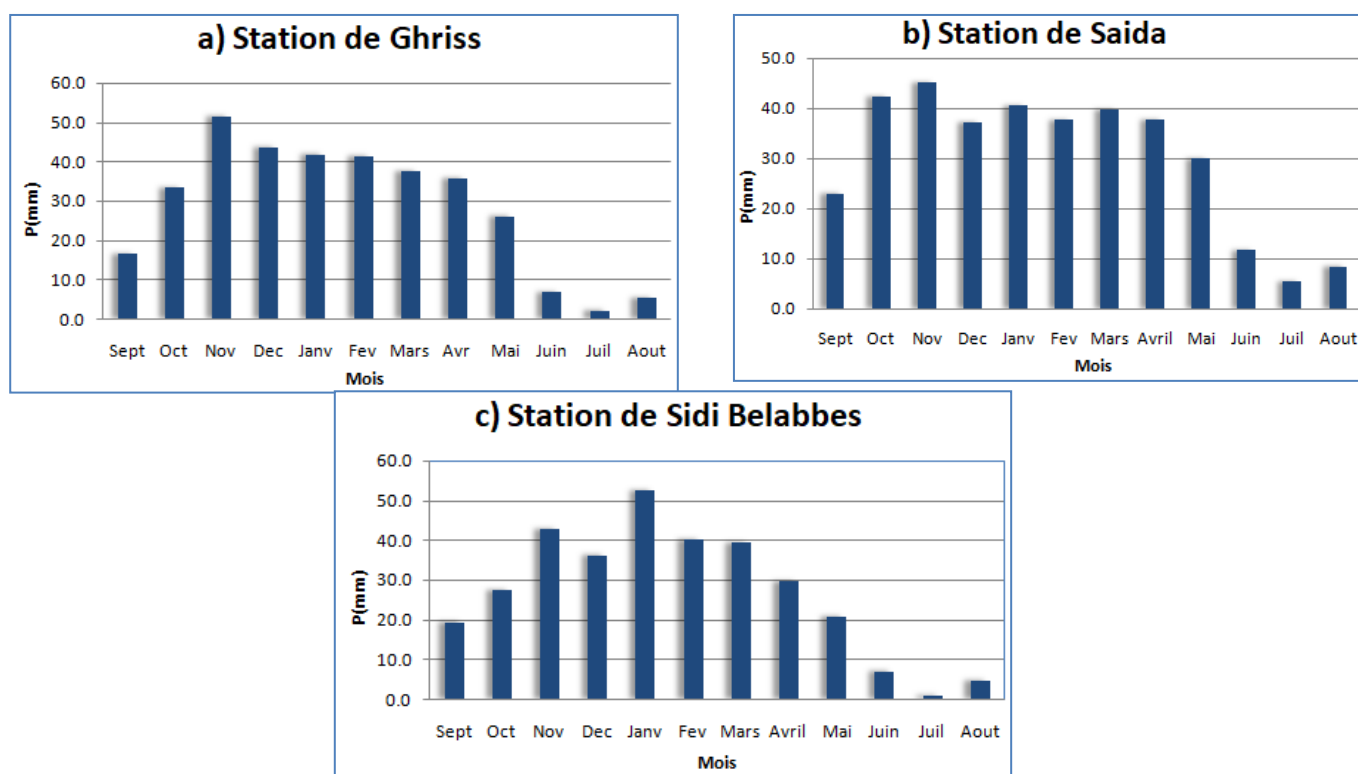


Figure II.4 :Précipitations mensuelles moyennes aux stations étudiées

L'analyse de ces tableaux montre que le maximum mensuel est enregistré au mois de Novembre aux stations de Saida, Mascara et au mois de Janvier à la station de Sidi Belabbes. Alors que les moyennes annuelles enregistrées aux trois stations climatologiques s'échelonnent entre 330 et 358 mm, ce qui caractérise un climat semi-aride ($200 < P < 400$ mm).

II.5.2 Température

C'est un paramètre incontournable ayant un grand impact sur le climat car il entre dans l'estimation du bilan hydrologique. Il est utilisé conjointement avec les précipitations.

La figure II.5 (a, b et c) présentent les températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées aux trois (03) stations climatologiques.

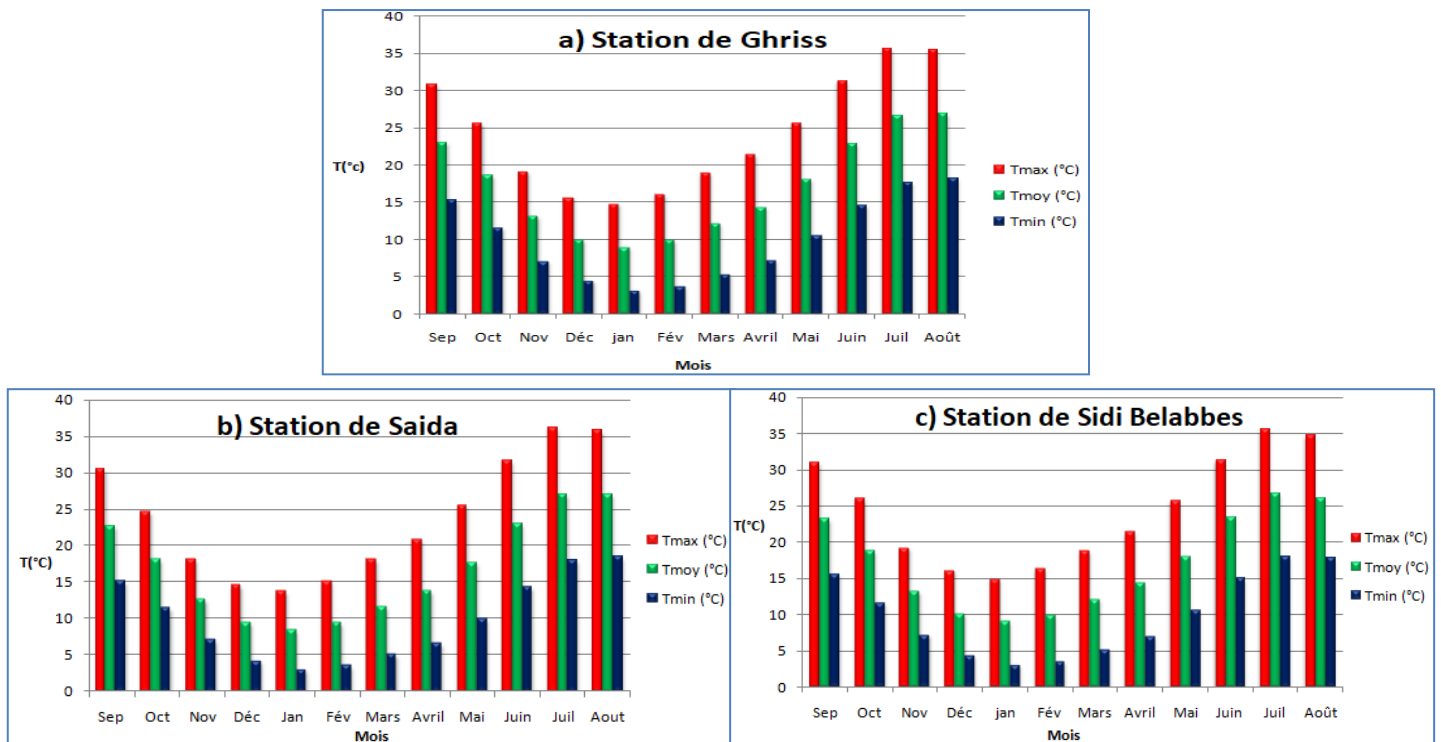


Figure II.5 :Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales aux stations étudiées

L'analyse de la figure II.5 montre que le bassin versant de la Macta est caractérisé par un hiver froid dont la température minimale s'abaisse jusqu'à 3°C pendant les mois les plus froids (Janvier). L'été est sec et chaud avec des températures qui augmentent jusqu'à (35 à 36)°C pendant les mois de Juillet et Aout ce qui caractérise un climat semi-aride.

II.5.3 Indice d'aridité annuelle de DE MARTONNE (I)

L'indice d'aridité annuelle "I" de DE MARTONE est calculé par la formule (II.4) établie par De Martonne (1926) qui tient compte des valeurs annuelles de précipitations et de température.

$$I = \frac{P}{(T+10)} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

P: Précipitations annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

Tableau II.4 :Indice d'aridité (I) annuelle de DE MARTONNE des trois (03) stations climatologiques

Nom de la station	P (mm)	T(°C)	I
Ghriss	341,8	17,0	12,6
Saida	358,2	16,7	13,4
Sidi Belabbes	329,8	17,1	12,2

Selon De Martonne (1926), Un climat est dit semi-aride lorsque l'indice d'aridité (I) est compris entre 10 et 20. Or, les trois (03) stations climatiques (Tableau II.4) sont dans l'intervalle semi-aride.

On peut également se référer directement au diagramme de DEMARTONE (Figure II.6) pour savoir le régime climatique où le régime est semi-aride avec des écoulements temporaires.

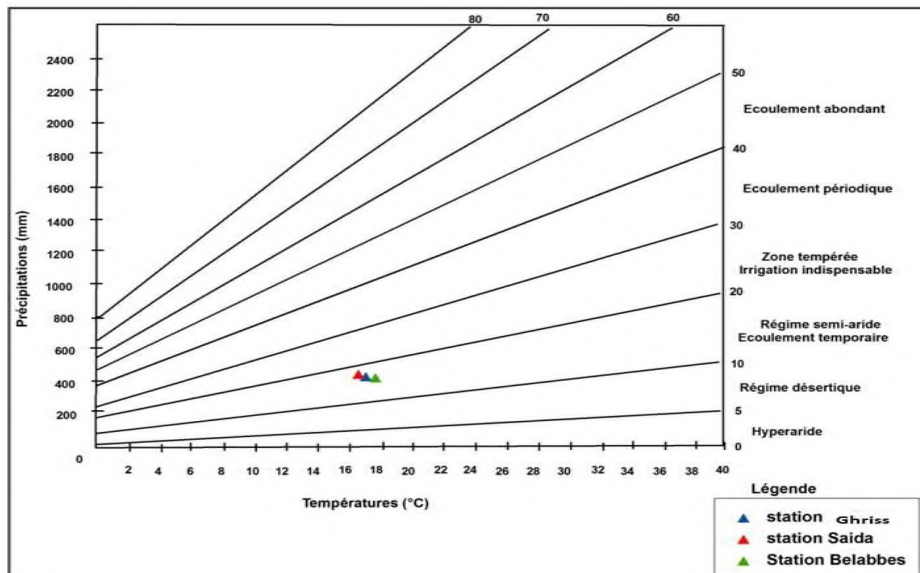


Figure II.6:Diagramme de DE MARTONNE des trois stations climatologiques

Ces indices climatiques utilisés, indique que le bassin versant de la Macta est situé dans l'étage bioclimatique semi-aride avec des écoulements temporaires.

II.6 Bilan hydrique

La méthode classique de THORNTHWAITE a été optée pour le calcul du bilan hydrologique, en se basant sur la disponibilité des données climatiques (Précipitations (P), Température (T)). Les principaux paramètres à calculer dans le bilan hydrologique sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (EXC).

II.6.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle "ETP"

L'évapotranspiration potentielle (ETP), correspondant à la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre, par un sol et transpirée par un couvert végétal (Hadj- Saïd, 2007).

Plusieurs méthodes existent pour calculer l'ETP, parmi elles il y a des formules empiriques dont le modèle de Thorntwhaiterévèle le plus utilisé (Soro et al., 2011; Bouteldjaoui et al., 2012), en tenant en compte seulement de la température mensuelle.

L'expression de Thorntwhaites'écrit sous la formule suivante :

$$ETP = 16 \left(10 \cdot \frac{t}{I}\right)^a \times F(\lambda) \quad (\text{II.5})$$

Dont :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (\text{II.6})$$

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{II.7})$$

$$a = 0,49 + (1,79 \times 10^{-2}) \times I - (7,71 \times 10^{-5}) \times I^2 + (6,75 \times 10^{-7}) \times I^3 \quad (\text{II.8})$$

Avec :

ETP : L'évapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

t : température moyenne mensuelle (°C).

I : Indice thermique annuel.

i : indice thermique mensuel.

a : Fonction complexe de l'indice I.

F(λ) : Facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré et du mois.

Les résultats de calcul de l'ETP mensuelle sont récapitulés dans les tableaux II.7, II.8 et II.9.

Tableau II.5 :L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Ghriss

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
Paramètres													
T(°C)	23,0	18,6	13,1	9,9	9,0	9,9	12,1	14,3	18,1	22,9	26,7	26,9	17,0
P(mm)	16,4	33,3	51,5	43,7	41,8	41,4	37,5	35,8	26,1	6,7	2,1	5,3	341,8
i	10,1	7,3	4,3	2,8	2,4	2,8	3,8	4,9	7,0	10,0	12,6	12,8	80,9
a	1,79												
F(λ)	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	
ETP	107,2	68,8	32,6	19,7	16,7	19,5	34,0	48,4	81,8	125,0	166,2	159,1	878,9

Tableau II.6 :L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Sidi Belabbes

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
Paramètres													
T(°C)	23,2	18,8	13,1	10,1	9,0	9,9	12,1	14,4	18,1	23,5	26,7	26,0	17,1
P(mm)	19,3	27,5	42,8	36,2	52,5	40,2	39,4	29,6	20,7	7,0	0,9	4,7	320,7
i	10,2	7,4	4,3	2,9	2,5	2,8	3,8	4,9	7,0	10,4	12,7	12,2	81,1
a	1,79												
F(λ)	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	
ETP	108,2	69,8	32,7	20,3	16,9	19,4	33,7	48,6	80,5	128,7	165,2	149,8	873,9

Tableau II.7:L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Saïda

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
Paramètres													
T(°C)	22,7	18,1	12,6	9,4	8,4	9,4	11,6	13,8	17,7	23,0	27,0	27,0	16,7
P(mm)	23,0	42,3	45,1	37,2	40,5	37,6	39,6	37,7	29,9	11,6	5,4	8,4	358,2
i	9,9	7,0	4,1	2,6	2,2	2,6	3,6	4,6	6,8	10,1	12,9	12,9	79,1
a	1,76												
F(λ)	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	
ETP	105,0	66,6	31,3	18,5	15,4	18,4	32,4	46,4	79,2	125,5	169,4	161,4	869,4

Les résultats de calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaiteaux trois (03) stations climatiques, indiquent des valeurs moyennes annuelles se rapprochant entre elles et comprises entre (869 à 879)mm. Cependant, L'ETP mensuelle est maximale en période chaude qui est traduite par des températures élevées contre de faibles précipitations. A partir de la saison

d'Automne, l'ETP décroît progressivement jusqu'à atteindre des valeurs où les précipitations sont plus importantes par rapport à la température.

II.6.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle "ETR" et l'excédent "EXC"

L'évapotranspiration réelle (**ETR**) correspond à la quantité d'eau effectivement (réellement) évaporée par le sol et transpirée par la végétation.

D'après [Soro et al.\(2011\)](#), le calcul de l'ETR, RFU et EXC est effectué de la façon suivante :

1^{er} cas : pluie mensuelle P est supérieure à l'évapotranspiration potentielle (P>ETP)

Si $(P-ETR)+R_{i-1} < RFU$ alors $R_i = (P-ETR)+R_{i-1}$, il ya remplissage de la RFU.

Si $(P-ETR)+R_{i-1} \geq RFU$ alors $R_i = RFU$ et l'excédent(EXC) sera affecté aux ruissellement ou à la percolation.

2^{ème} cas : pluie mensuelle P est inférieure à l'évapotranspiration potentielle (P<ETP)

Si $R_{i-1} \geq ETP-P$ alors $ETR = ETP$ et $R_i = R_{i-1} + (P-ETR)$, la RFU se vide

Si $R_{i-1} < ETP-P$ alors $ETR = P + R_{i-1}$ et $R_i = 0$, il va se produire un déficit hydrique D qui représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

Sachant que :

RFU : réserve en eau du sol facilement utilisable par les plantes (la valeur maximale est fixée ici à 50 mm ([Remenieras, 1976](#))).

L'un des points les plus délicats dans l'application de la méthode de Thornthwaite réside dans le choix de la hauteur maximum d'eau qui peut être accumulée dans le sol (RFU).

R_i : la réserve effective à la fin du mois considéré en mm.

R_{i-1} : la réserve effective à la fin du mois précédent en mm.

Le calcul du bilan hydrologique est récapitulé dans les tableaux II.8, II.9 et II.10.

Tableau II.8:Bilan hydrique à la station de Ghriss par Thornthwaite

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
ETP (mm)	107,2	68,8	32,6	19,7	16,7	19,5	34,0	48,4	81,8	125,0	166,2	159,1	878,9
P(mm)	16,4	33,3	51,5	43,7	41,8	41,4	37,5	35,8	26,1	6,7	2,1	5,3	341,8
P-ETP (mm)	-90,8	-35,5	18,9	24	25,1	21,9	3,5	-12,6	-55,7	-118,3	-164,1	-153,8	
ETR(mm)	16,4	33,3	32,6	19,7	16,7	19,5	34	48,4	63,5	6,7	2,1	5,3	
RFU (mm)	0	0	18,9	42,9	50	50	50	37,4	0	0	0	0	
Da = ETP-ETR (mm)	90,8	35,5	0	0	0	0	0	0	18,3	118,3	164,1	153,8	580,8
Exc= P-ETP (mm)	0	0	0	0	25,1	21,9	3,5	0	0	0	0	0	25,4

Tableau II.9:Bilan hydrique à la station de Sidi Belabbes selon Thornthwaite

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
ETP (mm)	108,2	69,8	32,7	20,3	16,9	19,4	33,7	48,6	80,5	128,7	165,2	149,8	873,9
P(mm)	19,3	27,5	42,8	36,2	52,5	40,2	39,4	29,6	20,7	7,0	0,9	4,7	320,7
P-ETP (mm)	-88,9	-42,3	10,1	15,9	35,6	20,8	5,7	-19	-59,8	-121,7	-164,3	-145,1	
ETR(mm)	19,3	27,5	32,7	20,3	16,9	19,4	33,7	48,6	51,7	7	0,9	4,7	
RFU (mm)	0	0	10,1	26	50	50	50	31	0	0	0	0	
Da = ETP-ETR (mm)	88,9	42,3	0	0	0	0	0	0	28,8	121,7	164,3	145,1	591,1
Exc= P-ETP (mm)	0	0	0	0	35,6	20,8	5,7	0	0	0	0	0	62,1

Tableau II.10:Bilan hydrique à la station de SaidaparThornthwaite

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
ETP (mm)	105,0	66,6	31,3	18,5	15,4	18,4	32,4	46,4	79,2	125,5	169,4	161,4	869,4
P(mm)	23,0	42,3	45,1	37,2	40,5	37,6	39,6	37,7	29,9	11,6	5,4	8,4	358,2
P-ETP (mm)	-82	-24,3	13,8	18,7	25,1	19,2	7,2	-8,7	-49,3	-113,9	-164	-153	-511,2
ETR(mm)	23	42,3	31,3	18,5	15,4	18,4	32,4	46,4	71,2	11,6	5,4	8,4	
RFU (mm)	0	0	13,8	32,5	50	50	50	41,3	0	0	0	0	
Da = ETP-ETR (mm)	82	24,3	0	0	0	0	0	0	8	113,9	164	153	545,2
Exc= P-ETP (mm)	0	0	0	0	25,1	19,2	7,2	0	0	0	0	0	51,5

Sachant que :

ETP :L'évapotranspiration potentielle (mm), **P**:Précipitations (mm).

ETR :L'évapotranspiration réelle (mm). **RFU** :Réserve facilement utilisable (mm)

Da :Déficit hydrique agricole (mm). **EXC** : L'excédent (mm).

Les résultats des tableaux précédents de calcul du bilan hydrique montrent que pour l'ensemble des stations étudiées, la RFU se vide progressivement à partir du mois d'Avril jusqu'au épuisement total. Cependant, le déficit hydrique apparaît au mois de Juin jusqu'au Octobre pour atteindre en moyenne 1,5 fois la valeur des précipitations. A partir du mois de Novembre, les précipitations sont plus importantes que l'ETP alors que la (RFU) commence à se reconstituer pour atteindre son maximum (RFU=100 mm) où l'excès sera affecté aux écoulements ou à la percolation.

II.7 Occupation du sol

La carte d'occupation des sols du bassin versant de la Macta (Figure II.7) a été établie en mode « non supervisé » par télédétection en utilisant le logiciel « ENVI 4.7 » et ArcGis

10.2 selon les étapes suivantes :

- Acquisition de quatre (04) images satellitaires des régions de Mascara, Saida, Sidi Belabbes et Oran par le capteur LANDSAT de résolution 30 m prise en Octobre 2015.
- Extraction du bassin versant de la Macta.
- Une classification non supervisée est établie.
- Attribution de classes à différentes zones d'occupations de sols.

La surface occupée par chaque classe est donnée au tableau II.11.

Tableau II.11: Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol dans le bassin versant de la Macta

N° de classe	Occupation du sol	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
1	Couvert végétal permanent	2948,03	20,49
2	Couvert végétal temporaire	8335,48	57,93
3	Couvert végétal clairsemé	2663,24	18,51
4	Sols nus	302,89	2,10
5	Eau libre	14,86	0,10
6	Agglomération	125,40	0,87
	Total	14 389,00	100,00

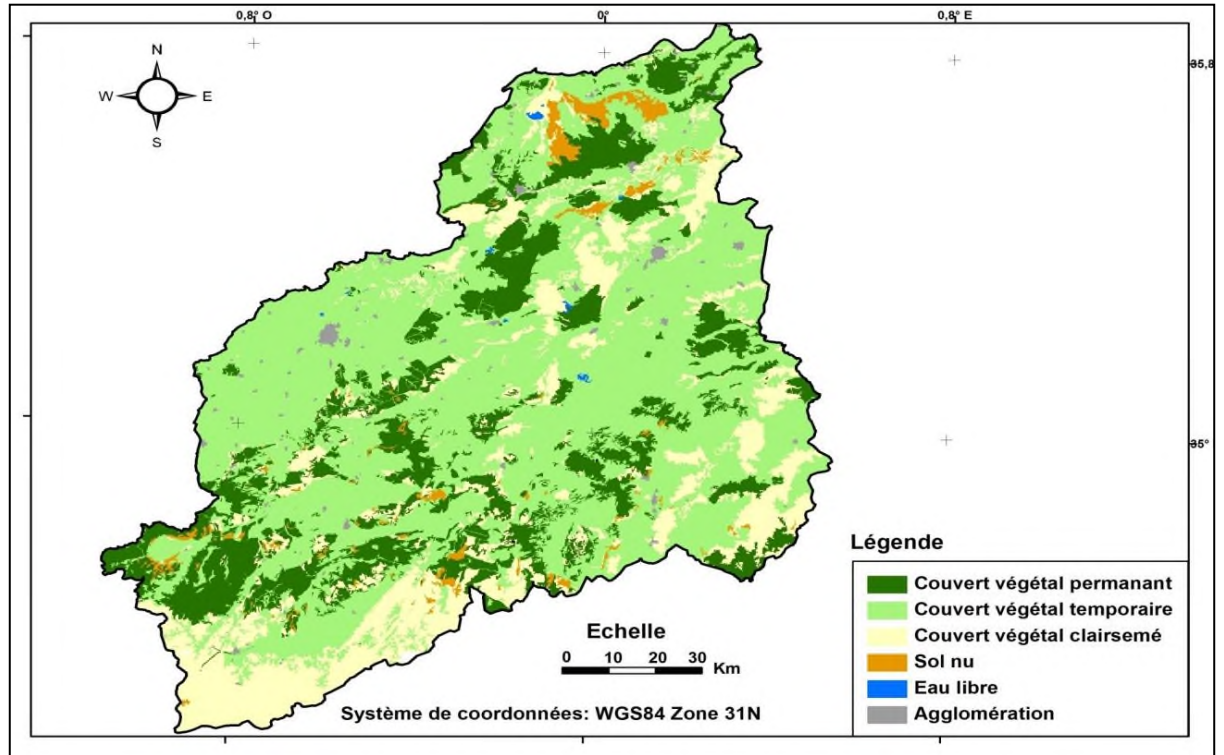


Figure II.7: Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Macta

La carte d'occupation du sol et le tableau II.7 montre la dominance du couvert végétal temporaire (environ 58 % de la surface totale) et est représenté par l'agriculture reconnue dans la région et est concentrée principalement dans les plaines intérieures de Sidi Belabbes, Ghriss et les grands périmètres irrigués de Habra ,Sig (El Mahi et al., 2012). Alors que le couvert végétal permanent (forêts, maquis, arboriculture) occupe une part non négligeable ; environ 20,5% de la surface totale, est caractérisé par des forêts de pins d'Alep comme celle de Louza, Belarbi, Tenira et Tiffrit, de maquis et de l'arboriculture (olivier, vignobles,...) (Cherif et al., 2009). La couverture végétale clairsemée présentée en steppes, parcours est dominée au Sud-Ouest et Sud-Est (Bouasria et al., 2010).

II.8 Ressources en eau

Les ressources en eau naturelles dans le bassin versant de la Macta sont de deux (02) nature ; superficielles et souterraines. Les ressources en eau mobilisables totales sont estimées à **512 Hm³** dont le volume total mobilisé est de **304 Hm³** (Tableau II.12). Les données des ressources en eau ont été fournies des services de l'ABH oranais Chott Chergui en 2015.

Tableau II.12:Ressources en eau dans le bassin versant de la Macta

Ressource en eau	Mobilisable (Hm ³)	Mobilisée (Hm ³)
Superficielle	295	227,41
Souterraine	217	76,74
Total	512	304,15

II.8.1 Ressources en eau souterraines

Les nappes aquifères sont très présentes dans le bassin de la Macta (Figure II.8) et se concentrent essentiellement dans la partie centrale comme la nappe alluviale de Sidi Belabbes (Bentekhici *et al.*, 2018), la nappe karstique de Saida (Medjber et Berkane, 2016) et la nappe alluviale de Ghriss (Bekkoussa *et al.*, 2013). Au nord du bassin versant se trouve la plaine de Habra (Baiche *et al.*, 2015).

II.8.2 Ressources en eau superficielles

Les ressources en eau superficielles dans le bassin versant de la Macta sont estimées à **227,41 Hm³** (Tableau II.13) mobilisée par cinq (05) grands barrages (figure II.8) dont leurs caractéristiques sont indiquées au tableau II.13. Ces données ont été fournies par l'ANBT en 2016.

Tableau II.13:Caractéristiques des barrages existants dans le bassin versant de la Macta

N°	Nom du barrage	Cours d'eau	Coordonnées			Date de mise en eau	Capacité initiale (Hm ³)	Apport moyen annuel (Hm ³)	Taux d'envasement (%)	Destination
			Lat. (°)	Long.(°)	Z (m)					
1	Bouhenifia	El Hammam	35°29N	00°08W	295	1948	73	138,8	47,8	Irrigation Hacine et AEP Sfisef et Bouhnifia
2	Fergoug	El Hammam	35°52N	00°05E	59,5	1970	18	56,0	97,8	AEP Oran, Mohamadia et irrigation El Habra
3	Ouzert	Sahaout	35°13N	00°02W	395	1985	100	84,0	6,1	Transfert Bouhnifia
4	Cheurfa II	Mebtouh	35°40N	00°26W	200	1992	82	57,0	14,4	Irrigation Sig
5	Sarno	Sarno	35°29N	00°58W	394	1954	22	12,0	3,4	AEP Sidi Belaabes

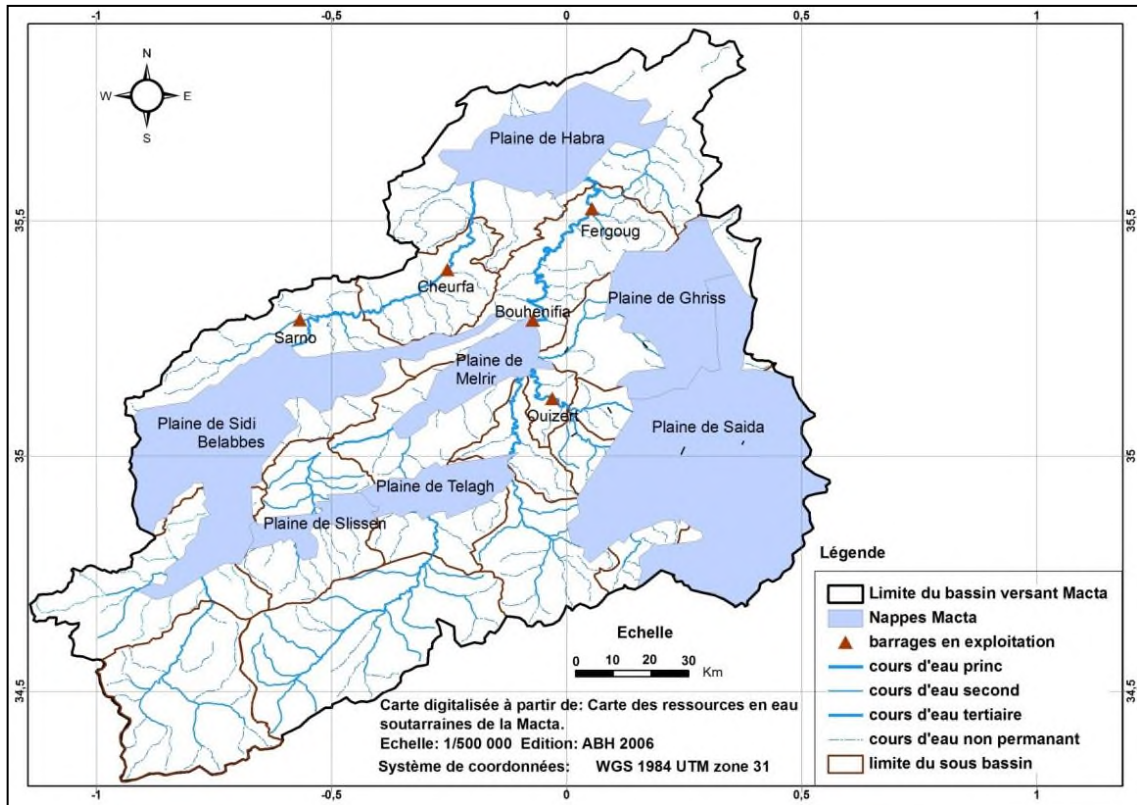


Figure II.8:Ressources en eau superficielles et souterraines dans le bassin versant de la Macta

II.9L’agriculture comme activité principale

L’agriculture est l’activité économique principale dans la Macta, est représentée par les cultures maraichères, l’arboriculture et les grandes cultures (Figure II.9). Il est à noter l’implantation de plusieurs périmètres d’irrigation mentionnés au tableau II.14 dont Les données ont été fournies des services de l’ABH oranais Chott Chergui en 2015.

Tableau II.14:Périmètres irrigués existants dans le bassin versant de la Macta

Désignation	Nom du périmètre	Superficie irrigables (Ha)	Superficie irriguée (Ha)	Type de ressource en eau utilisée	
				A partir des ressources superficielles	A partir des ressources souterraines
Grand périmètre	Habra	6 500	5 786	A partir des ressources superficielles	A partir des ressources souterraines
	Sig	4 500	4 146		
Petite et moyenne hydraulique (PMH)	-	129 856	45 142		
Total		140 856	55 074	3%	97%

II.10 Données d'analyse

Les données utilisées dans ce travail sont de deux (02) natures : données hydrométriques des différents oueds étudiés et des données climatiques des sous bassins versants de la Macta.

II.10.1 Données hydrométriques

Le bassin versant de la Macta comporte vingt-deux (22) stations hydrométriques implantées à différents endroits et selon le découpage réalisé treize (13) stations ont été retenues (Tableau II.15 et figure II.9). Le choix de ces stations hydrométriques est basé sur :

- ☞ L'emplacement ; choisir une station non influencée par un barrage en amont.
- ☞ La période de fonctionnement ; la plus longue possible avec moins de lacunes.

Les données hydrométriques sont de nature débit moyen mensuel en m³/s.

L'ensemble des données hydrométriques et pluviométriques ont été fournies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Oran et d'Alger.

Tableau II.15: Caractéristiques des stations hydrométriques retenues dans le bassin versant de la Macta

Symbole	N° du sous bassin versant	Nom de la station	Code de la station	Oued	Coordonnées	
					Lat. (°)	Long. (°)
S1	1	El Hacaiba	11 01 01	Mekerra	34°69N	0°76W
S2	2	Sidi Ali Ben Youb	11 02 01	Mekerra	34°97N	0°74W
S3	3	Sidi Bel Abbès	11 03 01	Mekerra	35°22N	0°61W
S4	5	Tenira	11 05 06	Melrir	35°01N	0°53W
S5	10	Laabana	11 10 03	Hounet	35°20N	0°09W
S6	11	Kilomètre 50	11 11 06	Saida	34°99N	0°16E
S7		Saida PN03	11 11 27	Saida	34°78N	0°13E
S8		Sidi Boubekeur	11 11 29	Saida	35°05N	0°03E
S9	12	Oued Taria	11 12 01	Taria	35°10N	0°09E
S10		Sidi Mimoun	11 12 08	Mimoun	35°04N	0°38E
S11		Dne, Bouchikhi	11 12 20	Hasna	35°02N	0°25E
S12	14	Ain Fekan	11 14 03	Fekane	35°22N	0°00
S13		Ghriss	11 14 12	Froha	35°24N	0°17E

Avec :

Lat : Latitude de la station , **Long :** Longitude de la station.

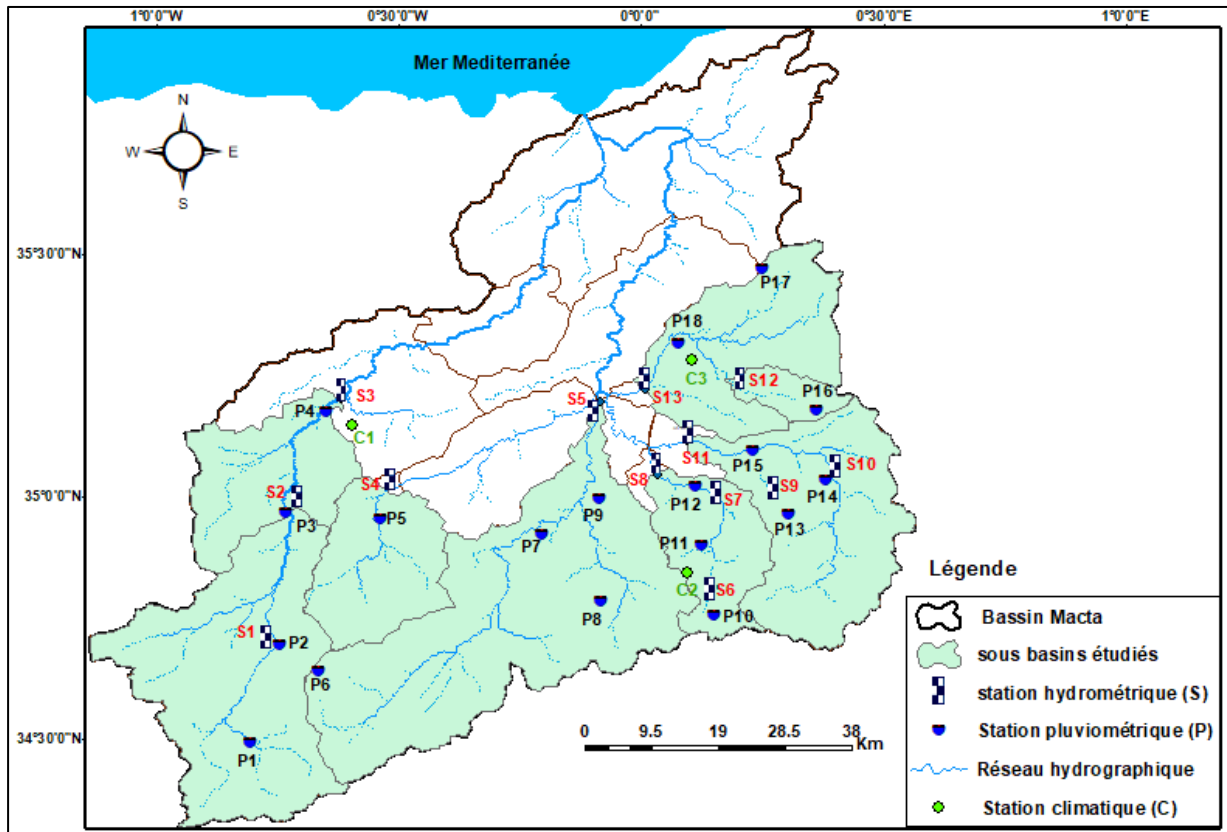


Figure II.9: Localisation des stations hydrométriques, pluviométriques et climatiques dans le bassin versant de la Macta

II.10.2 Données pluviométriques

Dix-huit (18) stations pluviométriques opérationnelles et couvrant l'ensemble de la zone d'étude dans le bassin versant de la Macta ont été utilisées (Figure II.9 et Tableau II.16). Ces stations ont été choisies selon les critères suivants :

- La dispersion pour couvrir et représenter la zone d'étude du bassin.
- La qualité des données ; c'est-à-dire que la série d'observation doit contenir moins de lacunes.
- La durée d'observation de chaque station pluviométrique (la taille de l'échantillon), qu'elle soit la plus longue possible.

Les données pluviométriques collectées sont de nature pluies mensuelles (mm).

Tableau II.16:Caractéristiques des stations pluviométriques retenues dans le bassin versant de la Macta

Symbole	Code	Nom	Lat. (°)	Long. (°)	Z (m)
P1	11 01 02	Raselma	34°49N	0°81W	1097
P2	11 02 01	Sidi Ali Ben Youb	34°97'N	0°73'W	635
P3	11 02 03	Hacaiba	34°70N	0°75W	950
P4	11 03 05	Sidi Belabbes	35°17N	0°65W	485
P5	11 05 09	Sidi Ahmed	34°95N	0°54W	653
P6	11 07 01	Dahya	34°64N	0°67W	1200
P7	11 08 02	Daoud	34°92N	0°21W	660
P8	11 09 04	Sidi Boulefred	34°79N	0°08W	885
P9	11 10 02	Med Touhami	34°99N	0°09W	600
P10	11 11 03	Ain El Hadjar	34°76N	0°15E	1000
P11	11 11 13	Djebel Keroua	34°90N	0°12E	950
P12	11 11 16	Sidi Amar Shgeo	35°02N	0°11E	590
P13	11 12 05	Ain Soltane	34°97N	0°30E	980
P14	11 12 08	Sidi Mimoun	35°03N	0°38E	690
P15	11 12 17	Beniane	35°10N	0°23E	565
P16	11 14 04	Aoufs	35°18N	0°36E	970
P17	11 14 13	Tizi	35°32N	0°07E	467
P18	11 14 17	Ain Fares	35°47N	0°25E	806

Avec :

Lat. : Latitude de la station , **Long. :** Longitude de la station.

II.10.3 L'évapotranspiration de référence ET_0

Elle signifie l'évapotranspiration potentielle. Elle a été calculée par la formule de Penman-Monteith-FAO (1998) (Allen *et al.*, 1998), et est indiqué par l'expression suivante.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

ET_0 : Évapotranspiration de référence [mm.j⁻¹].

Δ : la pente de la courbe de tension de vapeur saturante [kpa.°C⁻¹].

R_n : Rayonnement net [MJ.m⁻².j⁻¹]. G : Flux de chaleur du sol [MJ.m⁻².j⁻¹]

γ : La constante psychrométrique [kPa °C⁻¹] T : Température de l'air [°C]

u_2 : vitesse moyenne du vent [m.s⁻¹] e_s : Pression saturante de vapeur d'eau [kPa]

e_a : Pression actuelle de vapeur d'eau [kPa].

Le choix de cette formule est à l'origine qu'elle est la plus précise et la plus fiable surtout à l'échelle mensuelle. De plus qu'elle s'adapte bien au climat semi-aride (Boutheldjaouiet *al.*, 2012). Les trois (03) stations climatiques situées à l'intérieur du bassin versant de la Macta ne suffisent pas pour couvrir l'ensemble du bassin vu la variété d'altitude. Faute de quoi, on s'est rapporté aux données satellitaires (résolution de 0.5 x 0.5 degré) dont les paramètres explicatives de l'expression de l'*ETo* ont été téléchargés du site internet de NASA (National Aeronautics and Space Administration) (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), qui est une agence gouvernementale américaine, chargée d'exécuter le programme de civilisations spatiale et elle est considérée comme un leader dans le domaine de l'aérospatiale. Les points satellitaires sont présentés au tableau II.17.

Tableau II.17: Caractéristiques des points satellitaires

Indice poste	Coordonnées		
	Lat. (°)	Long. (°)	Z(m)
T1	34°68'	0°79'W	881
T2	34°90'	0°77'W	881
T3	35°09'	0°71'W	458
T4	35°23'	0°09'W	526
T5	34°88'	0°15'E	928
T6	35°03'	0°07'E	591
T7	35°21'	0°03'W	527
T8	35°20'	0°31'E	592
T9	34°67'	0°49'W	905
T10	34°83'	0°54'W	881

Avec :

Lat : Latitude de la station , **Long** : Longitude de la station. **Z** : altitude de la station

II.10.4 Comblement des lacunes et détection des erreurs

Les séries chronologiques utilisées contiennent souvent des lacunes. L'absence de données est due aux discontinuités historiques dans les équipes techniques chargées de la

gestion des données ainsi qu'aux difficultés spécifiques de mesure dans les régions à accès difficile ou à écoulements faibles et intermittents pour les données hydrométriques.

Dans notre cas, les données hydrométriques et pluviométriques collectées contiennent plusieurs lacunes et anomalies ce qui rend leurs traitements nécessaires avant de les utiliser dans les différentes analyses. Les lacunes ont été comblées en utilisant le logiciel «**STATISTICA6.1** » dont le principe est la régression linéaire simple entre deux (02) stations voisines de caractéristiques semblables, avec une probabilité de risque égale à 5%. Une fois le comblement des lacunes est établi, on procède à détecter d'éventuelle erreur (accidentelle ou systématique) qui affecte l'homogénéité des séries climatiques. La détection d'erreur se fait par la méthode graphique des doubles masses (Figure II.10) ; son principe est de comparer le cumul des précipitations entre la station à étudier et une station dite de référence. Selon l'emplacement de la cassure, les données seront corrigées en multipliant la pente ($\frac{m_1}{m_2}$) de la cassure par la valeur erronée respectivement selon que l'on soit, après la cassure ou avant la cassure (figure II.10).

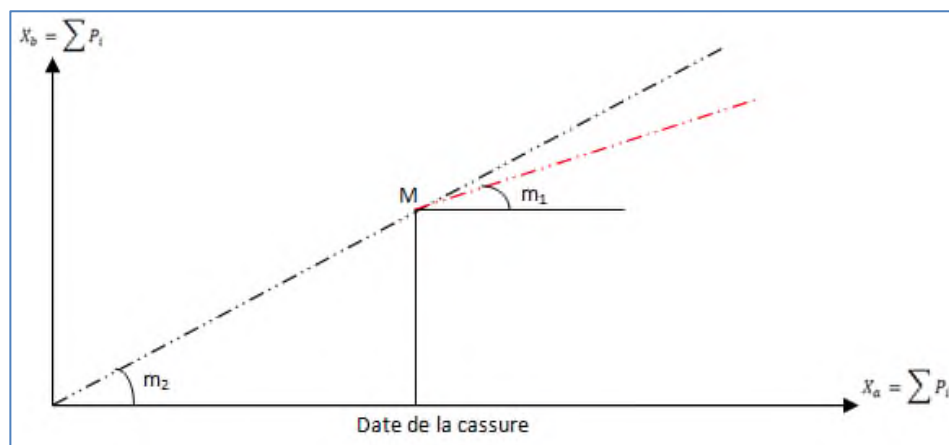


Figure II.10: Principe de la méthode des doubles masses (Source : Touaibia, 2004)

Les graphiques de l'application de la méthode des doubles masses sur les chronologiques pluviométriques sont présentés en figure II.11 suivante. Nous remarquons que l'ensemble des séries pluviométriques analysées présentent un coefficient de détermination supérieur à 99,9% ce qui montre que les stations pluviométriques étudiées sont homogènes.

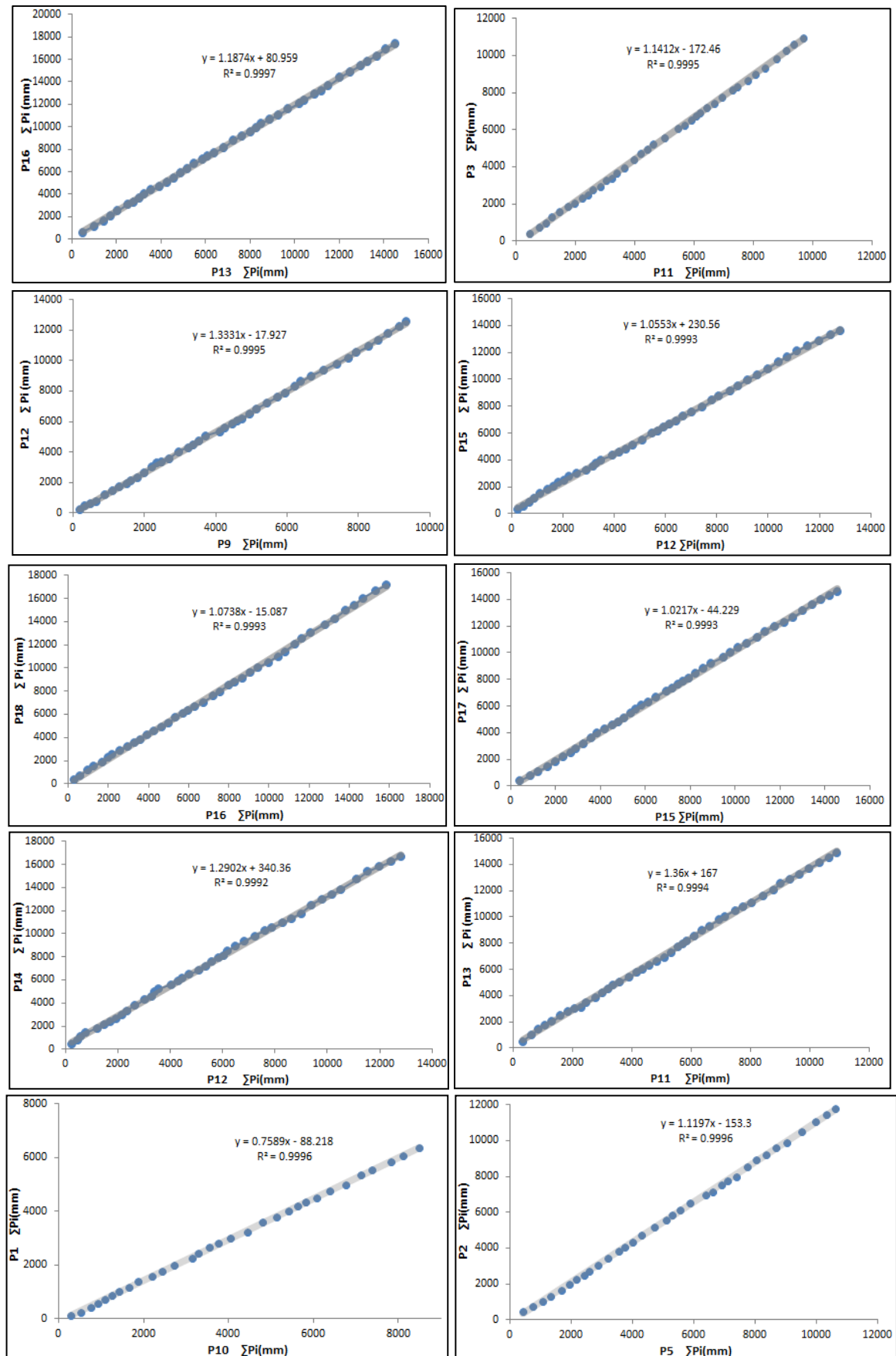


Figure II.11: Doubles masses des séries pluviométriques étudiées

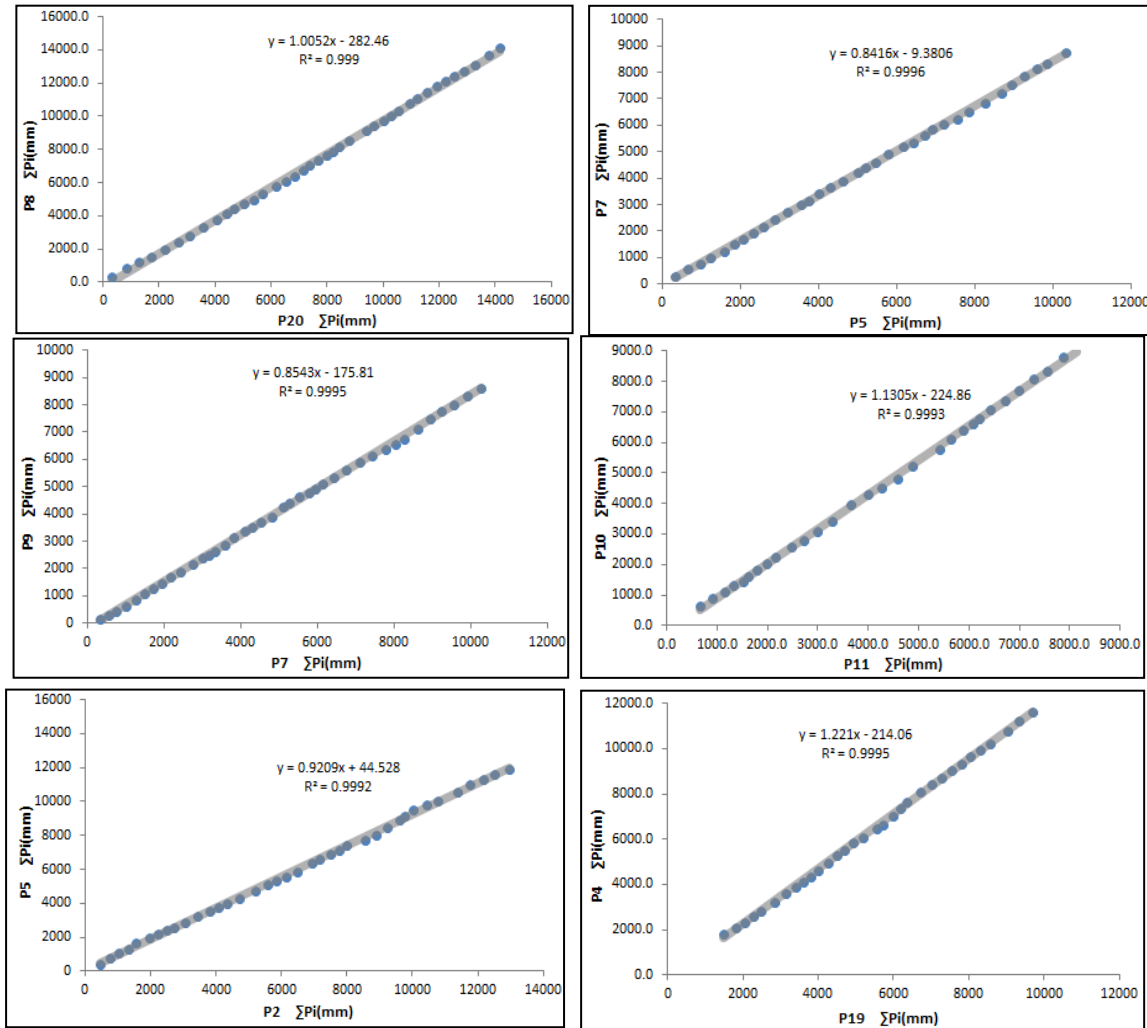


Figure II.11: Doubles masses des séries pluviométriques étudiées (suite)

Conclusion

Le grand bassin versant de la Mactasitué au Nord-Ouest de l'Algérie Septentrionale est l'un des plus importants bassins de l'ouest algérien ($14\ 389\ \text{Km}^2$). Le relief du bassin versant est très varié allant des basses plaines du littoral aux hautes altitudes où le caractère montagnard est très répandu. Selon notre objectif un nouveau découpage est établi en fonction de l'emplacement des stations hydrométriques pour obtenir treize (13) nouvelles surfaces dont leurs caractéristiques morphométriques et physiographiques ont été identifiées. L'étude climatique dévoile un climat semi-aride caractérisant le bassin de la Macta avec des écoulements temporaires. L'agriculture est une activité principale dans le bassin versant qui tient compte essentiellement de l'irrigation à partir des ressources en eau souterraines. L'ensemble des caractéristiques du bassin versant de la Macta étudiées dans ce chapitre ainsi que les données hydro-climatiques présentées et analysées offrent un cadre pour la préparation aux différentes analyses hydrologiques ainsi pour comprendre les processus régissant la transformation de la pluie en débit au bassin versant de la Macta.

CHAPITRE III :

ETUDE DU RÉGIME HYDRO- CLIMATIQUE

Chapitre III

Etude du régime hydro-climatique

Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'évolution du régime des variables hydrologiques à savoir : les précipitations, la température et le débit liquide. L'accent est mis sur leurs distributions spatio-temporelles ainsi l'analyser de leurs tendances pour déceler d'éventuelles ruptures.

III.1 Etude du régime pluviométrique

Les données de dix-huit (18) stations pluviométriques retenues au chapitre précédent ont été utilisées dans l'étude du régime pluviométrique durant la période (1975/76-2015/16).

III.1.1 Distribution temporelle des précipitations

Le tableau III.1 indique les moyennes pluviométriques interannuelles des stations pluviométriques utilisées dans le bassin versant de la Macta. Il a été constaté que :

- Les moyennes pluviométriques interannuelles enregistrées dans le bassin versant varient de 222 mm à 460 mm ; ce qui reflète le climat semi-aride de la région.
- Les plus faibles moyenne pluviométriques sont enregistrées aux stations situées au sud du bassin versant (110102, 110701, 110802, 111002).
- Le maximum de précipitation est enregistré à la station pluviométrique 110404 (469 mm environ) située à l'extrême Est du bassin versant qui est dû aux masses d'air humides venues du nord ce qui favorise le déclenchement des précipitations.
- Huit (08) stations pluviométriques situées au sud connaissent une irrégularité remarquable des précipitations (C_v élevé, grand écart entre P_{\max} et P_{\min}). La plus faible valeur est observée au sud du bassin versant à la station 110102. Le coefficient de variation et celui d'irrégularité des pluies annuelles croissent généralement du nord au sud du bassin versant.

Tableau III.1: Caractéristiques des séries pluviométriques annuelles dans le bassin versant de la Macta (1975/76-2015/16)

Code station	indice	Z(m)	\bar{x}	σ	Cv	P _{Max} (mm)	année	P _{Min} (mm)	année	P _{Max} /P _{Min}
11 01 02	P1	1097	280	238,3	0,85	746	2012	116,5	1978	9,3
11 02 01	P2	635	368	147,6	0,40	852	2012	156,2	1978	5,5
11 02 03	P3	950	336	150,4	0,45	742,7	2013	110,8	1987	6,7
11 03 05	P4	485	326,6	89,7	0,27	591	2008	177,4	1996	3,3
11 05 09	P5	653	326,8	91,2	0,28	582,6	2012	173,7	1983	3,4
11 07 01	P6	1200	298,3	155,1	0,52	748,7	2002	100	1987	7,5
11 08 02	P7	660	260,3	96,5	0,37	549,2	2014	107,5	1977	5,1
11 09 04	P8	885	302	130,6	0,43	643,5	2008	100	1989	6,4
11 10 02	P9	600	222,2	71,5	0,32	378,3	1995	114,2	1983	3,3
11 11 03	P10	1000	340,6	132,4	0,39	652,5	1991	164,8	1982	4,0
11 11 13	P11	950	267	72,7	0,27	468,5	1995	129,7	1999	3,6
11 11 16	P12	590	315,8	124,6	0,39	693,7	2012	107,1	1988	6,5
11 12 05	P13	980	366,6	100,3	0,27	616,2	1995	113,2	1983	5,4
11 12 08	P14	690	405,5	143,1	0,35	916	2012	193,7	1998	4,7
11 12 17	P15	565	319,4	153,7	0,48	760,9	2002	112,4	1983	6,8
11 14 04	P16	970	469,4	155,8	0,33	898,3	1975	204,9	1981	4,4
11 14 13	P17	467	342,2	80,9	0,24	525,6	2012	180,2	1981	2,9
11 14 17	P18	806	409,3	132,3	0,32	698,7	2010	171	1981	4,1

Avec :

Z : Altitude de la station pluviométrique (m).

\bar{x} : Moyenne de la série pluviométrique considérée.

σ : L'écart type.

Cv : Coefficient de variation.

P_{Max} : Précipitation annuelle maximale (mm).

P_{Min} : Précipitation annuelle minimale (mm).

P_{Max}/P_{Min} : Coefficient d'irrégularité du régime pluviométrique.

Les résultats permettent de conclure que la hauteur pluviométrique annuelle dans le bassin versant de la Macta subit à l'influence de la mer et du relief, elle augmente du sud au nord. Ces résultats seront vérifiés par l'analyse en composante principale (ACP).

III.1.2 Analyse en composantes principales des précipitations annuelles

En vue d'étudier la distribution spatiale des précipitations dans le bassin versant de la Macta, une analyse en composante principale (ACP) a été appliquée au cumul annuel de dix-huit (18) stations pluviométriques, durant la période (1975/76-2015/16).

III.1.2.1 Résultats de l'ACP

a. Les valeurs propres, variance expliquée (%), variance cumulé (tableau III.2).

Tableau III.2: Valeurs propres et variances expliquées

N°	Valeurs propres	Variance (%)	Variance cumulée (%)
CP1	10,93	<u>57,54</u>	57,54
CP2	1,72	9,05	<u>66,59</u>
CP3	1,44	7,55	74,14
CP4	0,91	4,77	78,91

Les résultats montrent que la première composante principale explique plus de la moitié de la variance totale (**57,54%**). Les deux premières composantes résument 2/3 de l'information (**66,59%**). A partir de la troisième composante, l'information expliquée devient faible (moins de 8%). Alors ces deux (02) composantes seront retenues.

b. Matrice de corrélation : Elle montre le degré de liaison entre les différentes variables (stations pluviométriques) (tableau III.3).

La matrice de corrélation montre que l'ensemble des stations pluviométriques sont corrélées positivement entre elles. La corrélation est forte entre les stations ayant les mêmes caractéristiques (altitude, hauteur pluviométrique).

Tableau III.3: Matrice de corrélation entre les stations pluviométriques

	110102	110201	110203	110305	110509	110701	110802	110904	111002	111103	111113	111116	111205	111208	111217	111404	111413	111417	
110102	1,00																		
110201	<u>0,83</u>	1,00																	
110203	0,43	<u>0,65</u>	1,00																
110305	0,07	0,31	<u>0,75</u>	1,00															
110509	<u>0,75</u>	<u>0,81</u>	<u>0,67</u>	<u>0,63</u>	1,00														
110701	0,44	0,56	0,28	0,15	0,51	1,00													
110802	<u>0,65</u>	<u>0,69</u>	<u>0,63</u>	<u>0,63</u>	<u>0,69</u>	0,45	1,00												
110904	0,58	<u>0,74</u>	0,56	0,50	<u>0,65</u>	0,45	0,49	1,00											
111002	<u>0,63</u>	<u>0,74</u>	0,58	0,58	<u>0,63</u>	0,25	<u>0,74</u>	0,48	1,00										
111103	<u>0,75</u>	<u>0,71</u>	0,34	0,34	<u>0,72</u>	0,50	<u>0,64</u>	0,42	0,57	1,00									
111113	0,59	<u>0,67</u>	0,51	0,38	<u>0,64</u>	0,43	0,57	0,53	0,56	0,54	1,00								
111116	<u>0,65</u>	<u>0,70</u>	<u>0,60</u>	<u>0,62</u>	<u>0,66</u>	0,37	<u>0,79</u>	<u>0,64</u>	<u>0,68</u>	0,52	0,58	1,00							
111205	<u>0,70</u>	<u>0,73</u>	0,50	0,41	<u>0,73</u>	0,44	<u>0,63</u>	<u>0,68</u>	0,57	<u>0,70</u>	<u>0,80</u>	<u>0,61</u>	1,00						
111208	0,52	0,66	0,56	0,48	<u>0,62</u>	0,44	0,59	<u>0,73</u>	0,51	0,34	<u>0,71</u>	<u>0,74</u>	<u>0,69</u>	1,00					
111217	<u>0,66</u>	<u>0,71</u>	0,48	0,56	<u>0,64</u>	0,32	<u>0,71</u>	<u>0,63</u>	<u>0,74</u>	0,52	0,55	<u>0,76</u>	<u>0,58</u>	0,56	1,00				
111404	0,30	0,49	0,59	0,51	0,48	0,46	0,41	<u>0,62</u>	0,23	0,31	0,43	0,53	0,39	<u>0,59</u>	0,36	1,00			
111413	0,43	0,57	<u>0,75</u>	<u>0,70</u>	<u>0,60</u>	0,31	0,52	0,41	0,49	0,34	0,49	0,54	0,38	0,57	0,53	0,54	1,00		
111417	0,58	0,55	0,50	0,57	0,55	0,35	0,50	0,40	<u>0,60</u>	0,46	0,35	0,58	0,45	0,38	<u>0,62</u>	0,39	0,47	1,00	

c. Projection des variables sur les axes factoriels

La projection des variables sur les axes factoriels choisis représentés par les composantes principales CP1 et CP2, est donnée au tableau III.4.

Tableau III.4: Projection des variables sur les principaux axes

Indice station	Code station pluviométrique	CP1	CP2
P1	110102	-0,79	-0,41
P2	110201	-0,80	0,51
P3	110203	-0,91	-0,16
P4	110305	-0,76	0,46
P5	110509	-0,88	-0,07
P6	110701	-0,53	-0,17
P7	110802	-0,82	-0,11
P8	110904	-0,77	0,03
P9	111002	-0,77	-0,15
P10	111103	-0,71	-0,44
P11	111113	-0,75	-0,20
P12	111116	-0,84	-0,04
P13	111205	-0,80	-0,32
P14	111208	-0,78	0,07
P15	111217	-0,80	-0,18
P16	111404	-0,63	0,41
P17	111413	-0,71	0,45
P18	111417	-0,65	0,02

- Projection des variables sur la première composante CP1

Les coefficients de corrélation sur cet axe sont très significatifs, variant de **0,60** à **0,91**. Ce premier axe factoriel représente la distribution temporelle des précipitations.

- Projection des variables sur la deuxième composante CP2

La projection sur cet axe a mis en évidence une séparation Nord-Sud des stations. Celles situées au Nord se corrént positivement avec cette composante. Tandis que les stations se trouvent au Sud, Sud-Est et Sud -Ouest se corrént négativement avec cette composante (figure III.1).

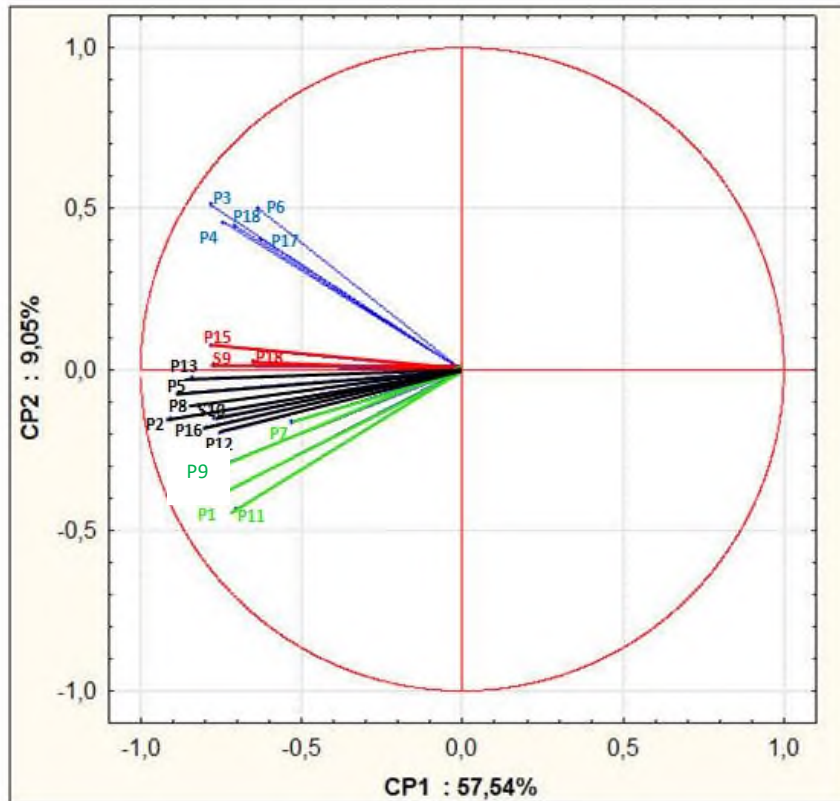


Figure III.1: Projection des variables pluviométriques sur les plans (CP1xCP2)

Le cercle de corrélation (figure III.1) met en évidence quatre (04) groupes distincts:

- ☞ *1^{er} groupe* : représenté par les stations situées au sud du bassin versant, sur les monts de Dhaya et le sud des monts de Saida (P1, P7, P11 et P9).
- ☞ *2^{ème} groupe* : représenté par les stations situées au plateau du bassin versant (P2, P5, P8, P10, P12, P13 et P15).
- ☞ *3^{ème} groupe* : représenté par les stations situées à l'Est et sud Est du bassin versant (P9, P14).
- ☞ *4^{ème} groupe* : représenté par les stations situées dans les plaines de Sidi Belabbes et Ghriiss-Mascara (P3, P4, P6, P17 et P18).

Cette distinction de groupes est illustrée dans la figure III.2.

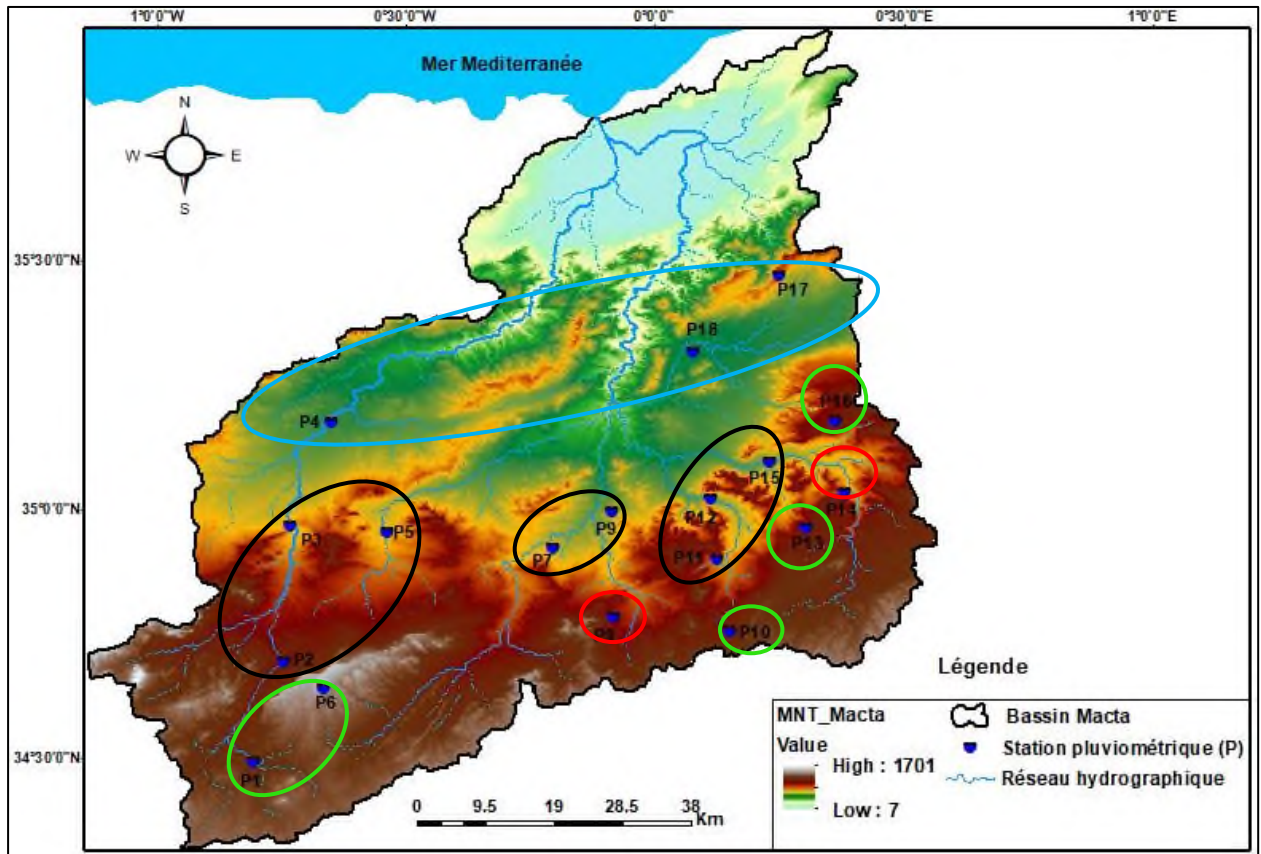


Figure III.2: Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)

Au regard de ces résultats, le bassin versant de la Macta est caractérisée par une variation topographique où le caractère montagnard est très répandu ; ce qui le rend hétérogène du point de vue pluviométrie. Néanmoins, l'exposition des stations pluviométriques dans le bassin versant montre des particularités.

III.1.3 Distribution mensuelle des précipitations et régime saisonnier

La répartition mensuelle des précipitations et leurs variations au cours de l'année hydrologique conditionnent l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau. Une analyse en composantes principales a été effectuée sur une matrice de dix-huit (18) variables (stations pluviométriques) et quarante et un (41) observations (année), donc est une matrice de 738 valeurs.

Les moyennes pluviométriques mensuelles et saisonnières ainsi que leurs caractéristiques statistiques sont données au tableau III.5.

Tableau III.5: Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières enregistrées au niveau des stations pluviométriques (1975-2016)

Code	Caractéristiques	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Automne	Hiver	Printemps	Eté
110102	\bar{x}	20,0	20,5	21,5	24,6	28,8	19,4	20,7	20,8	21,1	8,7	4,1	6,8	62,0	72,8	62,6	19,6
	σ	24,8	21,1	14,0	21,2	24,2	14,7	16,6	19,1	22,6	15,9	5,9	9,5	39,1	39,3	34,4	20,8
	Cv	1,24	1,03	0,65	0,86	0,84	0,76	0,80	0,92	1,07	1,83	1,44	1,40	0,63	0,54	0,55	1,06
110201	\bar{x}	25,0	31,5	37,8	27,5	29,2	34,0	34,0	34,5	30,5	9,7	3,2	10,1	94,3	90,7	99,0	23,0
	σ	30,3	29,0	24,6	22,0	23,1	28,6	41,1	24,2	26,2	13,7	8,0	14,4	53,8	42,6	55,4	23,9
	Cv	1,21	0,92	0,65	0,80	0,79	0,84	1,21	0,70	0,86	1,41	2,51	1,43	0,57	0,47	0,56	1,04
110203	\bar{x}	22,6	32,5	47,0	38,5	40,8	43,2	35,5	35,3	21,9	7,4	3,5	12,0	102,1	122,5	92,7	22,9
	σ	23,5	33,5	34,8	24,6	27,7	32,8	29,5	23,3	20,4	10,5	8,5	3,6	60,2	50,2	38,0	32,1
	Cv	1,04	1,03	0,74	0,64	0,68	0,76	0,83	0,66	0,93	1,42	2,43	0,30	0,59	0,41	0,41	1,43
110305	\bar{x}	16,5	24,4	33,1	34,3	39,8	37,6	37,8	30,2	24,9	6,9	3,6	9,7	74,0	111,7	92,9	20,2
	σ	16,7	19,8	18,5	24,0	27,1	30,8	31,8	19,9	20,9	7,9	6,1	17,0	34,8	49,1	45,5	21,0
	Cv	1,01	0,81	0,56	0,70	0,68	0,82	0,84	0,66	0,84	1,15	1,69	1,75	0,47	0,44	0,49	1,04
110509	\bar{x}	18,7	26,9	33,1	31,2	35,3	30,2	28,0	26,4	20,5	6,4	3,9	3,5	78,7	96,7	74,9	13,8
	σ	17,8	23,7	26,1	23,4	24,0	19,3	21,3	16,6	16,0	9,9	9,4	6,1	40,1	39,6	30,0	17,3
	Cv	0,95	0,88	0,79	0,75	0,68	0,64	0,76	0,63	0,78	1,54	2,42	1,73	0,51	0,41	0,40	1,25
110701	\bar{x}	28,5	25,8	42,8	32,1	35,0	30,0	29,3	38,0	34,2	5,2	4,5	9,0	97,1	97,1	101,5	18,7
	σ	57,9	31,7	32,5	34,0	44,5	32,1	35,5	26,6	73,2	13,1	19,4	20,1	72,8	68,0	82,2	37,0
	Cv	2,03	1,23	0,76	1,06	1,27	1,07	1,21	0,70	2,14	2,52	4,32	2,23	0,75	0,70	0,81	1,98

Tableau III.5 : Précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau des stations pluviométriques (1975-2016) (suite)

Code	Caractéristiques	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Automne	Hiver	Printemps	Été
110802	\bar{x}	15,2	23,8	24,3	24,0	27,3	23,8	25,0	25,5	19,7	5,9	3,6	5,0	63,3	75,1	70,4	14,5
	σ	8,7	18,6	17,7	19,7	23,5	20,2	25,3	20,8	20,1	8,1	7,2	8,7	27,2	39,8	36,6	15,2
	Cv	0,57	0,78	0,73	0,82	0,86	0,85	1,01	0,81	1,02	1,38	2,00	1,73	0,43	0,53	0,52	1,09
110904	\bar{x}	16,2	33,1	33,3	29,4	34,4	31,4	28,3	34,5	21,7	5,3	4,0	13,0	82,6	95,2	84,5	22,2
	σ	21,2	32,1	25,6	24,1	28,2	25,4	28,3	27,6	20,2	9,4	6,4	27,2	55,3	52,4	49,0	28,8
	Cv	1,31	0,97	0,77	0,82	0,82	0,81	1,00	0,80	0,93	1,78	1,60	2,09	0,67	0,55	0,58	1,29
111002	\bar{x}	10,7	27,0	26,3	22,0	25,3	26,2	17,8	19,5	17,5	3,4	1,1	4,3	64,0	73,5	54,8	8,8
	σ	13,6	32,7	21,3	16,3	20,0	17,8	13,2	18,1	17,5	6,3	2,4	7,9	40,3	32,3	31,2	12,4
	Cv	1,27	1,21	0,81	0,74	0,79	0,68	0,74	0,93	1,00	1,86	2,21	1,84	0,63	0,44	0,57	1,41
111103	\bar{x}	22,0	25,4	35,0	38,8	46,1	35,1	29,5	31,5	28,0	9,4	3,9	7,5	82,3	120,0	89,0	20,8
	σ	25,7	17,3	21,4	24,1	34,1	29,5	23,6	26,1	26,6	20,3	8,3	14,9	43,7	52,8	49,0	27,9
	Cv	1,17	0,68	0,61	0,62	0,74	0,84	0,80	0,83	0,95	2,16	2,14	1,98	0,53	0,44	0,55	1,34
111113	\bar{x}	13,0	29,3	27,1	22,3	30,4	33,6	27,7	26,1	22,4	5,7	4,0	6,4	69,4	86,3	76,2	16,1
	σ	12,9	31,9	18,2	15,4	23,7	26,9	27,4	18,8	21,7	7,7	8,7	10,1	41,6	38,8	40,4	14,8
	Cv	0,99	1,09	0,67	0,69	0,78	0,80	0,99	0,72	0,97	1,35	2,17	1,58	0,60	0,45	0,53	0,92
111116	\bar{x}	14,4	28,9	32,8	32,7	40,3	38,1	30,1	32,6	25,2	5,0	0,8	6,7	76,1	111,1	87,9	12,5
	σ	14,3	31,5	22,0	22,6	31,4	30,5	29,8	23,5	24,4	6,8	1,7	10,6	45,7	50,0	46,6	11,5
	Cv	0,74	0,99	0,56	0,70	0,67	0,75	0,81	0,80	0,93	1,64	2,40	1,88	0,47	0,39	0,51	1,31
111205	\bar{x}	19,2	35,1	43,1	33,6	49,0	38,5	28,4	38,3	31,1	7,7	3,4	10,5	95,4	121,1	87,9	12,5
	σ	24,0	28,4	27,2	19,8	34,8	31,2	28,1	26,8	33,3	11,8	5,1	19,7	49,7	55,7	55,7	24,0
	Cv	1,25	0,81	0,63	0,59	0,71	0,81	0,99	0,70	1,07	1,53	1,50	1,88	0,51	0,46	0,57	1,11

111208	\bar{x}	22,4	33,4	45,1	37,8	42,5	46,4	37,6	31,8	34,3	8,8	8,9	6,0	100,9	126,8	103,8	23,8
	σ	18,2	33,2	29,3	20,1	30,2	38,2	30,9	23,2	26,4	9,1	28,9	10,8	51,3	59,8	44,0	35,0
	Cv	0,81	0,99	0,65	0,53	0,71	0,82	0,82	0,73	0,77	1,03	3,24	1,79	0,51	0,47	0,42	1,47
111217	\bar{x}	17,2	25,7	38,7	42,4	41,0	38,5	29,5	28,9	21,8	6,0	3,1	2,8	81,6	121,9	80,2	11,9
	σ	13,1	27,5	24,8	28,4	29,1	32,3	23,9	23,7	20,5	9,7	10,0	5,0	48,1	62,2	41,7	18,4
	Cv	0,76	1,07	0,64	0,67	0,71	0,84	0,81	0,82	0,94	1,61	3,23	1,79	0,59	0,51	0,52	1,55
111404	\bar{x}	22,0	39,6	55,0	58,6	61,1	49,5	50,8	42,2	33,4	11,9	5,9	10,3	116,6	169,2	126,4	28,1
	σ	20,2	28,9	33,0	42,8	39,1	33,2	51,3	26,2	23,7	17,3	12,3	14,3	54,8	74,4	58,1	31,8
	Cv	0,92	0,73	0,60	0,73	0,64	0,67	1,01	0,62	0,71	1,45	2,08	1,39	0,47	0,44	0,46	1,13
111413	\bar{x}	17,5	35,8	44,9	41,9	43,9	39,6	39,9	31,7	31,5	7,0	4,7	6,5	98,2	125,4	103,1	18,2
	σ	16,8	28,6	34,6	33,9	30,3	27,3	32,3	22,8	33,7	12,0	13,0	13,4	52,0	51,4	47,4	23,1
	Cv	0,96	0,80	0,77	0,81	0,69	0,69	0,81	0,72	1,07	1,71	2,77	2,06	0,53	0,41	0,46	1,27
111417	\bar{x}	19,8	33,8	50,0	51,1	48,9	42,1	44,1	43,1	29,9	5,2	2,0	5,4	103,6	142,1	117,0	12,6
	σ	14,5	32,4	36,0	36,8	34,2	24,8	39,7	34,9	27,8	7,3	4,6	9,8	58,0	62,5	53,9	13,6
	Cv	0,73	0,96	0,72	0,72	0,70	0,59	0,90	0,81	0,93	1,40	2,31	1,81	0,56	0,44	0,46	1,08

D'après les résultats du tableau III.5, il a été remarqué que :

☞ Le mois le plus pluvieux diffère d'une station à une autre mais inclut dans la période allant du mois de Novembre jusqu'au Avril.

☞ Le mois le plus sec est enregistré en période estivale, plus précisément au mois de Juillet ou Aout.

☞ Le coefficient de variation Cv augmente au mois de Juin, Juillet et Aout (saison d'été) et diminue au reste des mois de l'année.

☞ Le maximum de pluviométrie est enregistré en saison d'hiver à seize (17) stations et en saison de printemps à deux (02) stations.

Après avoir calculé le cumul de précipitations de chaque saison et pour chaque station (tableau III.5), un "Indicatif saisonnier" est établi par un classement de dominance pluviométrique saisonnier d'ordre décroissant année par année durant la période (1975/76-2015/16) dont la valeur la plus élevée (qui se répète) est considérée comme dominante dans la région. Le régime saisonnier des précipitations enregistrées est indiqué dans le tableau III.6.

Tableau III.6: Régime saisonnier des précipitations dans le bassin versant de la Macta

indice	Code station	Régime saisonnier	Pourcentage de dominance
P1	110102	HPAE	22,0
P2	110201	HPAE	25,0
P3	110203	APHE	19,0
P4	110305	HAPE	25,0
P5	110509	HAPE	22,0
P6	110701	PHAE	22,0
P7	110802	HPAE	30,0
P8	110904	HPAE	22,0
P9	111002	HPAE	36,0
P10	111103	HAPE	30,5
P11	111113	AHPE	19,0
P12	111116	HPAE	36,0
P13	111205	HAPE	36,0
P14	111208	HPAE	25,0
P15	111217	HPAE	44,0
P16	111404	HPAE	22,0
P17	111413	HPAE	22,0
P18	111417	PHAE	30,5

Avec : H : Hiver , A : Automne , P : Printemps , E : Eté.

L'analyse des résultats du tableau III.6 montre que :

- ☞ La moyenne mensuelle des précipitations traduit clairement les variations mensuelles et saisonnières de distribution des précipitations en fonction du coefficient de variation.
- ☞ La saison qui enregistre un maximum de pluviométrie est celle d'Hiver qui donne lieu à un régime saisonnier de type HPAE ou HAPE.
- ☞ La variation de distribution des précipitations est plus importante (remarquable) en saison d'été.
- ☞ Au cours de l'année hydrologique, deux périodes sont distinguées, une période sèche en saison d'été, caractérisée par un déficit pluviométrique et une variation des précipitations bien marquée. Et une période humide pour le reste des mois marquée par une succession de mois humides et de mois relativement secs.

III.2 Etude du régime hydrométrique

Les treize (13) stations hydrométriques retenues au chapitre précédent ont été étudiées pour caractériser le régime des différents oueds de la Macta durant la période (1975/76-2015/16) à l'exception de la station 110506 où elle n'est plus en service depuis 2009.

III.2.1 Distribution des débits moyens annuels et interannuels

La distribution des débits moyens annuels et interannuels ainsi que leurs caractéristiques statistiques sont indiquées au tableau III.7.

- ☞ L'oued Mekerra au droit de la station hydrométrique 110301 est le plus important avec un débit liquide moyen interannuel de l'ordre de $0,82 \text{ m}^3/\text{s}$. Tandis que les oueds de Bouchikhi au droit de la station hydrométrique 111220, oued Ghriss au droit de la station 111412 produisent les plus faibles débits ($0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$).
- ☞ L'ensemble des Oueds de la Macta étudiées sont irréguliers ($C_v > 0,5$) notamment les oueds au droit des stations de 111220, 111412 et 111403 qui sont très variables. L'oued de Saida au droit des stations 111127 et 111106 sont moins irréguliers. Cette variabilité dans l'ensemble est liée essentiellement à l'alimentation pluviale irrégulière des cours d'eau et l'écart entre l'apport maximum et minimum au cours de la période d'observation.

Tableau III.7: Caractéristiques hydrologiques des stations hydrométriques du bassin versant de la Macta

Indice	Code Station	Oued	Q _{moy} (m ³ /s)	Cv	Q _{max} (m ³ /s)		Q _{min} (m ³ /s)	
					Valeur	Année	Valeur	Année
S1	110101	Mekerra	0,18	0,75	0,5	2008	0	1981
S2	110201		0,47	0,49	1,04	1997	0,12	2005
S3	110301		0,82	0,41	1,82	2015	0,31	2005
S4	110506	Melrir	0,17	0,90	0,58	1978	0	1992,1998,2006
S5	111003	Hounet	0,48	0,63	1,52	1994	0,01	1998
S6	111127	Saida	0,2	0,34	0,35	2008	0,03	1983
S7	111106		0,33	0,30	0,56	1996	0,15	1992
S8	111129		0,75	0,41	1,86	2013	0,15	1998
S9	111208	Sidi Mimoun	0,38	0,69	1,12	2015	0	2005
S10	111220	Dne Bouchikhi	0,07	1,43	0,49	1991	0	1975,1979,1993,2005, 2006,2007,2010,2011,2016
S11	111201	Taria	0,66	0,70	1,93	1988	0,04	2005
S12	111412	Ghriss	0,09	1,07	0,36	2016	0	1989,1992,2005,2011
S13	111403	Ain Fekane	0,13	1,23	0,55	1976	0	1989,1992,1993,1998, 2003,2005,2011

Avec :

Q_{moy} : débit moyen interannuel (m³/s); Cv : Coefficient de variation;

Q_{max} : débit maximum annuel (m³/s) , Q_{min} : débit minimum annuel (m³/s)

III.2.2 Analyse en composantes principales des apports liquides

Afin d'étudier la distribution spatiale des débits liquides des oueds de la Macta, une analyse en composantes principales a été effectuée sur une matrice de treize (13) variables (stations hydrométriques) et quarante et un (41) observations (année d'observation), durant la période (1975/76-2015/16). Donc est une matrice de 533 valeurs.

III.2.2.1 Résultats de l'ACP

Les résultats obtenus de l'analyse en composantes principales sont :

- a. Les valeurs propres, variance expliquée (%), variance cumulée (tableau III.8).

Tableau III.8 : Valeurs propres et variances expliquées

N°	Valeurs propres	Variance (%)	Variance cumulée (%)
CP1	5,49	<u>36,63</u>	36,63
CP2	2,06	13,73	50,36
CP3	1,72	11,45	<u>61,82</u>
CP4	1,20	8,01	69,83
CP5	0,89	5,91	75,74

Les résultats obtenus du tableau III.8 montrent que la première composante explique **36,6%** de la variance total. Les deux premières composantes expliquent plus de la moitié de la variance totale (**50,36%**). C'est à partir de la quatrième composante que le pouvoir explicatif diminue (moins de 8%). A cet effet, les trois (03) premières composantes seront retenues.

- b. Matrice de corrélation entre les variables

Le degré de liaison entre les stations hydrométriques est mentionné au tableau III.9.

L'analyse de la matrice de corrélation montre que la plupart des stations hydrométriques sont corrélées positivement entre elles. La corrélation est forte entre les stations qui ont des caractéristiques semblables (localisation, valeur du débit liquide).

Tableau III.9: Matrice de corrélation entre les stations hydrométriques

	110101	110201	110301	110506	111003	111127	111106	111129	111220	111208	111201	111412	111403
110101	1,00												
110201	<u>0,51</u>	1,00											
110301	0,35	0,15	1,00										
110506	0,11	-0,03	0,24	1,00									
111003	<u>0,53</u>	0,39	0,08	0,06	1,00								
111127	0,21	0,23	0,03	0,05	0,32	1,00							
111106	0,44	0,34	0,19	0,23	<u>0,58</u>	<u>0,52</u>	1,00						
111129	0,56	0,33	0,27	<u>0,48</u>	<u>0,51</u>	0,23	<u>0,52</u>	1,00					
111220	0,26	0,31	0,04	0,15	<u>0,47</u>	<u>0,63</u>	<u>0,59</u>	0,29	1,00				
111208	0,32	0,24	0,14	0,42	0,43	0,25	<u>0,68</u>	<u>0,49</u>	<u>0,54</u>	1,00			
111201	0,08	0,06	-0,08	0,08	0,39	<u>0,50</u>	0,43	0,17	0,44	<u>0,59</u>	1,00		
111412	0,27	0,16	0,23	0,40	0,22	0,35	0,42	<u>0,55</u>	<u>0,50</u>	<u>0,52</u>	0,24	1,00	
111403	0,28	0,15	0,20	<u>0,53</u>	0,23	0,28	<u>0,51</u>	<u>0,58</u>	<u>0,55</u>	<u>0,55</u>	0,19	<u>0,72</u>	1,00

c. Projection des variables sur les axes factoriels

Elle est représentée par les composantes principales CP1, CP2, CP3 (Tableau III.10).

Tableau III.10 : Projection des variables sur les principaux axes

Indice station	Code station hydrométrique	CP1	CP2	CP3
S1	110101	-0,56	-0,35	0,50
S2	110201	-0,42	-0,40	0,20
S3	110301	-0,29	0,03	0,66
S4	110506	-0,49	0,55	0,26
S5	111003	-0,61	-0,53	0,04
S6	111127	-0,55	0,33	-0,35
S7	111106	-0,80	-0,24	-0,09
S8	111129	-0,73	-0,01	0,39
S9	111220	-0,71	-0,22	-0,37
S10	111208	-0,79	0,04	-0,14
S11	111201	-0,52	-0,18	-0,53
S12	111412	-0,74	0,35	0,01
S13	111403	-0,78	0,47	-0,05

- Projection des variables sur la première composante CP1

La projection des variables sur la première composante principale (Tableau III.10), montre des coefficients de corrélation significatifs variant de **0,5** et **0,80**. La plus faible valeur de **0,29** est avec la station S3 (110301) tandis que celle la plus forte (**0,80**) est indiquée avec la station 111106 (S7). Alors, ce premier axe factoriel explique la distribution temporelle des débits liquides.

- Projection des variables sur la deuxième composante CP2

La projection des variables sur la deuxième composante principale a mis en évidence une séparation Nord-Sud (corrélation positive et négative) c'est-à-dire que les stations hydrométriques situées loin de la mer (au sud) se corrélaient négativement avec cette composante ; tandis que celles situées au nord influencées par la mer se corrélaient positivement. Cette distinction de groupes peut être aussi illustrée dans la figure III.4

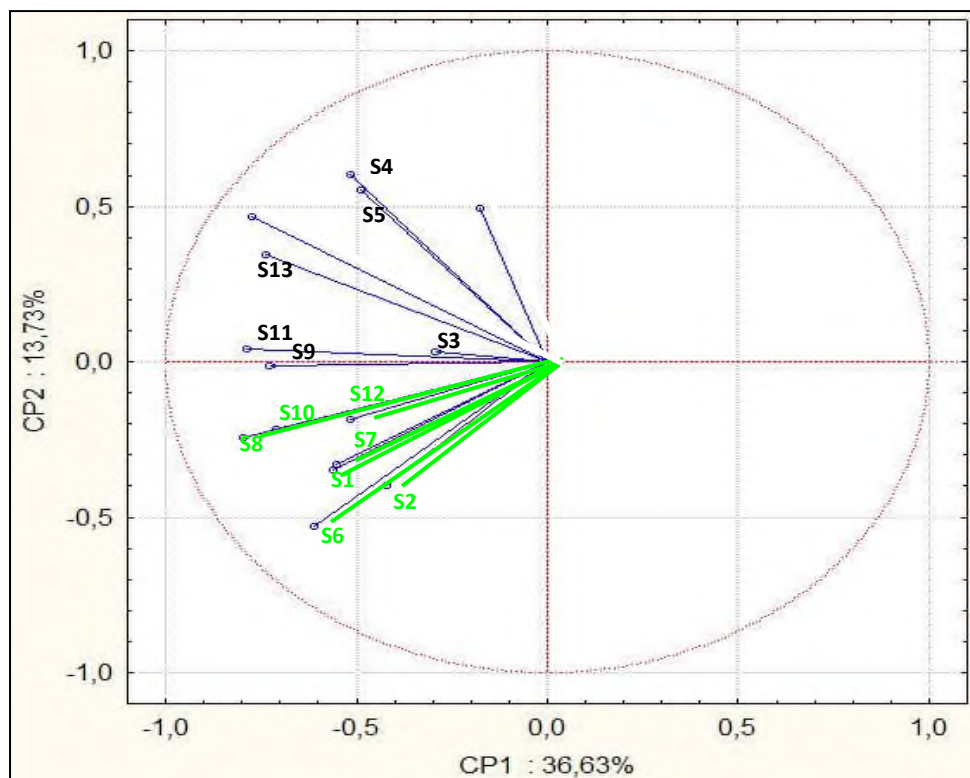


Figure III.3: Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP2)

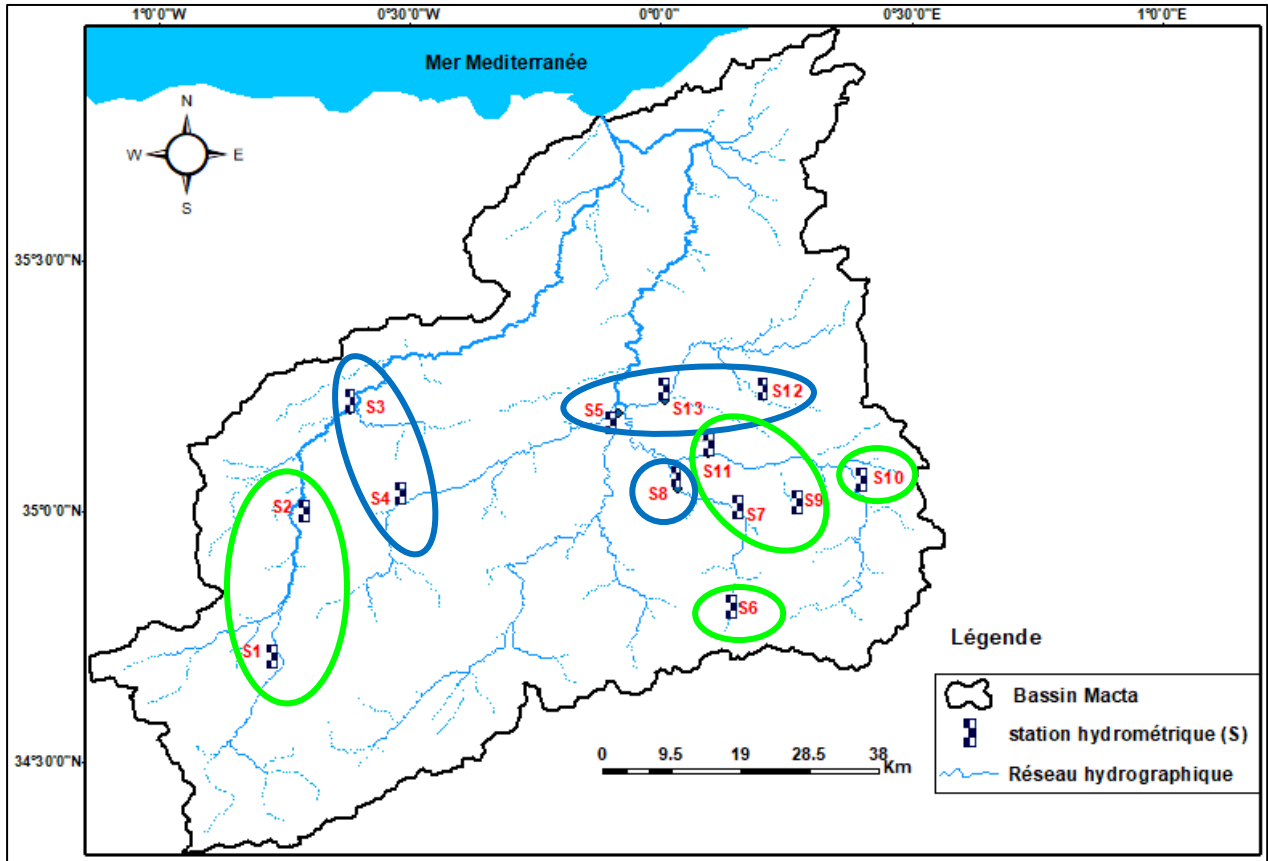


Figure III.4: Présentation physique du cercle de corrélation (CP1XCP2)

- Projection des variables sur la troisième composante CP3

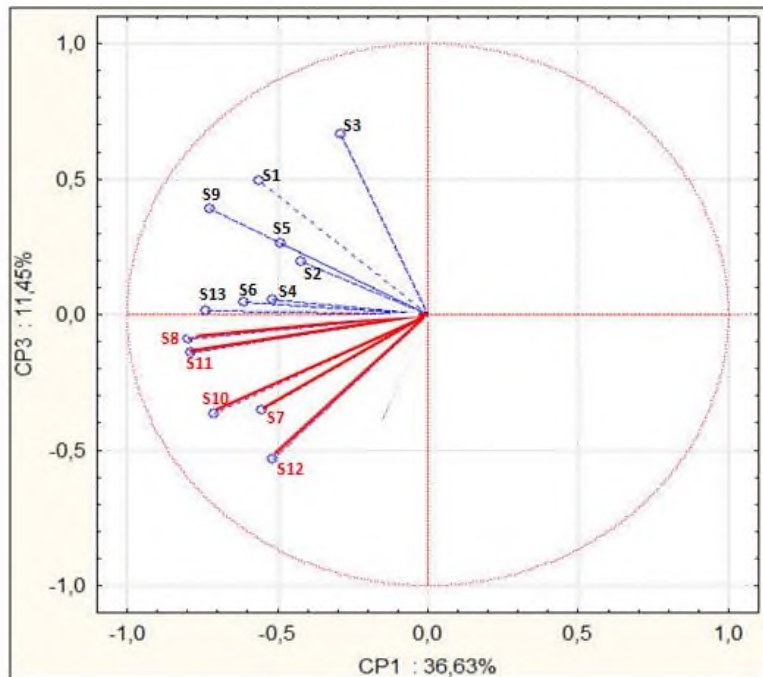


Figure III.5: Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP3)

Sur la troisième composante, la structure spatiale s'interrompt. Les projections changent notablement sans explication claire. Par conséquent, la projection des variables sur les plans CP1xCP2 sera retenue.

III.2.3 Distribution mensuelle des débits liquides

III.2.3.1 Coefficient mensuel de débits (CMD)

La variation du régime des cours d'eau peut être traduite par le coefficient mensuel de débits (CMD) dont la répartition mensuelle des débits est récapitulée dans le tableau III.11.

Les résultats du tableau III.11 montrent que :

- ☞ Le maximum mensuel diffère d'un oued à un autre ; sept (07) stations hydrométriques enregistrent un maximum d'apport liquide en saison de printemps plus précisément en mois de Mars ou Avril. Alors que Six (06) stations hydrométriques enregistrent un maximum d'apport liquide en saison d'automne (04 stations au mois de Novembre).
- ☞ Le coefficient mensuel des débits fluctue entre des mois de hautes (CMD>1) eaux et ceux de basses eaux (CMD<1).

En comparant les distributions saisonnières des précipitations nous trouvons que le maximum pluviométrique enregistré en saison d'Hiver engendre un maximum de débits liquides en saison de printemps ce qui est logique.

Tableau III.11: Distribution mensuelle des débits et leurs caractéristiques statistiques

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Annuel
Station 110101													
Moy	0,58	0,41	0,32	0,07	0,08	0,08	0,25	0,2	0,4	0,18	0,1	0,12	0,24
CMD	2,49	1,77	1,38	0,29	0,36	0,36	1,07	0,84	1,73	0,78	0,41	0,52	/
Max	3,26	2,65	1,39	0,35	0,38	0,60	3,62	1,45	2,15	1,14	0,67	0,81	0,51
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,68	0,60	0,37	0,08	0,10	0,13	0,89	0,34	0,57	0,28	0,19	0,17	0,15
CV	1,17	1,46	1,14	1,18	1,21	1,54	3,60	1,73	1,41	1,56	2,00	1,38	0,55
Station 110201													
Moy	0,95	0,71	0,95	0,95	0,93	1,10	0,88	1,42	1,11	0,71	0,91	0,53	0,89
CMD	1,02	0,76	1,03	1,02	1,00	1,18	0,95	1,53	1,19	0,76	0,98	0,57	/
Max	2,67	2,86	3,91	2,67	2,05	4,31	7,75	6,90	4,54	5,26	2,16	3,22	1,37
Min	0,13	0,00	0,19	0,67	0,50	0,50	0,37	0,93	0,29	0,29	0,72	0,00	0,12
σ	0,61	0,76	0,90	0,51	0,27	0,64	1,91	1,92	1,11	0,88	0,93	0,67	0,27
CV	0,64	1,07	0,95	0,54	0,28	0,58	2,18	1,35	1,01	1,25	1,03	1,26	0,30
Station 110301													
Moy	1,54	1,55	1,57	1,49	1,62	1,76	2,00	1,71	0,85	1,32	0,97	0,91	1,51
CMD	1,07	1,07	1,09	1,03	1,12	1,22	1,39	1,19	0,59	0,92	0,67	0,63	/
Max	3,34	3,12	4,81	2,59	2,62	2,71	6,02	4,51	2,60	3,19	1,95	3,29	1,93
Min	0,45	0,55	0,66	1,39	1,46	1,64	1,00	0,17	0,03	0,14	0,05	0,00	0,09
σ	0,62	0,55	0,80	0,22	0,28	0,25	2,18	1,78	0,66	0,69	1,06	0,69	1,13
CV	0,40	0,36	0,51	0,15	0,17	0,14	1,09	1,04	0,77	0,52	1,10	0,76	0,75
Station 110506													
Moy	0,6	0,81	0,4	0,26	0,29	0,24	0,26	0,21	0,2	0,13	0,06	0,28	0,14
CMD	1,92	2,6	1,28	0,84	0,93	0,77	0,84	0,67	0,65	0,43	0,19	0,88	/
Max	2,12	2,21	1,25	0,35	0,38	0,60	2,80	1,45	2,15	1,14	0,67	0,81	0,36
Min	0,00	0,00	0,00	0,11	0,14	0,11	0,15	0,10	0,11	0,18	0,05	0,00	0,01
σ	0,89	1,23	0,64	0,32	0,3	0,27	0,43	0,31	0,26	0,17	0,09	0,72	0,22
CV	1,49	1,52	1,61	1,21	1,03	1,13	1,65	1,49	1,3	1,28	1,57	2,62	0,71

Tableau III.11: Distribution mensuelle des débits et leurs caractéristiques statistiques (suite)

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Annuel
Station 111003													
Moy	2,38	4,15	1,83	0,87	1,18	0,98	1,18	0,70	1,11	0,46	0,15	0,34	0,53
CMD	1,86	3,25	1,43	0,68	0,92	0,77	0,92	0,54	0,87	0,36	0,12	0,27	/
Max	21,15	20,60	12,08	3,21	8,95	4,54	8,70	3,71	7,33	2,02	0,67	2,95	1,82
Min	0,00	0,00	0,00	0,11	0,11	0,03	0,08	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
σ	3,97	5,7	2,75	0,79	1,54	0,90	2,31	0,99	1,48	0,55	0,20	0,66	0,38
CV	1,67	1,37	1,50	0,91	1,30	0,92	1,96	1,43	1,33	1,19	1,30	1,94	0,72
Station 11127													
Moy	0,26	1,39	1,32	0,34	0,53	1,31	0,67	0,47	0,39	0,29	0,21	0,14	0,18
CMD	0,43	2,28	2,16	0,56	0,86	2,15	1,1	0,78	0,63	0,47	0,34	0,24	/
Max	0,78	9,28	9,90	0,69	1,42	3,05	3,19	2,41	1,12	1,35	0,46	0,20	0,50
Min	0,19	0,13	0,37	0,17	0,20	0,85	0,05	0,08	0,08	0,04	0,00	0,00	0,03
σ	0,1	1,76	1,62	0,12	0,26	0,47	0,95	0,68	0,26	0,23	0,23	0,04	0,08
CV	0,36	1,26	1,23	0,36	0,50	0,36	1,41	1,43	0,67	0,80	1,11	0,29	0,46
Station 11106													
Moy	0,59	1,39	1,32	0,98	1,17	1,09	0,81	0,83	0,52	0,26	0,31	0,32	0,34
CMD	0,74	1,75	1,66	1,23	1,47	1,36	1,02	1,03	0,65	0,32	0,38	0,40	/
Max	4,26	9,28	9,90	1,98	3,17	3,93	3,86	4,19	1,50	1,19	0,51	1,43	0,82
Min	0,08	0,13	0,37	0,48	0,44	0,33	0,06	0,14	0,11	0,04	0,06	0,08	0,15
σ	0,68	1,76	1,62	0,36	0,58	0,78	1,14	1,19	0,34	0,20	0,31	0,24	0,15
CV	1,16	1,26	1,23	0,36	0,50	0,71	1,41	1,44	0,67	0,80	1,02	0,76	0,44
Station 11129													
Moy	1,02	4,37	2,00	3,88	2,70	2,07	2,39	2,51	2,36	0,62	0,42	0,25	0,75
CMD	0,50	2,13	0,98	1,89	1,32	1,01	1,17	1,22	1,15	0,30	0,21	0,12	/
Max	11,04	22,31	10,59	7,87	9,82	7,17	17,96	12,75	6,84	2,87	0,70	2,66	2,22
Min	0,00	0,00	0,29	1,92	0,00	0,39	0,11	0,41	0,49	0,09	0,08	0,00	0,18
σ	1,86	5,34	2,22	1,41	2,31	1,60	4,62	3,68	1,57	0,49	0,43	0,45	0,39
CV	1,84	1,22	1,11	0,36	0,86	0,77	1,93	1,47	0,67	0,80	1,02	1,84	0,52
Station 111208													
Moy	0,90	0,85	1,78	0,63	1,02	1,13	0,86	0,50	0,71	0,36	0,33	0,30	0,33
CMD	1,16	1,09	2,27	0,81	1,30	1,45	1,10	0,64	0,91	0,45	0,43	0,38	/
Max	10,35	4,59	18,13	4,01	2,67	3,89	4,37	3,78	2,06	1,73	0,88	1,07	0,75
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,22	0,00	0,00	0,27	0,00	0,08
σ	1,92	0,99	3,38	0,70	0,50	0,80	1,39	0,98	0,52	0,37	0,35	0,25	0,17
CV	2,12	1,16	1,90	1,11	0,49	0,70	1,61	1,97	0,74	1,04	1,07	0,83	0,51

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Annuel
Station 111220													
Moy	0,06	0,15	0,18	0,16	0,19	0,29	0,42	0,33	0,17	0,09	0,06	0,03	0,07
CMD	0,36	0,87	1,00	0,90	1,05	1,63	2,35	1,83	0,97	0,50	0,35	0,19	/
Max	0,62	1,39	3,09	1,33	0,93	2,73	3,33	4,16	0,95	0,44	0,59	0,30	0,32
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,14	0,30	0,52	0,30	0,27	0,55	1,08	1,08	0,25	0,09	0,18	0,07	0,08
CV	2,17	1,93	2,91	1,85	1,44	1,88	2,57	3,32	1,44	1,04	2,80	2,05	1,21
Station 111201													
Moy	1,64	2,46	2,72	1,71	2,07	2,50	2,39	1,77	1,56	0,81	0,93	1,15	0,65
CMD	0,91	1,36	1,50	0,94	1,14	1,38	1,32	0,98	0,86	0,45	0,51	0,64	/
Max	12,44	17,28	21,44	10,85	8,04	14,07	12,14	13,50	8,61	3,97	8,72	9,94	1,72
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,13	0,99	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
σ	2,76	3,85	4,13	1,90	2,01	2,59	3,85	3,50	2,25	0,84	2,50	2,37	0,51
CV	1,68	1,57	1,52	1,11	0,97	1,03	1,61	1,97	1,44	1,04	2,69	2,05	0,79
Station 111412													
Moy	0,05	0,16	0,22	0,29	0,32	0,35	0,64	0,28	0,12	0,12	0,05	0,03	0,07
CMD	0,21	0,73	1,00	1,34	1,49	1,62	2,91	1,27	0,55	0,55	0,21	0,13	/
Max	0,49	1,02	1,05	2,66	1,90	1,95	6,08	3,24	0,59	0,57	0,20	0,12	0,29
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,08	0,26	0,27	0,51	0,47	0,48	1,70	0,78	0,15	0,11	0,07	0,03	0,07
CV	1,81	1,63	1,24	1,74	1,44	1,36	2,67	2,83	1,24	0,95	1,51	1,05	0,95
Station 111403													
Moy	0,25	0,58	0,41	0,50	0,87	0,35	0,64	0,47	0,30	0,22	0,30	0,15	0,40
CMD	0,59	1,38	0,97	1,18	2,08	0,83	1,52	1,13	0,72	0,51	0,72	0,36	/
Max	2,56	4,57	2,88	2,77	11,91	1,91	3,36	5,54	1,17	1,03	0,85	0,65	0,73
Min	0,00	0,24	0,00	0,21	0,05	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,02
σ	0,44	0,79	0,52	0,49	1,94	0,47	0,99	1,31	0,31	0,20	0,33	0,16	0,20
CV	1,81	1,36	1,29	0,99	2,22	1,36	1,55	2,77	1,01	0,95	1,09	1,05	0,51

III.3 Analyse des tendances des variables hydro-climatiques

Pour étudier la tendance des variables hydro-climatiques à l'échelle interannuelle ; on procède en premier lieu à l'analyse des graphes de distribution temporelle des données de débits, de précipitations et de température enregistrées aux différentes stations étudiées qui sont régulièrement distribuées dans le bassin versant; puis on analyse l'existence d'éventuel(s) changement(s) de moyenne dans les séries chronologiques étudiées.

III.3.1 Analyse de tendance des précipitations

Les graphes de la figure III.6 ci-dessous montrent une variation significative des précipitations interannuelles surtout aux stations (P1, P7 et P18). Cette variation est marquée par une pente positive des droites de tendance indiquant une tendance à la hausse des précipitations durant la période d'étude allant de 1975 à 2016 de l'ensemble des stations mais avec des écarts variables. Les stations P4, P6, P8, P11, P13, P16 et P17 montrent de faibles pentes autrement dit faible variation des précipitations à l'échelle interannuelle.

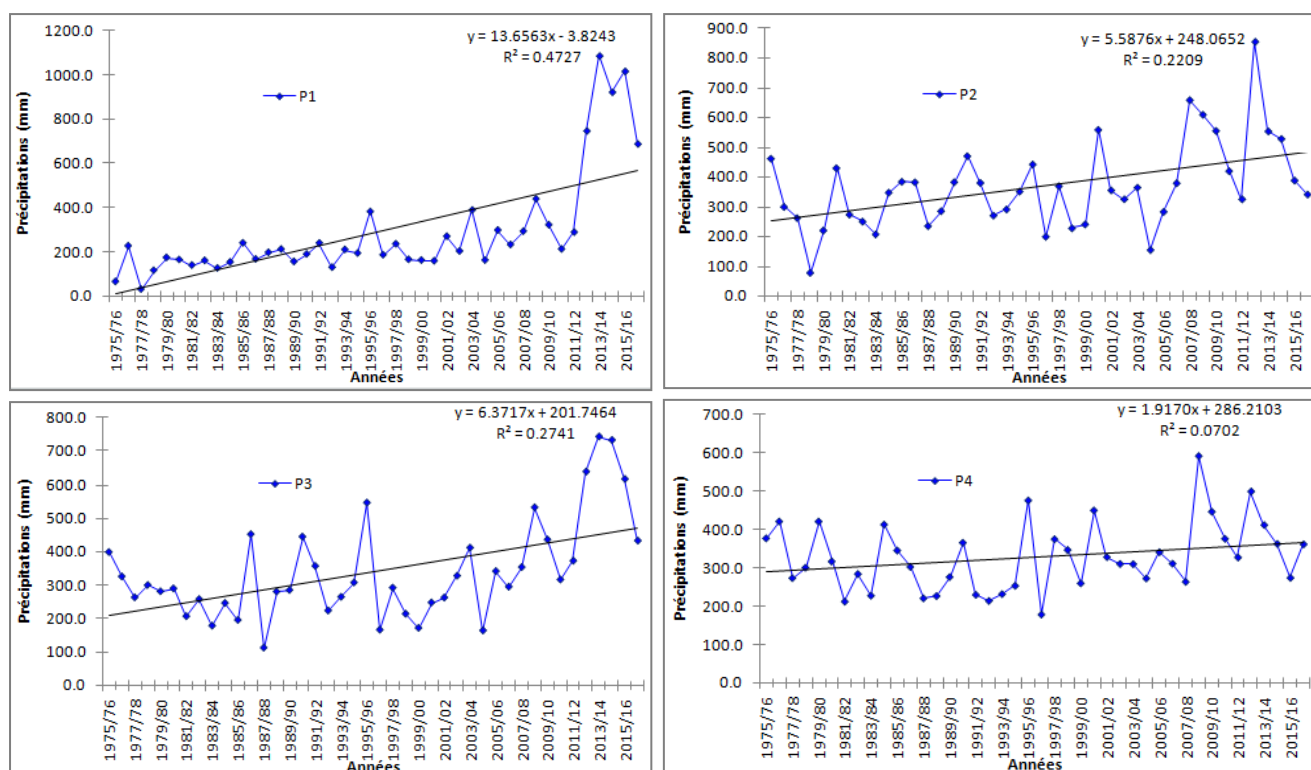


Figure III.6: Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de la Macta (1975/76-2015/16)

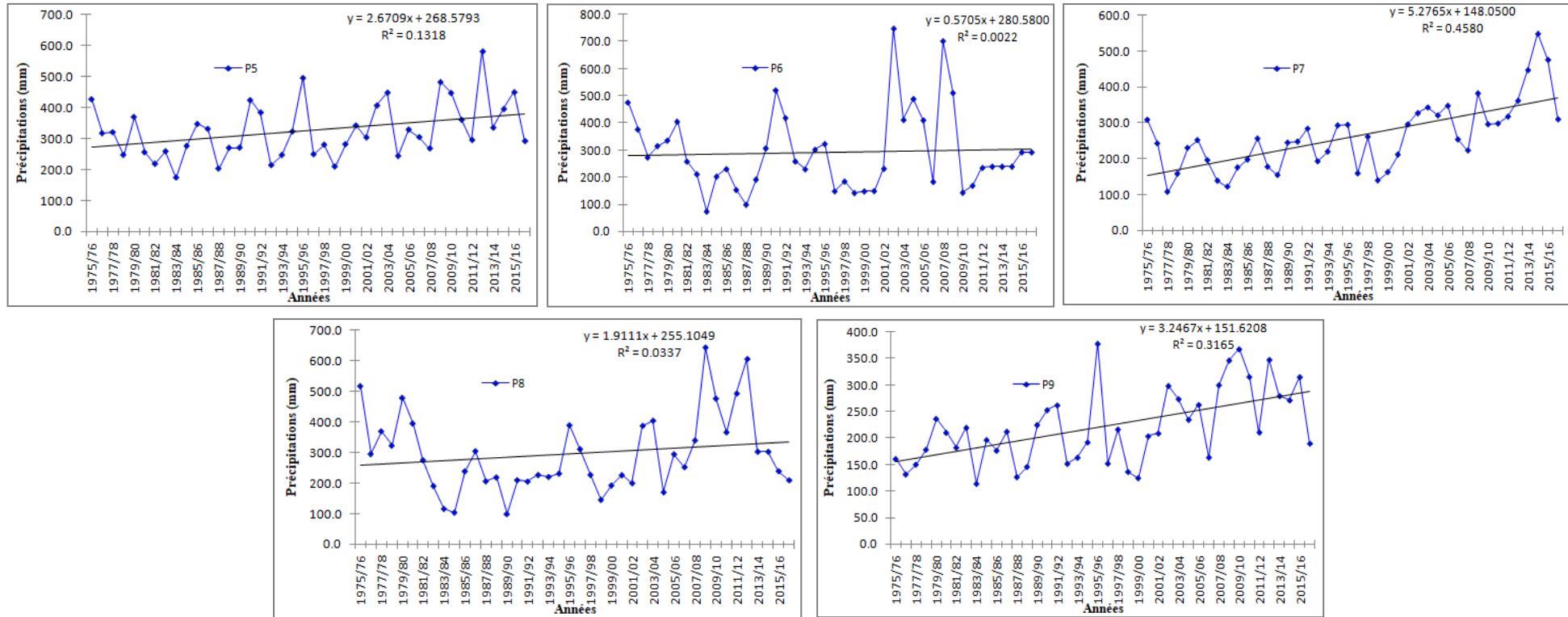


Figure III.6: Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de la Macta (1975/76-2015/16) (suite)

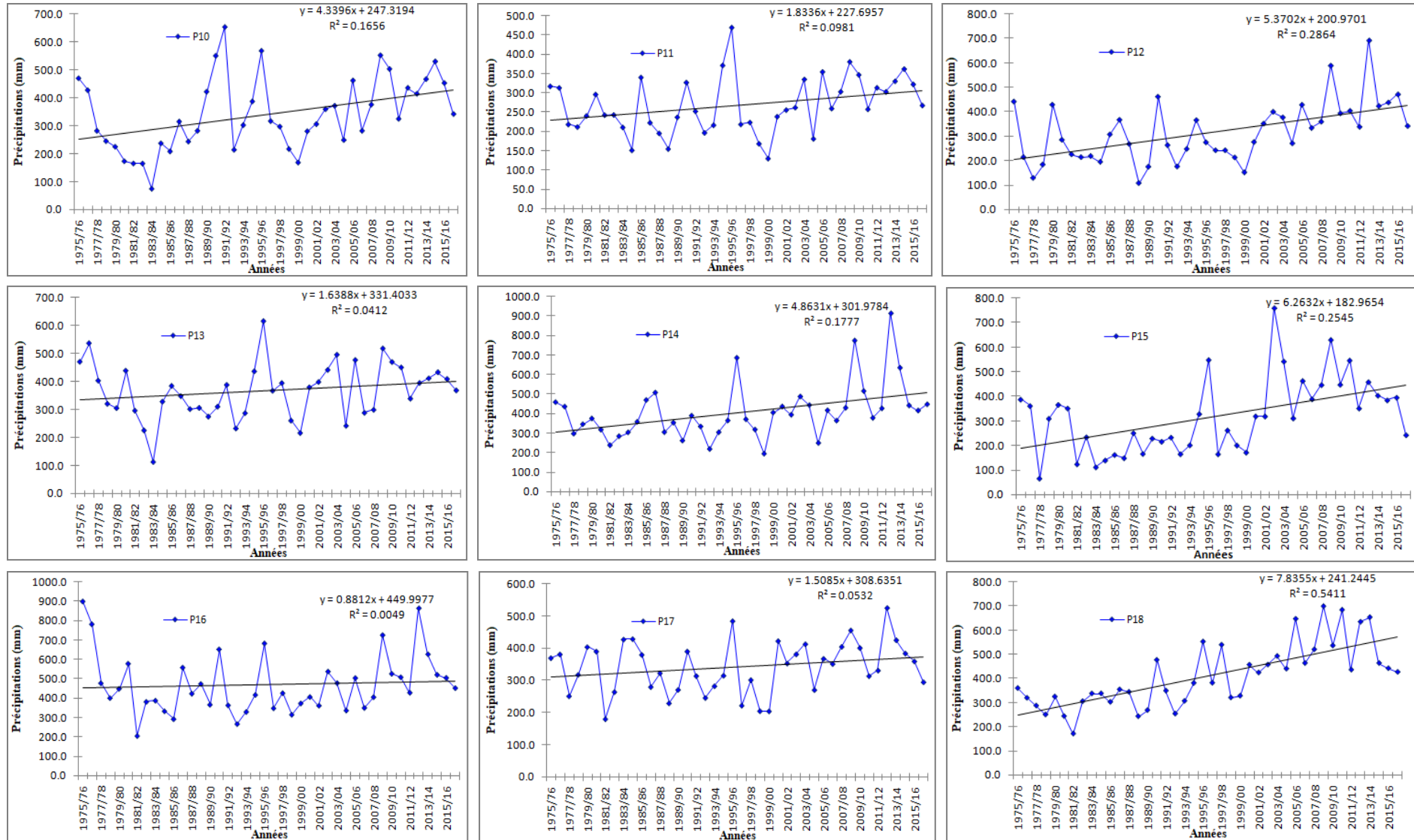


Figure III.6 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de la Macta (1975/76-2015/16) (suite)

III.3.2 Test de rupture dans les séries pluviométriques

Pour détecter d'éventuel changement (i.e rupture) de la moyenne des variables étudiées dans le temps, les tests statistiques de Pettitt et la segmentation d'Hubert ont été utilisés. Ces tests sont regroupés dans le programme statistique Khronostat développé par l'équipe IRD en 2002 à Montpellier (France) (Boyer, 2002).

➤ Test de Pettitt (1979)

Est un test non paramétrique dérivé du test de Mann-Whitney. Il consiste à découper la série principale de N éléments en deux (02) sous séries entre 1 et $N-1$ à l'instant t dont l'absence de rupture dans la série d'observation (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. Lorsque les deux (02) sous séries ont des distributions différentes la série principale présente une rupture à l'instant t (Gutierrez- López , 2003).

Pettitt définit la variable $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{III.1})$$

Où :

$$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (\text{III.2})$$

avec :

$$\text{sgn}(Z) = 1 \text{ si } Z > 0, \text{sgn}(Z) = 0 \text{ si } Z = 0, \text{sgn}(Z) = -1 \text{ si } Z < 0$$

L'hypothèse nulle H_0 de non rupture est testée au moyen de la statistique K_N définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$. La probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par la relation suivante :

$$\text{Prob}(K_N > K) \approx 2 \exp\left(-\frac{6K^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (\text{III.3})$$

Si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α (risque α de première espèce), l'hypothèse nulle est rejetée et la série comporte alors une rupture donnée par K_N (Gutierrez- López , 2003).

➤ Segmentation d'Hubert

Le principe de cette méthode est de découper une série en m segments de telle sorte que la moyenne calculée sur chaque segment soit différente de la moyenne des segments voisins (Hubert et al., 1989). L'avantage de cette méthode est de rechercher de multiples changements de moyenne et donc plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) (Gutierrez- López , 2003).

A partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit :

$i_k = 1, 2, \dots, m$ le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ème}}$ segment.

$$D_m = \sum_{k=1}^m D_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2 \quad (\text{III.4})$$

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} X_i}{n_k} \quad (\text{III.5})$$

\bar{X}_k : moyenne du $k^{\text{ème}}$

$n_k = i_k - i_{k-1}$ la longueur du $k^{\text{ème}}$.

D_m : l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre m de segmentation donnée, l'écart quadratique D_m soit minimum (Dagnelie, 1970)

Les résultats d'application de ces tests statistiques sont synthétisés au tableau III.12.

Tableau III.12: Résultats des tests d'homogénéité et années de ruptures des séries pluviométriques annuelles étudiées (1975/76-2015/16)

Indice station	Code station	P _{moy}	Pettit	Hubert	X_i	X_j	Var
P1	11 01 02	280	Rejetée (2000)	2000	197,4	283,8	-0,44
P2	11 02 01	368	Rejetée (2006)	2006	317,3	528,5	-0,66
P3	11 02 03	336	Rejetée (2007)	2007	283,2	525,7	-0,86
P4	11 03 05	326,6	Acceptée	2007	307,7	394	-0,28
P5	11 05 09	326,8	Rejetée (2007)	2007	305,6	402,2	-0,32
P6	11 07 01	298,3	Acceptée	/	/	/	/
P7	11 08 02	260,3	Rejetée (2000)	2000	208,7	340,9	-0,63
P8	11 09 04	302	Rejetée (2007)	2007	269	419,4	-0,56
P9	11 10 02	222,2	Rejetée (2001)	2001	188,7	280,1	-0,48
P10	11 11 03	340,6	Rejetée (1998)	1998	248,4	383,4	-0,54
P11	11 11 13	267	Rejetée (2004)	2004	249,8	309	-0,24
P12	11 11 16	315,8	Rejetée (2004)	2000	255,8	409,6	-0,60
P13	11 12 05	366,6	Acceptée	/	/	/	/
P14	11 12 08	405,5	Rejetée (2007)	2007	365,3	548,5	-0,50
P15	11 12 17	319,4	Rejetée (2001)	2001	239,8	457,4	-0,91
P16	11 14 04	469,4	Acceptée	2007	441,8	567	-0,28
P17	11 14 13	342,2	Rejetée (1999)	1999	319,3	374,6	-0,17
P18	11 14 17	409,3	Rejetée (1994)	1993	307	489,3	-0,59

Avec : \bar{X}_i : Moyenne avant la date de rupture (mm) , \bar{X}_j : Moyenne après la rupture (mm) ,

Var : Taux de variation (%)

L'analyse du tableau III.12 montre que les deux méthodes statistiques indiquent pratiquement les mêmes années de rupture pour la même station. Cependant, seize (16) stations pluviométriques étudiées présentent une rupture positive observée à partir des années 2000 provoquant une augmentation de la pluviométrie de 50% environ sur l'ensemble de la zone d'étude de la Macta. La plus grande variation est observée au niveau des stations 110203 et 111217 alors que la plus faible est au niveau de la station 111413 dans la région de Ghriss. Deux (02) stations (110701 et 111205) connaissent une stabilité de la moyenne (stationnarité) durant la période analysée.

III.3.3 Analyse de tendance des débits liquides

Les graphes de la figure III.7 ci-dessous montrent une variation significative des débits annuels surtout aux stations (Q4 et Q12). Cette variation est marquée parfois par une pente négative des droites de tendance indiquant une inclinaison à la baisse des débits où les stations Q4, Q12 et Q13 montrent une baisse très significative. Pour le reste des stations la pente est positive montrant une faible hausse des débits liquides des oueds durant la période d'étude allant de 1975/76 à 2015/16.

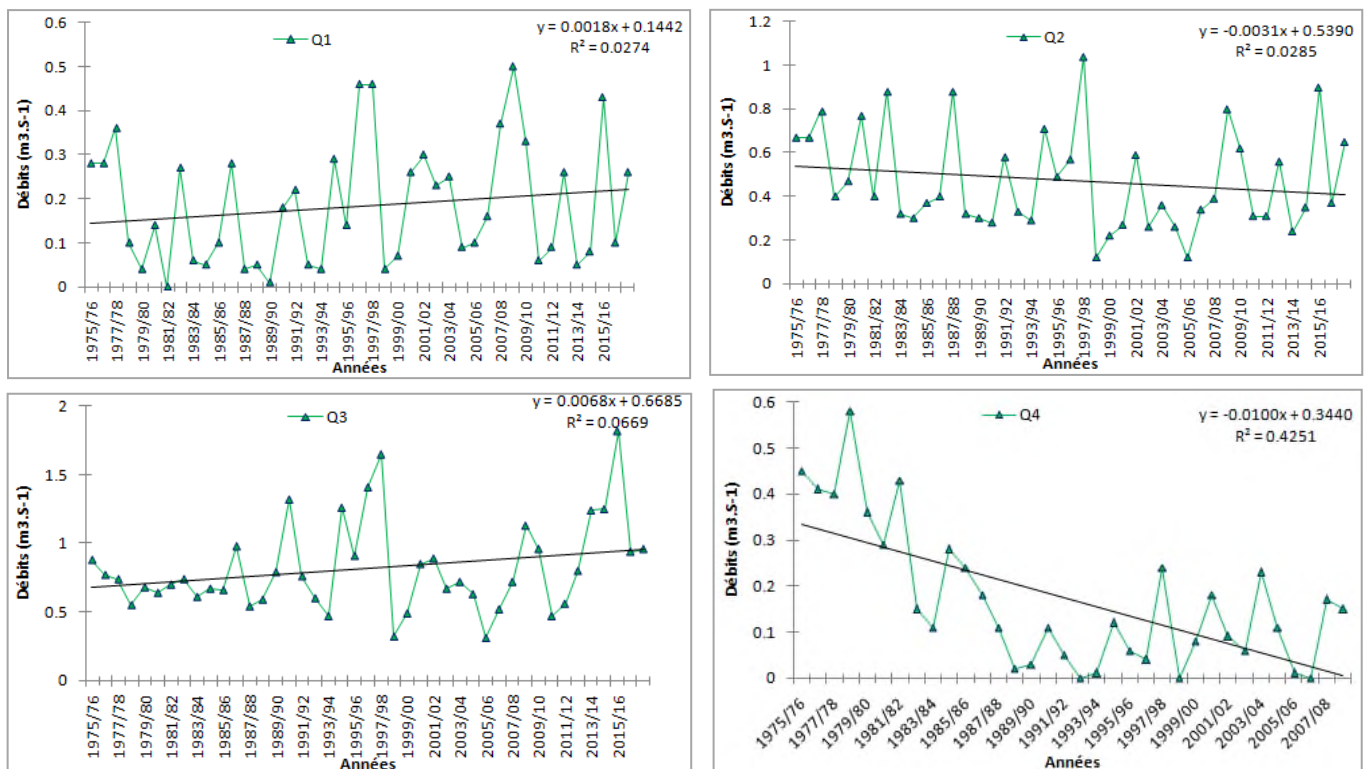


Figure III.7: Variabilité des débits liquides et droites linéaires de tendance des stations hydrométriques étudiées dans le bassin versant de la Macta



Figure III.7: Variabilité des débits liquides et droites linéaires de tendance des stations hydrométriques étudiées dans le bassin versant de la Macta (suite)

III.3.4 Test de rupture dans les séries hydrométriques

Par ailleurs, les séries chronologiques de débits liquides ont été analysées par le logiciel Khronostat, en vue de déceler une éventuelle rupture en utilisant les tests statistiques décrits précédemment (Tableau III.13).

Tableau III.13: Résultats des tests d'homogénéité et années de ruptures dans les séries hydrométriques annuelles étudiées

Indice station	Code Station	Q _{moy}	Petit	Hubert	X_i	X_j	Var
Q1	11 01 01	0,18	Acceptée	/	/	/	/
Q2	11 02 01	0,47	Acceptée	/	/	/	/
Q3	11 03 01	0,81	Acceptée	/	/	/	/
Q4	11 05 06	0,17	Rejetée (1996)	1996	0,62	0,34	0,81
Q5	11 1003	0,48	Acceptée	/	/	/	/
Q6	11 1127	0,20	Acceptée	/	/	/	/
Q7	11 11 06	0,33	Acceptée	/	/	/	/
Q8	11 11 29	0,75	Acceptée	2012	0,73	1,03	-0,41
Q9	11 12 08	0,37	Acceptée	2012	0,33	0,57	-0,72
Q10	11 12 20	0,07	Rejetée (1997)	1997	0,10	0,05	0,50
Q11	11 12 01	0,65	Acceptée	/	/	/	/
Q12	11 1412	0,09	Rejetée (1997)	1997	0,16	0,06	0,62
Q13	11 1403	0,12	Rejetée (1987)	1987	0,33	0,04	0,87

Avec :

Q_{moy} : débit moyen interannuel ($m^3.s^{-1}$), X_i : Moyenne avant la date de rupture ($m^3.s^{-1}$) ,

X_j : Moyenne après la rupture ($m^3.s^{-1}$) , Var : Taux de variation (%)

Les résultats montrent que six (06) stations hydrométriques ont décelé une rupture signalée au moins par un test, parmi elles quatre (04) signalent une rupture en 1987, 1996 et 1997 et produisant une réduction significative du débit liquide 87% à la station 111403. Alors que deux (02) stations (111129 et 111208) enregistrent une augmentation des débits liquides des oueds en 2012 jusqu'à 72%. Sept (07) stations hydrométriques ne signalent aucune rupture au cours de la période d'étude.

III.3.5 Analyse de tendance de la température

Les graphes de la figure III.8 ci-dessous montrent une variation de la température d'une année à une autre. Cette variation est marquée par une pente positive des droites de tendance indiquant une inclinaison à la hausse de la température durant la période d'étude allant de 1983 à 2016. L'augmentation de température est traduite par le réchauffement climatique recensé dans la partie Ouest de l'Algérie et qui a été étudié par plusieurs chercheurs ; exemple les travaux de [Bakreti et al. \(2013\)](#), [Baahmed et al. \(2015\)](#).

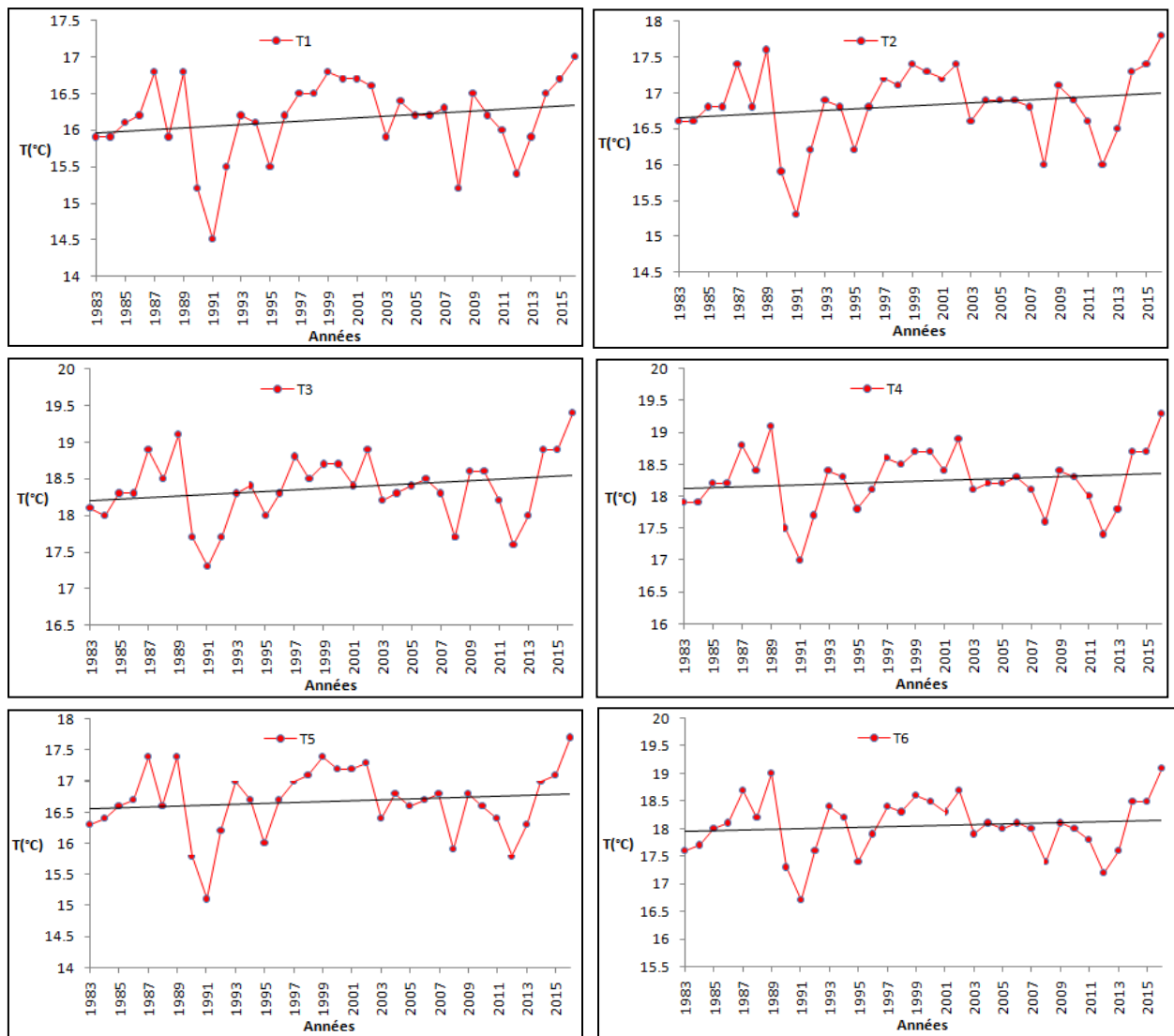


Figure III.8: Variabilité de la température et droites linéaires de tendance des points satellitaires étudiés dans le bassin versant de la Macta (1983/84-2015/16)

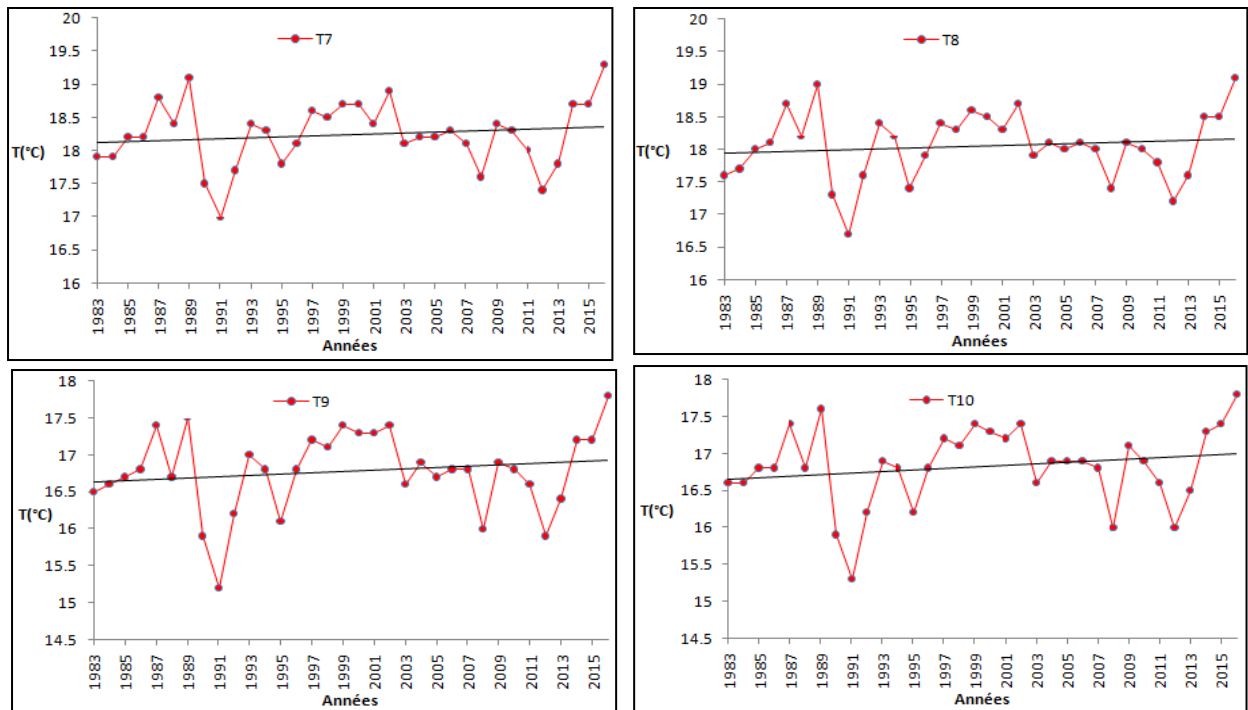


Figure III.8: Variabilité de la température et droites linéaires de tendance des points satellitaires étudiés dans le bassin versant de la Macta (1983/84-2015/16) (suite)

III.3.6 Test de rupture dans les séries hydrométriques

Comme pour les précipitations et débits liquides ; les séries chronologiques de température moyenne annuelle ont été aussi analysées par les tests statistiques définis précédemment dont les résultats sont synthétisés au tableau III.14

Tableau III.14: Résultats des tests d’homogénéité et années de ruptures dans les séries de température annuelle dans le bassin versant de la Macta

Indice station	T _{moy}	Petit	Hubert	X _i	X _j	Var
T1	16,1	Acceptée	/	/	/	/
T2	16,8	Acceptée	/	/	/	/
T3	18,4	Acceptée	/	/	/	/
T4	18,2	Acceptée	/	/	/	/
T5	16,7	Acceptée	/	/	/	/
T6	18	Acceptée	/	/	/	/
T7	18,2	Acceptée	/	/	/	/
T8	18	Acceptée	/	/	/	/
T9	16,8	Acceptée	/	/	/	/
T10	16,8	Acceptée	/	/	/	/

Avec :

T : Température moyenne annuelle (mm) , X_i : Moyenne avant la date de rupture(mm) , X_j : Moyenne après la rupture (mm) , **Var :** Taux de variation (%)

Les résultats du tableau III.14 montrent qu'aucune rupture n'a été constatée durant la période d'étude allant de 1983/84 à 2015/16. Ces résultats confirment qu'on assiste à une augmentation de la température mais la rupture est manifestée avant cette période.

Conclusion

L'étude des précipitations moyennes interannuelles de chaque sous bassin de la Macta montre que le régime pluviométrique croit généralement du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est avec un coefficient de variation plus important au sud. L'indicatif saisonnier du régime pluviométrique le plus dominant dans le bassin versant de la Macta est de type HPAE (Hiver, Printemps, Automne, Eté). L'étude statistique du régime hydrométrique des oueds de la Macta montre qu'ils sont irréguliers ($C_v > 0,5$). Cette variabilité est due à l'alimentation pluviale irrégulière des Oueds et la géologie des terrains. Le maximum pluviométrique enregistré en Hiver est responsable de l'abondance des Oueds de la Macta en Printemps. Les tests statistiques de ruptures appliquées aux séries hydro-climatiques montrent que le bassin versant de la Macta a connu une variabilité climatique. Cette variabilité est traduite par une augmentation de la température sans rupture recensée (période d'étude 1983-2016) et est accompagnée d'une augmentation du régime pluviométrique durant les années 2000. Par conséquence, les débits des oueds de la Macta connaissent une variabilité mais sans accord avec des dates de rupture du régime pluviométrique. Ces observations et résultats sont dus principalement à la complexité des variables hydrologiques, notamment les débits liquides des oueds en climat semi-aride et cette différence de comportement entre les sous bassins étudiées reste à vérifier par un modèle hydrologique de nature pluie-débit.

CHAPITRE IV :

APPLICATION DE LA MODÉLISATION PLUIE-DÉBIT AU BASSIN VERSANT DE LA MACTA

Chapitre IV

Application de la modélisation pluie-débit au bassin versant de la Macta

Introduction

Après avoir présenté l'architecture des trois (03) modèles adoptés dans la partie bibliographique à savoir : RLM, GR2M et RNA ; nous comparons dans ce chapitre leurs exécutions aux oueds de la Macta par la procédure de calage-validation. Nous finissons par sélectionner le meilleur modèle adéquat en utilisant des critères statistiques.

IV.1 Choix des variables hydrologiques de la modélisation pluie-débit

Dans ce travail, la modélisation pluie-débit se fait au pas de temps mensuel en prenant en compte la semi-distribution spatiale des sous bassins versants de la Macta.

Les variables choisies et utilisées sont de deux (02) natures:

- Variables climatiques ; Précipitations (P) et Évapotranspiration de référence E_{To} , nommées « variables d'entrées ».
- Variables hydrométriques ; débit (Q), nommée « variable de sortie » qui représente la réponse du système étudié.

Ces variables sont choisies comme étant les plus simples à mesurer et les plus importants à la réponse d'un système étudié. La distribution de ces variables est ignorée à l'intérieur de chaque mois et donc seule leur sommation sur un mois calendaire donné est connue.

Dans ce travail, les variables d'entrées (P, E_{To}) doivent être représentatives de chaque surface de drainage de la Macta. A cet effet, une interpolation par la méthode des polygones de Thiessen a été appliquée selon le nombre et la position des postes climatiques dans la zone d'étude de la Macta pour obtenir des données moyennes de chaque variable climatique dans les sous bassins étudiés de la Macta. La méthode de Thiessen est une technique de triangulation permettant de définir la zone d'influence

de chaque station ; en utilisant la procédure des médiatrices entre les stations pour obtenir les tracés des polygones de Thiessen sur un ou plusieurs sous bassins versant donnés.

Dans notre cas, dix-huit (18) postes pluviométriques ont été concernés par les polygones de Thiessen pour ressortir les précipitations moyennes de chaque sous bassin versant étudié. Le tracé des polygones de Thiessen ou appelé couramment les zones d'influence de chaque poste a été établi en utilisant les fonctionnalités d'ArcGis dont la méthode de Thiessen est y intégrée permettant de calculer la surface de chaque polygone. La zone d'influence de chaque poste pluviométrique contenue dans la région d'étude du bassin versant de la Macta est donnée en figure IV.1.

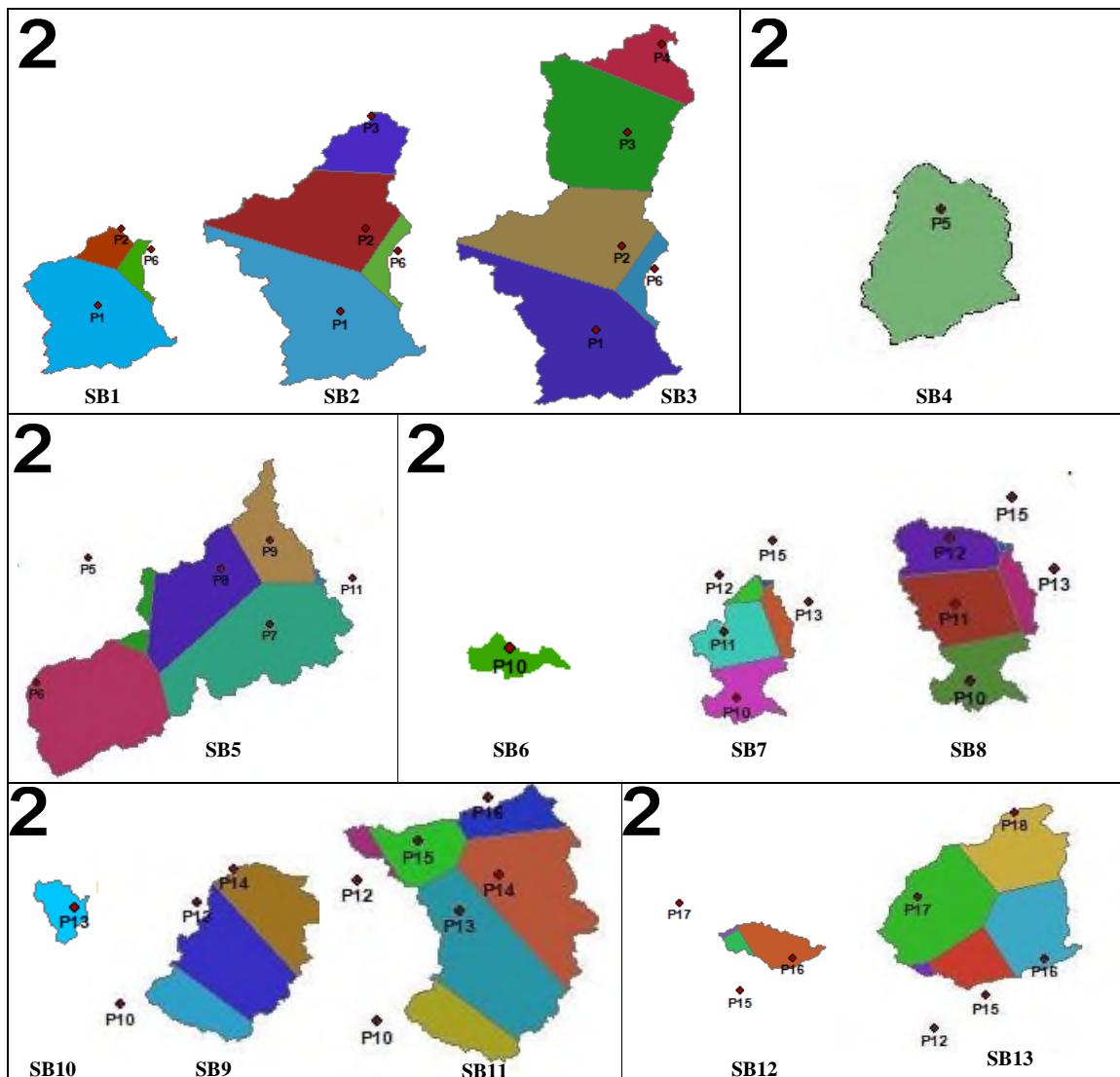


Figure IV.1 : Extraction des zones d'influence des postes pluviométriques par la méthode de Thiessen

Il suffit ensuite de calculer le pourcentage par rapport aux surfaces pour trouver la valeur moyenne pondérée de précipitation par application de la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \cdot P_i}{A} \quad (IV.1)$$

Avec :

P_{moy} : Précipitation moyenne sur le bassin (mm) ;

A : Aire totale du sous bassin (Km²) ($A = \sum A_i$);

A_i : Superficie du polygone associé à la station i (Km²) ;

P_i : Précipitation enregistrée à la station i (mm).

IV.2 Choix des modèles hydrologiques pluie-débit appliqués

La simplicité du choix des variables d'entrée décrits précédemment conduit à la recherche d'un modèle simple. Le choix des trois (03) modèles adoptés s'explique par deux raisons majeures : (i) le recours à des modèles classiques comme la RLM et le modèle conceptuel (GR2M) utilisés jusqu'à nos jours dans la comparaison avec de nouveaux modèles comme celui du RNA. (ii) les données hydrologiques sont en général assez imprécises et ne permettent pas d'exploiter les potentialités des modèles aussi peu complexes.

IV.3 Méthodologie de modélisation adoptée

Pour établir la modélisation pluie-débit, la méthodologie diffère d'un modèle à un autre :

IV.3.1 Modélisation par RLM, RNA

Différentes combinaisons des variables entrée et de sortie ont été présentées par quatre (04) modèles donnés en équation IV.2 ci-dessous.

$$\left\{ \begin{array}{l} M1 : Q_t = f(ET0_{t-1}, Q_{t-1}) \\ M2 : Q_t = f(P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}) \\ M3 : Q_t = f(P_{t-1}, Q_{t-1}) \\ M4 : Q_t = f(P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}) \end{array} \right. \quad (IV.2)$$

Avec :

Q_t : Débit observé à l'instant t (t : mois) ;

Q_{t-1} : Débit observé à l'instant $t - 1$;

P_t :Précipitation mensuelle ;

P_{t-1} : Précipitation à l'instant $t - 1$;

ET_{t-1} : Évapotranspiration de référence à l'instant $t - 1$.

L'ET utilisée dans la modélisation est calculée par la formule de Penman-Monteith décrite au chapitre cadre naturel et données d'analyse. Le processus de modélisation par le RNA a été réalisé par le logiciel Matlab (2019b), alors que la RLM a été mise en œuvre par Excel version (2007).

IV.3.2 Modélisation par GR2M

La dernière version du modèle GR2M développée par [Mouilhi et al. \(2006\)](#) a été utilisée dont seulement les variables P et ET en mm ont été utilisées. La structure du modèle et sa mise œuvre sont organisés dans un tableur Excel disponible au site officiel de l'INRAE (<https://webgr.inrae.fr/modeles/mensuel-gr2m/>).

IV.4 Résultats de modélisation

L'objectif de la modélisation pluie-débit est d'identifier les régions où le modèle reproduit les débits des oueds. La modélisation est faite en deux (02) étapes : calage et validation dont la division des séries hydro-climatiques est comme suite : le 2/3 des données au calage et le 1/3 des données est réservé à la validation. Cette division est basée sur les travaux de : [Zamoum et Souag-Gamane \(2019\)](#), [Abba et al.\(2020\)](#), [Hai et al. \(2020\)](#). Par ailleurs, pour ne pas perdre en quantité d'information à l'échelle spatiale, la période d'étude n'a pas été homogénéisée pour tous les sous bassins versants et cela dans le but d'assurer une bonne qualité des résultats et optimiser le rendement de l'approche de régionalisation. Cependant, les périodes de calage et de validation ne sont pas communes entre les stations qui sont dû aux lacunes reconstituées dans les séries temporelles et la longueur de la période de fonctionnement de chaque station fournie.

La qualité de modélisation est évaluée par les critères statistiques NSE, R et RMSE dont les seuils de satisfaction ont été fixés en référence aux travaux de [Moriassi et al. \(2007\)](#), [Nourani et al. \(2019b\)](#).

Les résultats d'application des trois (03) modèles adoptés (RLM, GR2M et RNA) appliqués sont présentés aux tableaux (IV.2, IV.3 et IV.5).

IV.4.1 Résultats du modèle RLM

Les résultats de simulation des débits ont été établis pour chaque combinaison et présentés au tableau IV.1

Tableau IV.1 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle RLM

Station	Code	Modèle	Paramètres	NSE		r		RMSE	
				Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
11 01 01	S1	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	39,1	45,7	0,63	0,68	0,093	0,128
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	39,1	45,7	0,63	0,68	0,093	0,128
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	37,9	45,8	0,62	0,68	0,094	0,128
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	43,9	49,4	0,66	0,70	0,089	0,123
11 02 01	S2	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	34,1	44,6	0,58	0,67	0,081	0,099
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	34,1	44,7	0,58	0,67	0,081	0,099
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	33,5	44,9	0,58	0,67	0,082	0,098
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	36,4	52,5	0,60	0,72	0,080	0,091
11 03 01	S3	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	37,3	41,7	0,61	0,65	0,087	0,086
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	37,3	41,7	0,61	0,65	0,087	0,086
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	13,5	30,1	0,37	0,55	0,102	0,094
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,9	50,7	0,65	0,71	0,083	0,079
11 05 06	S4	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	36,8	45,8	0,61	0,68	0,086	0,108
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	36,8	45,8	0,61	0,68	0,086	0,108
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	33,6	42,4	0,58	0,65	0,088	0,112
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	39,9	55	0,63	0,74	0,084	0,099
11 10 03	S5	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,2	39,9	0,64	0,63	0,115	0,060
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,4	39,9	0,64	0,63	0,115	0,060
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	37,3	37	0,61	0,61	0,119	0,061
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	47,8	41,5	0,69	0,64	0,109	0,059

Tableau IV.1 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle RLM (suite)

Station	Code	Modèle	Paramètres	NSE		r		RMSE	
				Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
11 11 27	S6	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	36,6	45,5	60,5	67,5	0,056	0,068
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	36,8	45,5	60,6	67,5	0,055	0,068
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	36,8	45,5	60,7	67,4	0,055	0,068
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	52,7	52,7	72,6	72,6	0,048	0,063
11 11 06	S7	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	43	45	65,6	67,1	0,085	0,063
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	43	45	65,6	67,1	0,085	0,063
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	43	45,1	65,5	67,2	0,085	0,063
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	54,3	48,7	73,7	69,8	0,076	0,061
11 11 29	S8	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,3	16,8	64,3	41	0,100	0,104
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,4	17,5	64,4	41,8	0,100	0,104
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	41,9	15,3	64,7	39,1	0,100	0,105
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	61,4	50,2	78,4	70,8	0,081	0,081
11 12 08	S9	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,6	20,2	64,5	45	0,084	0,089
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	41,5	22	64,4	46,9	0,084	0,088
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	41,3	22,2	64,3	47,1	0,084	0,088
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	55,4	37,4	74,4	61,1	0,073	0,079
11 02 20	S10	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	24,9	9,8	49,9	31,3	0,09	0,04
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	25,3	9,8	50,3	31,4	0,09	0,04
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	25,2	9,6	50,2	30,9	0,09	0,04
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	28,7	4,3	53,6	20,8	0,088	0,041
11 12 01	S11	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	35,1	29,2	59,3	54,1	0,123	0,085
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	35,1	29,6	59,3	54,4	0,123	0,085
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	35,4	28	59,5	52,9	0,123	0,086
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	37,7	34,3	61,4	58,5	0,121	0,082
11 14 12	S12	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	39,1	30,8	62,5	55,5	0,051	0,098
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	40,6	33,2	63,7	57,6	0,051	0,096
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	40,9	32,8	63,9	57,3	0,050	0,096
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	58,1	51,7	76,2	71,9	0,043	0,082
11 14 03	S13	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	39,9	35,9	63,2	59,9	0,056	0,084
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	39,9	36,4	63,2	60,4	0,056	0,083
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	40,1	35,9	63,3	59,9	0,056	0,084
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	51,1	43,4	71,5	65,9	0,051	0,079

Avec :

Cal : calage

Val : validation

r : coefficient de corrélation

NSE : Nash (%)

RMSE : Root mean square error ($m^3 \cdot s^{-1}$).

Les meilleurs résultats de simulation des débits par le meilleur modèle sont synthétisés au tableau IV.2

Tableau IV.2 : Résultats du meilleur modèle pluie-débit par RLM

Indice station	Station	Modèle	Période (mois)		r		NSE		RMSE	
			Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
S1	110101	M4	1983/84-2004/05	2005/06-2015/16	<u>0,66</u>	<u>0,70</u>	44	49,4	0,09	0,123
S2	010201	M4			<u>0,60</u>	<u>0,72</u>	36,4	<u>52,5</u>	0,08	0,091
S3	110301	M4			<u>0,65</u>	<u>0,71</u>	41,9	<u>50,7</u>	<u>0,083</u>	<u>0,079</u>
S4	110506	M4	1983/84-1999/00	1999/00-2007/08	<u>0,63</u>	<u>0,74</u>	39,9	<u>55,0</u>	0,084	0,099
S5	111002	M4	1983/84-2002/03	2003/04-2014/15	<u>0,69</u>	<u>0,64</u>	47,8	41,5	<u>0,109</u>	<u>0,059</u>
S6	111127	M4	1983/84-2004/05	2005/06-2015/16	<u>0,73</u>	<u>0,73</u>	<u>52,7</u>	<u>52,7</u>	0,048	0,063
S7	111106	M4			<u>0,74</u>	<u>0,70</u>	<u>54,3</u>	48,7	<u>0,076</u>	<u>0,061</u>
S8	111129	M4			<u>0,78</u>	<u>0,71</u>	<u>61,4</u>	<u>50,2</u>	0,081	0,081
S9	111208	M4			<u>0,74</u>	<u>0,61</u>	<u>55,4</u>	37,4	0,073	0,079
S10	111220	M4			<u>0,54</u>	0,31	28,7	4,3	<u>0,09</u>	<u>0,04</u>
S11	111201	M4			<u>0,61</u>	<u>0,58</u>	37,7	34,3	<u>0,121</u>	<u>0,082</u>
S12	111412	M4			<u>0,76</u>	<u>0,72</u>	<u>58,1</u>	<u>51,7</u>	0,043	0,082
S13	111403	M4			<u>0,71</u>	<u>0,66</u>	<u>51,1</u>	43,4	0,051	0,079

Avec :

Cal : calage , **Val** : validation , **r** : coefficient de corrélation

NSE : Nash (%) **RMSE** : Root mean square error ($m^3.s^{-1}$)

Les résultats du tableau IV.2 montrent que :

- L'ensemble des séries temporelles étudiées s'ajustent avec le modèle M4 qui tient compte de la combinaison des variables d'entrée ($P, ET_{0_{t-1}}, Q_{t-1}$).
- En référence avec les valeurs de « r », l'ensemble des stations donnent des résultats satisfaisants à meilleurs durant les périodes de calage et de validation. Le choix du seuil d'acceptabilité est basé sur les travaux de [Santhi et al. \(2001\)](#), [Moriassi et al. \(2007\)](#). Cependant, les trois (03) stations situées en amont d'oued Mekerra et l'autre station située sur l'oued Louza (110506) ont révélé une amélioration de la simulation durant la période de validation. Néanmoins, la qualité de la simulation décroît en période de validation au niveau de neuf (09) stations analysées tout en restant dans l'intervalle d'acceptabilité, ce qui influence la qualité du modèle. La simulation des débits de la station 11220 est à la limite du seuil de satisfaction au calage et non satisfaisant durant la validation, ce qui rend le modèle non performant au niveau de cette région.
- Le critère de NSE a donné des résultats moins encourageants par rapport au critère « r » dont trois (03) stations seulement franchissent légèrement le seuil de satisfaction durant le calage et la validation. Sept (7) autres ont décelé la non performane du modèle M4 qui est dû soit à la faiblesse du modèle dans la validation soit ce modèle M4 supposé meilleur est non adéquat durant les deux périodes d'apprentissage. Enfin, trois (03) stations ont montré une amélioration de la qualité de modélisation durant la période de validation.
- Les valeurs de RMSE varient entre 0,121 à 0,048 au calage et dans l'intervalle de 0,123 et 0,04 mais il n'y a pas de concordance entre les résultats de chaque critère pour la même station.

Sur la base des résultats discrets obtenus par la RLM et de la dégradation de la qualité de simulation en période de validation pour beaucoup de oueds étudiés de la Macta ainsi que la non-conformité des résultats des critères entre eux , la qualité du modèle RLM retenue reste ambiguë. La raison principale de ces résultats est que ce type

de modèles linéaires ne peuvent pas capturer l'effet stochastique des données hydrologiques en particulier la non linéarité de la relation pluie-débit.

IV.4.2 Résultats du modèle GR2M

Pour simuler le débit à un mois donné par ce modèle ; les variables utilisées comme entrées sont : P(mm), ETo (mm) sous forme de lame d'eau écoulée en mm. Les paramètres X_1 et X_2 du modèle ont été déterminés automatiquement par optimisation en utilisant l'option Solveur intégrée dans les fonctionnalités de Microsoft office Excel. Cette optimisation des paramètres conduit automatiquement au meilleur NSE possible.

Les résultats de simulation des débits par le modèle GR2M durant les deux (02) phases de calage et de validation sont présentés au tableau IV.3.

Remarque : Vu les résultats non satisfaisants du critère NSE, le calcul des critères de « r » et RMSE n'est pas effectué.

Tableau IV.3 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle GR2M

Indice station	Code Station	Période (mois)		Paramètres		NSE(Q)(%)		NSE \sqrt{Q} (%)	
		Cal.	Val.	X ₁	X ₂	Cal.	Val.	Cal.	Val.
S1	110101	1983/84-2004/05	2005/06-2015/16	1450	0,82	-7,9	-16562	-11,8	-1987,5
S2	010201			<u>0</u>	<u>0,07</u>	-15,9	12,1	-99,7	-14,3
S3	110301			1481	0,86	-14,8	-1284	-48,5	-595
S4	110506	1983/84-1999/00	1999/00-2007/08	<u>0</u>	<u>0,05</u>	3,4	10	13,8	30,1
S5	111002	1983/84-2002/03	2003/04-2014/15	1974	0,95	-10,7	-9206	-17,8	-1227
S6	111127	1983/84-2004/05	2005/06-2015/16	<u>4656</u>	0,35	<u>-43,7</u>	-12532	-179,3	-2928
S7	111106			2201	0,76	-19,2	-19419	-102,7	-4265
S8	111129			1988	0,81	-12,6	-4616	-27,2	-952
S9	111208			3412	0,48	9,0	-2263	11,3	-485
S10	111220			<u>4012</u>	0,32	7,5	-35728	15,5	-1922
S11	111201			<u>3361</u>	0,63	-7,4	-4520	-7,7	-663
S12	111412			74,2	<u>0,05</u>	<u>69,7</u>	<u>31,7</u>	<u>44,2</u>	<u>35</u>
S13	111403			<u>3736</u>	0,25	29,1	-2928	12,7	-557

Avec :

Cal. : Calage (mois) ;

Val. : Validation (mois) ;

X₁ : Capacité du réservoir de production (mm) ;

X₂ : Paramètre des échanges latéraux du bassin avec les autres bassins versants,

NSE(Q) : Nash des valeurs de Q (%) ;

NSE \sqrt{Q} : Nash des racines des valeurs de Q (%).

IV.4.2.1 Résultats du calage

La période de calage permet de définir les deux (02) paramètres du modèle ou les capacités des réservoirs. En effet, la période d'étude diffère d'une station à une autre mais les séries débutent toutes de septembre 1983 avec une période de mise en route de 12 mois. Les résultats du calage du modèle GR2M sont évalués par rapport aux valeurs de coefficient de Nash calculés entre les valeurs réelles observées et celles simulées calculés automatiquement par optimisation dans le tableur Excel du modèle.

D'après les résultats du calage issus du tableau IV.3, il a été constaté que :

- Les valeurs du paramètre X_1 respectent les bornes de l'intervalle de confiance arrêté par Perrin et al. (2007) décrit dans la partie bibliographique au niveau des données de six (06) stations hydrométriques seulement. Le reste des stations (07) sont en dehors de cet intervalle. Alors que pour la valeur de X_2 , est positive pour l'ensemble des stations ce qui indique qu'il y a un apport d'eau latérale des bassins voisins Perrin et al., (2007). La valeur de NSE est négative pour la majorité (08) des stations. Par ailleurs pour quatre (04) stations, la valeur du NSE est positive mais demeurent loin du seuil de satisfaction. Cependant, La seule station 111412 où le NSE a dépassé le seuil de satisfaction (70% environ) mais les valeurs des paramètres x_1 et x_2 sont en dehors de l'intervalle accepté. Cela signifie que le modèle GR2M permet de fournir la structure et les paramètres nécessaires pour quantifier les composantes hydrologiques des bassins versants et reproduire le régime naturel d'écoulement. Ceci peut s'expliquer par la surface de drainage qui est petite ($200 \text{ K}^{\text{m}^2}$) et le court oued qui drain cette surface ce qui donne lieu à un temps de concentration faible ce qui réduit les pertes par infiltration et par évaporation.
- Les résultats de $NSE\sqrt{Q}$ sont négatives pour la majorité des stations et demeurent non acceptables.

IV.4.2.2 Résultats de validation

Durant la phase de validation, les débits sont simulés directement en utilisant les valeurs des paramètres X_1 et X_2 obtenus lors du calage sans procéder à leurs optimisation dans le but de voir la fiabilité des paramètres du modèle pour reproduire les débits naturels d'une autre période non reconnu préalablement et avec quel rendement.

Les valeurs de NSE mentionnées au tableau IV.3 montrent une détérioration de la qualité de simulation par le GR2M pour l'ensemble des stations étudiées dont les valeurs sont négatives. Au niveau des données de la station de Ghriss (111412), la valeur du NSE a diminué de 69,7% à 31,7% ce qui loin du seuil d'acceptation durant la validation. En conséquence, la qualité du modèle GR2M a été influencée négativement.

Vue les résultats de NSE durant les deux périodes et de validation on peut conclure que le modèle GR2M ne permet en aucun cas simuler et reproduire les débits observés des oueds de la Macta durant la période allant de 1983/84 jusqu'à 2015/16 qui est dû principalement au climat semi-aride reconnu et la complexité des phénomènes hydrologiques.

IV.4.2.3 Comparaison des résultats avec des travaux similaires

En faisant comparaison de l'application du GR2M au bassin versant de la Macta par d'autres recherches antérieures, nous trouvons que :

✓ [Zamoum et Souag-Gamane \(2019\)](#) a appliqué le modèle sur l'ensemble de l'Algérie septentrionale a montré que ce modèle s'adapte mieux au climat humide et subhumide alors qu'il n'est pas adéquat au climat semi-aride. Or seulement 13% de la région semi-aride algérienne montre une performance de ce modèle alors que 86% environ est non adéquate dont le bassin versant de la Macta fait partie, ce qui confirme nos résultats.

✓ [Hadour et al.\(2020\)](#) a appliqué le modèle GR2M sur quelques bassins versant du Nord-ouest de l'Algérie septentrionale (Tafna, Cheliff, Macta) durant la période (1961-2005) pour étudier la sensibilité des paramètres du modèle au changements climatiques futures. Les résultats ont montré une qualité moyenne du modèle dans la

simulation des débits de l'Oued Mekerra amont au droit de la station de Hacaibadont $NSE\sqrt{Q}$ est de 62% au calage et de 59% durant la validation.

IV.4.3 Résultats du modèle RNA

Le RNA utilisé dans ce travail est de type « perceptron multicouche » avec une seule couche cachée intermédiaire. L'utilisation d'une seule cachée est suffisant et capable d'approximer les fonctions non linéaires (i.e relation pluie-débit) à un degré de précision pré (Hornik et al., 1989 ; Dawson et Wilby, 1998). La fonction de transfert est de type tangente hyperbolique qui est continue, exponentielle et non linéaire (Dogan et al., 2008 ; Nourani et al., 2015). L'apprentissage utilisé est de type supervisé avec l'algorithme de rétro propagation de l'erreur (back propagation), variante de Livenberg-Marquardt en raison de sa particularité de s'adapter à la forme de la surface d'erreur et l'avantage de converger rapidement (Hsu et al., 1995; Sharifi et al., 2013 ;Abbaet Elkiran, 2017).

Avant de commencer l'apprentissage par ce modèle, toutes les variables ont été normalisées (Eq. IV.3). La normalisation des données permet de s'affranchir des différences de « normes » des variables. En effet, des variables avec des grandes valeurs peuvent avoir une plus grande influence que des variables avec des petites valeurs, sans pour autant être plus significatives. Dans notre étude la normalisation est effectuée par application de l'équation IV.3 dans le but de réduire la redondance des données et sans cette normalisation les grandes valeurs des variables d'entrées exigent de faibles facteurs de pondération (Dawson et Wilby, 1998 ;Abba et Elkiran, 2017).

$$X'_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (IV.3)$$

Avec :

X'_i : Valeur normalisée de la variable,

X_i : Valeur non normalisée,

X_{min} , X_{max} sont la valeur minimale et maximale dans la série des données respectivement.

Il est intéressant de signaler qu'on va jouer sur plusieurs paramètres ; le nombre des variables entrées (inputs), le nombre de neurones dans la couche cachée afin de mettre en évidence la meilleure structure neuronale (Figure IV.2). A cet effet, quatre (04) modèles neuronaux ont été proposés qui sont présentés en équation IV.2.

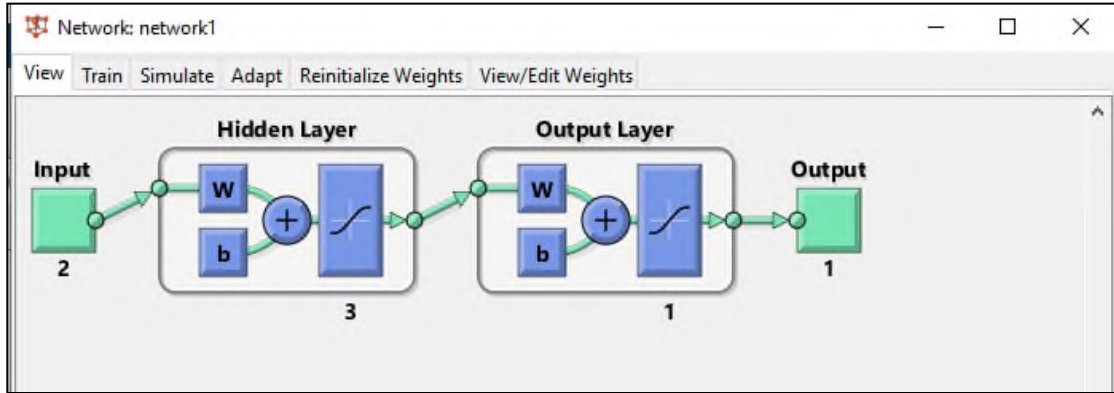


Figure IV.2 : Exemple de structure du réseau neuronal utilisé dans l'apprentissage

Les résultats de simulation des débits liquides par les RNA est établie pour chaque combinaison dont les résultats sont présentés au tableau IV.4

Tableau IV.4 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle RNA

Station	code	Modèle	Paramètres	NSE		r		RMSE	
				Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
11 01 01	S1	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	87,1	90,2	0,93	0,95	0,043	0,054
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	82,2	86,1	0,91	0,93	0,050	0,065
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	87,0	90,0	0,93	0,95	0,043	0,055
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	88,4	76,2	0,94	0,87	0,041	0,084
11 102 01	S2	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	78	90,4	0,88	0,95	0,047	0,041
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	81,7	85,3	0,90	0,92	0,043	0,051
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	78	86,4	0,88	0,93	0,047	0,049
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	84,1	89,6	0,92	0,95	0,040	0,043
11 03 01	S3	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	75,4	74,8	0,87	0,86	0,054	0,057
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	75,5	80,4	0,87	0,90	0,054	0,050
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	29,7	50,9	0,54	0,71	0,092	0,079
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	82,1	85,8	0,91	0,93	0,046	0,043
11 05 06	S4	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	74	82,6	0,86	0,91	0,055	0,061
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	71,3	84,3	0,84	0,92	0,058	0,058
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	69,4	83,8	0,83	0,92	0,060	0,059
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	76,7	86,3	0,88	0,93	0,052	0,054

Tableau IV.4 : Résultats de la modélisation pluie-débit par le modèle RNA (suite)

Station	Code	Modèle	Paramètres	NSE		r		RMSE	
				Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
11 10 03	S5	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	71,2	67,5	0,84	0,82	0,081	0,044
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	73,9	68,3	0,86	0,83	0,077	0,043
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	73,2	76	0,86	0,87	0,078	0,038
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	88,5	57,2	0,94	0,76	0,051	0,050
11 11 27	S6	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	74,1	90,4	0,86	0,95	0,035	0,029
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	65	88,8	0,81	0,94	0,041	0,031
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	68,8	89,5	0,83	0,95	0,039	0,030
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	81,8	81,9	0,90	0,90	0,030	0,039
11 11 06	S7	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	83,6	87,4	0,91	0,93	0,046	0,030
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	85,8	87,7	0,93	0,94	0,042	0,030
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	83	87,1	0,91	0,93	0,047	0,031
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	86,9	89,6	0,93	0,95	0,041	0,028
11 11 29	S8	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	76,2	30,9	0,87	0,56	0,064	0,095
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	79,4	23,9	0,89	0,49	0,059	0,100
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	73,5	37,3	0,86	0,61	0,067	0,090
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	84,1	54,3	0,92	0,74	0,052	0,077
11 12 08	S9	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	76,3	48,7	0,87	0,70	0,054	0,071
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	28,6	26,4	0,53	0,51	0,093	0,085
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	84,9	52	0,92	0,72	0,043	0,069
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	83,9	51,7	0,92	0,72	0,044	0,069
11 12 20	S10	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	-18,7	-12,3	/	/	0,114	0,045
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	70,6	42,9	0,84	0,65	0,057	0,032
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	72,7	47,5	0,85	0,69	0,055	0,031
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	73,6	-17,2	0,86	/	0,054	0,046
11 12 01	S11	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	65,6	74,9	0,81	0,86	0,089	0,051
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	-36,9	-38	/	/	0,178	0,12
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	69,4	76,1	0,83	0,87	0,084	0,05
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	66,1	77,2	0,81	0,88	0,089	0,049
11 14 12	S12	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	86,3	83,2	0,93	0,91	0,024	0,029
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	73,5	59,7	0,86	0,77	0,034	0,044
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	75	71,4	0,87	0,84	0,033	0,037
		M4	$P_t, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	85,6	76,7	0,92	0,88	0,025	0,034
11 14 03	S13	M1	$ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	89,9	79,3	0,95	0,90	0,023	0,048
		M2	$P_{t-1}, ET0_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t$	81,6	75,1	0,90	0,87	0,031	0,052
		M3	P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_t	90,5	79,3	0,95	0,89	0,022	0,048

Avec :

Cal : calage **Val** : validation **NSE** : Nash (%)

r : coefficient de corrélation , **RMSE** : Root mean square error ($m^3.s^{-1}$)

Les meilleurs résultats de simulation des débits par le meilleur modèle sont synthétisés au tableau IV.5

Tableau IV.5 : Résultats du meilleur modèle pluie-débit par RNA

Indice station	Code Station	Modèle	Période (mois)		r		NSE (%)		RMSE	
			Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
S1	110101	M3	1983/84-2004/05	2005/06-2015/16	<u>0,93</u>	<u>0,95</u>	<u>0,87</u>	<u>0,90</u>	<u>0,043</u>	<u>0,055</u>
S2	010201	M4			<u>0,92</u>	<u>0,95</u>	<u>0,84</u>	<u>0,90</u>	<u>0,043</u>	<u>0,040</u>
S3	110301	M4			<u>0,91</u>	<u>0,93</u>	<u>0,82</u>	<u>0,86</u>	<u>0,046</u>	<u>0,043</u>
S4	110506	M4	1983/84-1998/99	1999/00-2007/08	<u>0,88</u>	<u>0,93</u>	<u>0,77</u>	<u>0,86</u>	<u>0,052</u>	<u>0,054</u>
S5	111002	M4	1983/84-2002/03	2003/04-2014/15	0,94	0,76	0,88	0,57	0,051	0,050
S6	111127	M4	1983/84-2004/05	2005/06-2015/16	<u>0,90</u>	<u>0,90</u>	0,82	0,82	0,030	0,039
S7	111106	M4			<u>0,93</u>	<u>0,95</u>	<u>0,87</u>	<u>0,90</u>	<u>0,041</u>	<u>0,028</u>
S8	111129	M4			0,92	0,74	0,84	0,54	0,052	0,077
S9	111208	M4			0,92	0,72	0,84	0,52	0,044	0,069
S10	111220	M3			0,85	0,69	0,73	0,47	0,055	0,031
S11	111201	M4			<u>0,81</u>	<u>0,88</u>	<u>0,66</u>	<u>0,77</u>	<u>0,089</u>	<u>0,049</u>
S12	111412	M1			0,93	0,91	0,86	0,83	0,024	0,029
S13	111403	M3			0,95	0,89	0,90	0,79	0,022	0,048

Avec :

Cal : calage **Val** : validation **r** : coefficient de corrélation

NSE : Nash (%) **RMSE** : Root mean square error ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Les résultats du tableau IV.5 montrent que :

- Neuf (09) séries chronologiques de débit s'ajustent bien avec le modèle M4. Ce modèle est fonction des variables d'entrée (P_t, ETO_{t-1}, Q_{t-1}). Les modèles M1 et M3 avec les combinaisons $Q_t = f(ETO_{t-1}, Q_{t-1})$ et $Q_t = f(P_{t-1}, Q_{t-1})$ respectivement sont performants aux restes des séries temporelles (i.e Deux (02) stations pour chaque modèle).
- Ces modèles ont montré les meilleurs critères de performance lors des phases de calage et de validation.
- Durant la période d'apprentissage, les critères statistiques (r, NSE) indiquent des valeurs très élevées (r varie entre 0,81 et 0,95 ; NSE oscille entre 66% et 91%).
- Sept (07) stations ont montré une amélioration des performances en phase de validation par les critères statistiques de r (jusqu'à 95%) et NSE (jusqu'à 90%). Néanmoins, les résultats se dégradent de façon assez significative au niveau des données de six (06) séries temporelles de débit tout en restant dans l'intervalle d'acceptabilité pour le critère NSE à l'exception de la station 111220 (NSE <50%). Tandis que le critère de r affiche de bons résultats dans l'intervalle 0,69 à 0,91.

IV.4.4 Comparaison des résultats des trois (03) modèles

En comparant les résultats issus des trois (03) modèles RLM, GR2M et RNA nous pouvons tirer une classification de ces modèles selon leurs performances. Le modèle à base de RNA est le plus performant pour reproduire les débits liquides des oueds étudiés de la Macta suivi du modèle à base de RLM. Alors que le modèle GR2M n'est pas adéquat.

Les graphes de superposition des courbes de débits observées des oueds étudiés de la Macta et celles simulées par les deux (02) modèles sont présentés dans les figures IV.3 à la figure IV.28 ci-dessous. La courbe du modèle GR2M a été écartée à cause de leurs résultats médiocres qui défigurent l'allure générale des graphes.

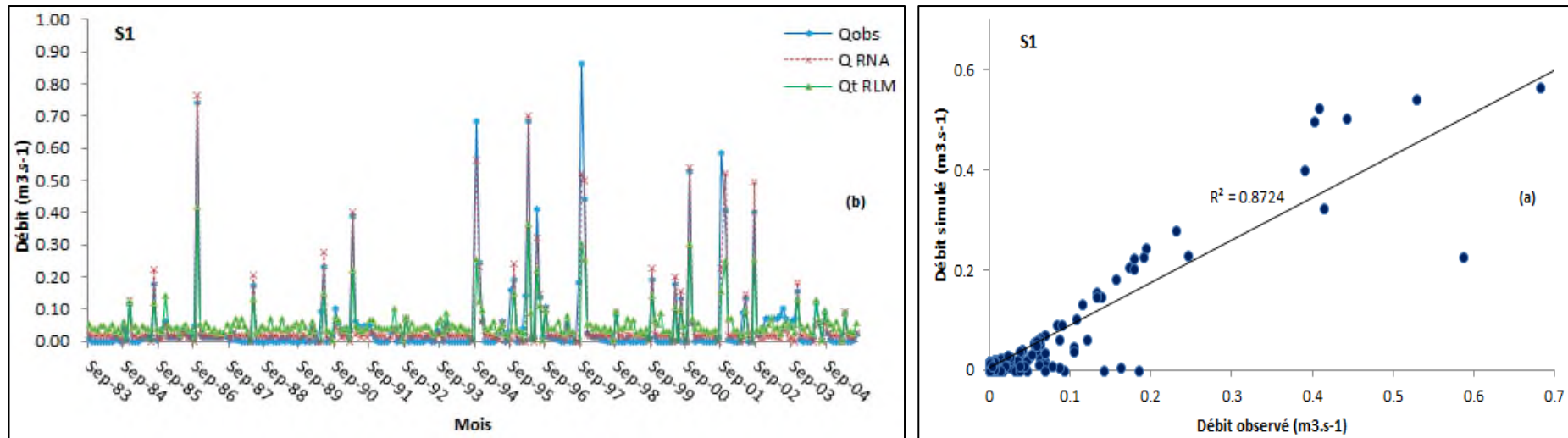


Figure IV.3 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S1 (a), Visualisation de la phase calage (b).

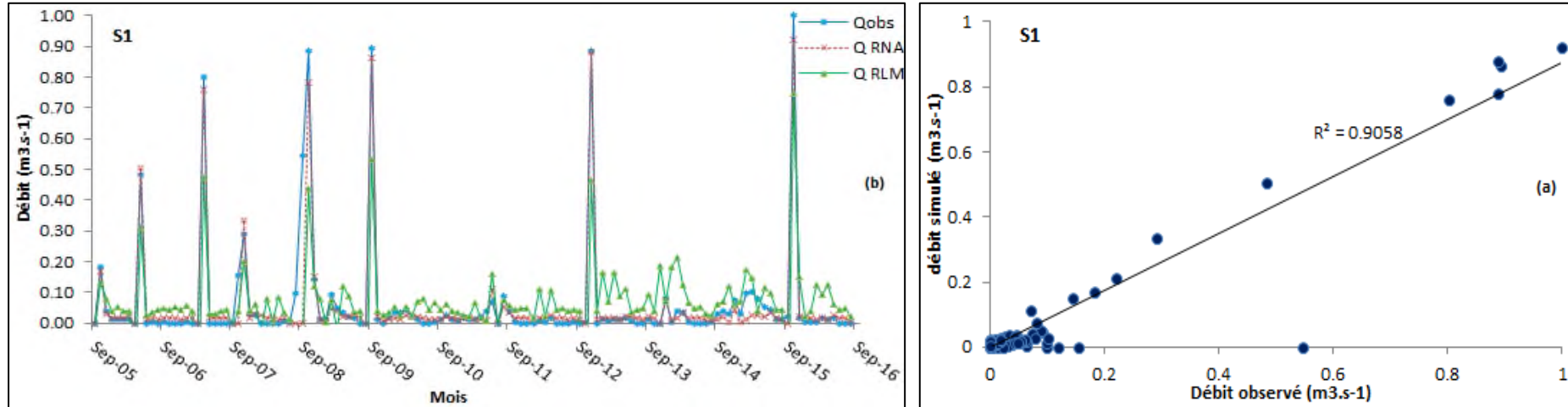


Figure IV.4 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S1 (a), Visualisation de la phase validation (b)

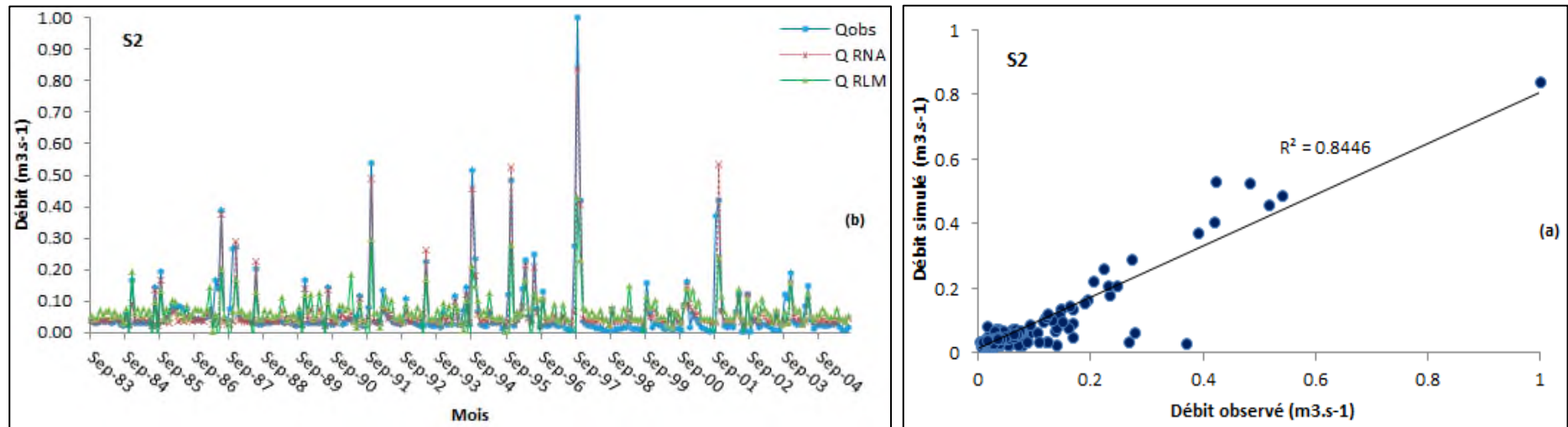


Figure IV.5 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S2 (a) Visualisation de la phase calage (b)

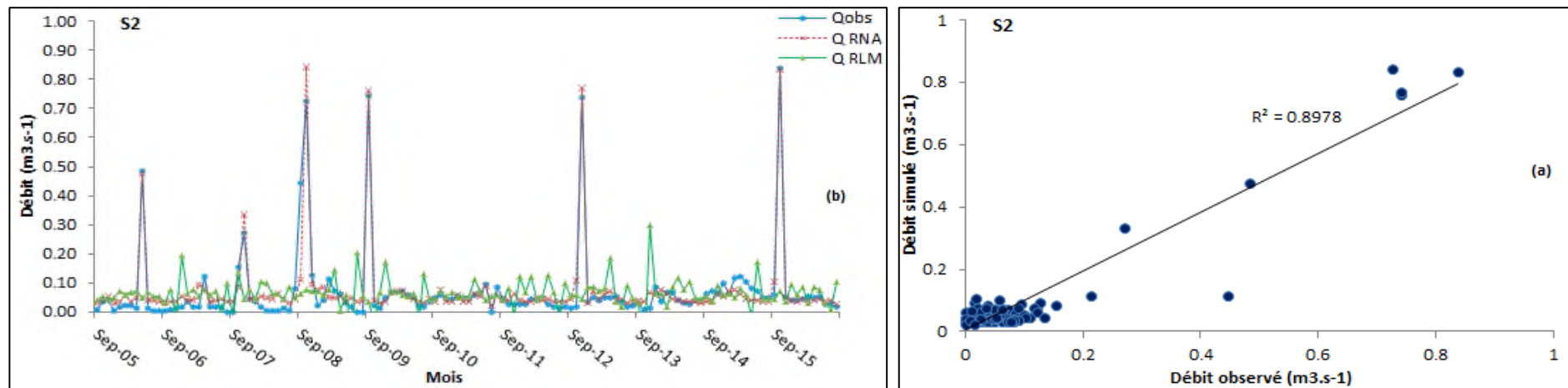


Figure IV.6 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S2 (a), Visualisation de la phase validation (b)

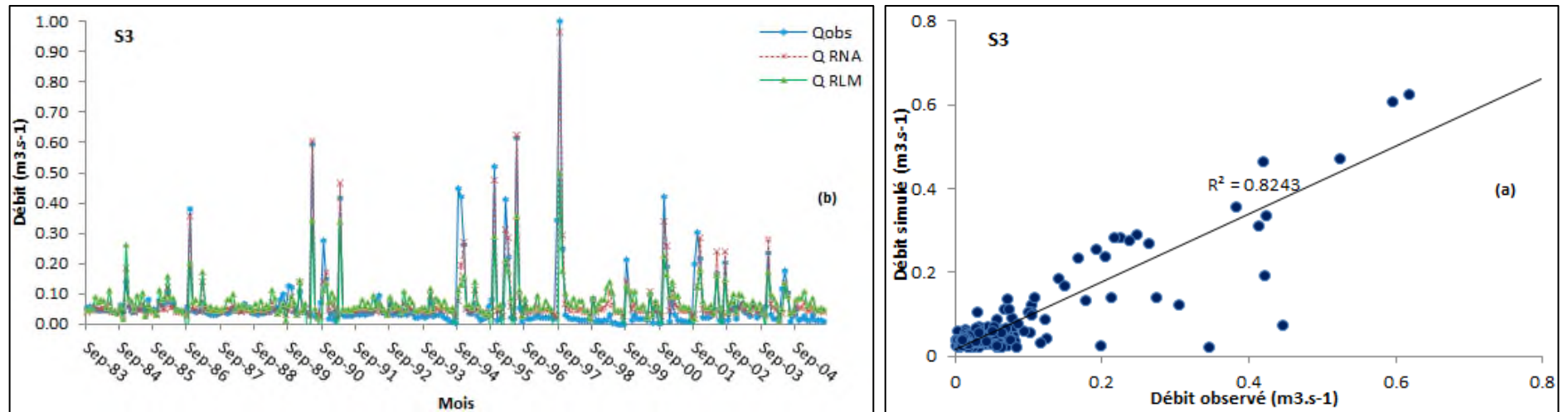


Figure IV.7 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S3 (a), Visualisation de la phase calage (b)

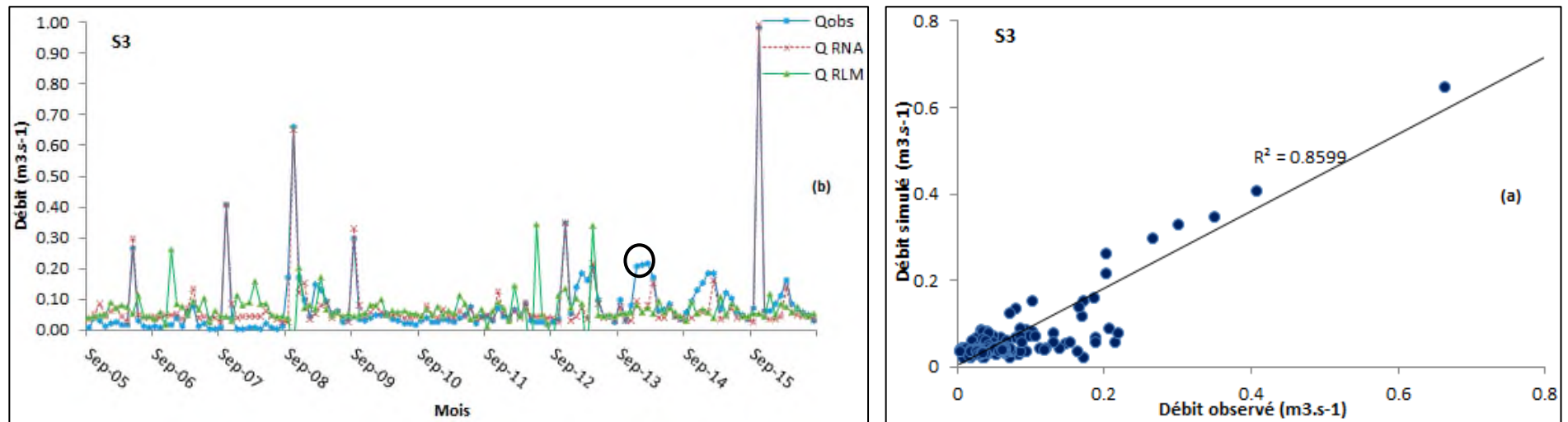


Figure IV.8 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S3 (a), Visualisation de la phase validation (b)

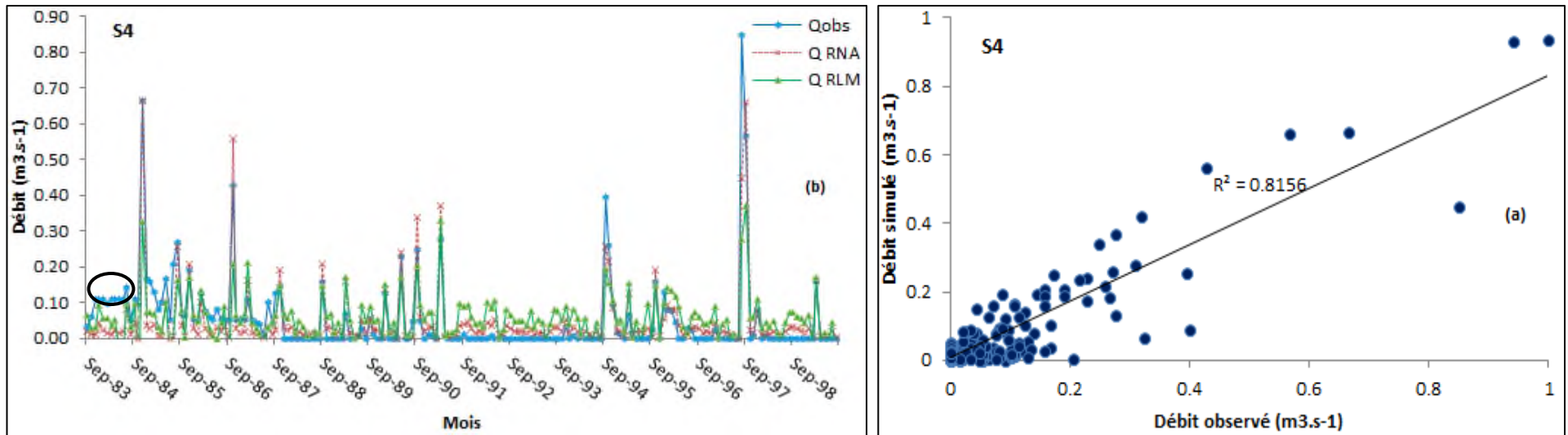


Figure IV.9 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S4 (a) , Visualisation de la phase (b)

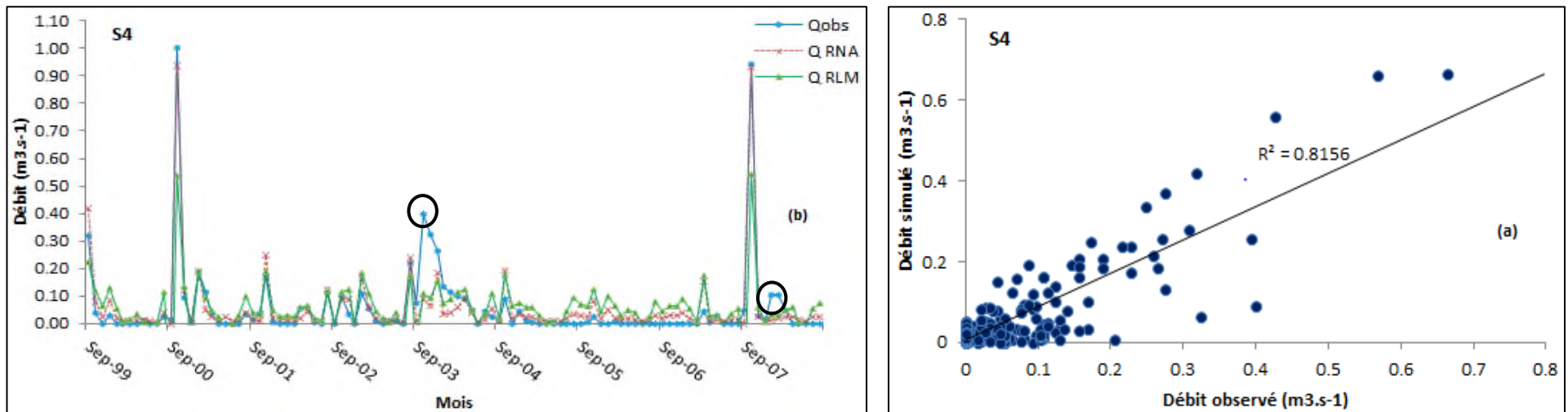


Figure IV.10 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S4 (a) , Visualisation de la phase validation (b)

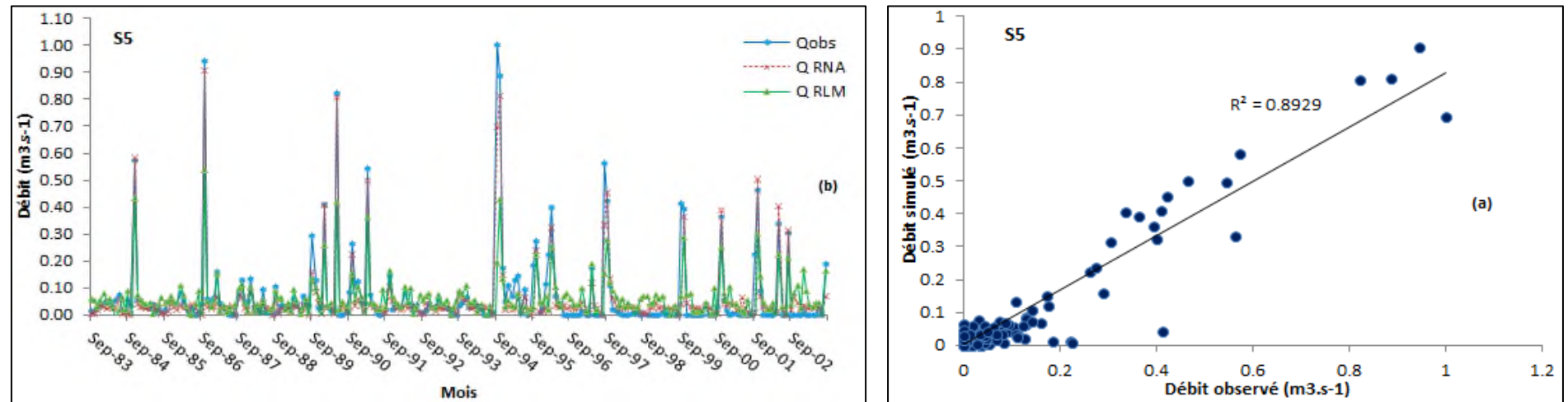


Figure IV.11 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S5 (a) , Visualisation de la phase calage

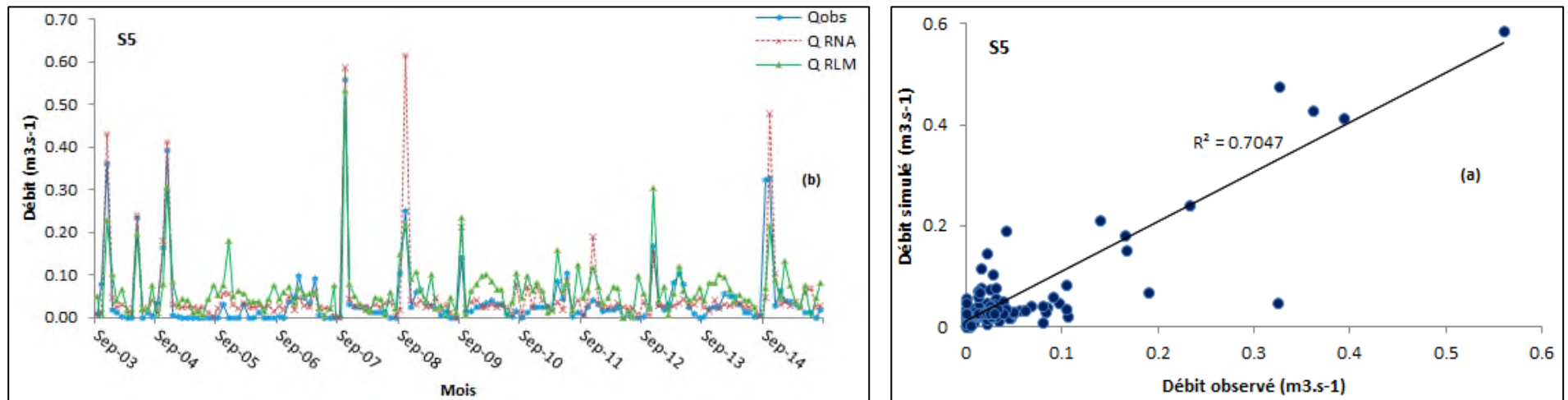


Figure IV.12 :(a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S5,(b) : Visualisation de la phase validation

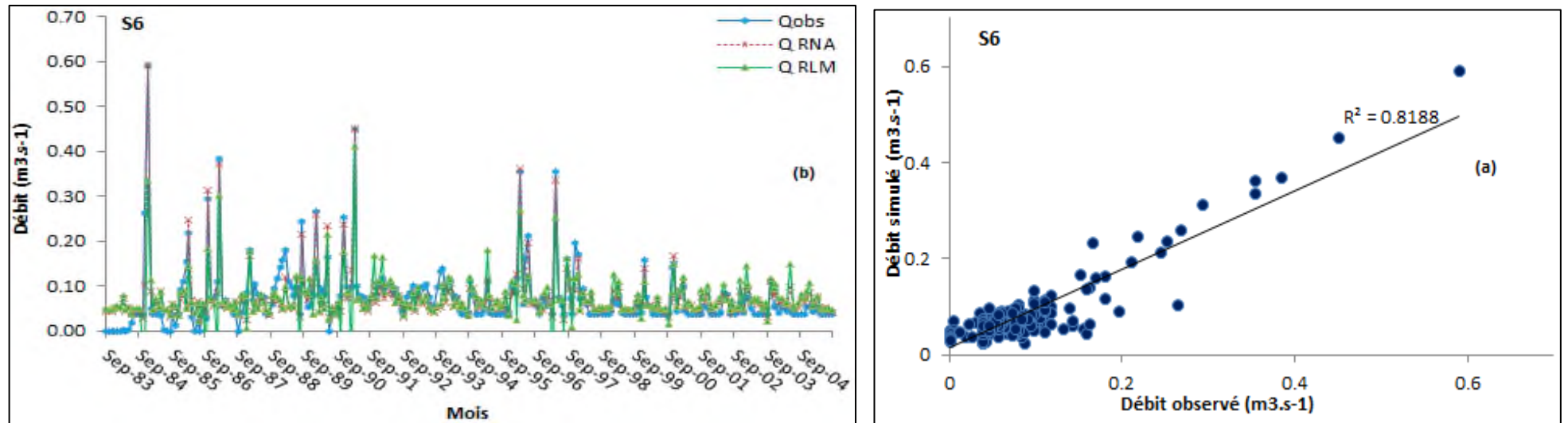


Figure IV.13 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S6, (b) : Visualisation de la phase calage

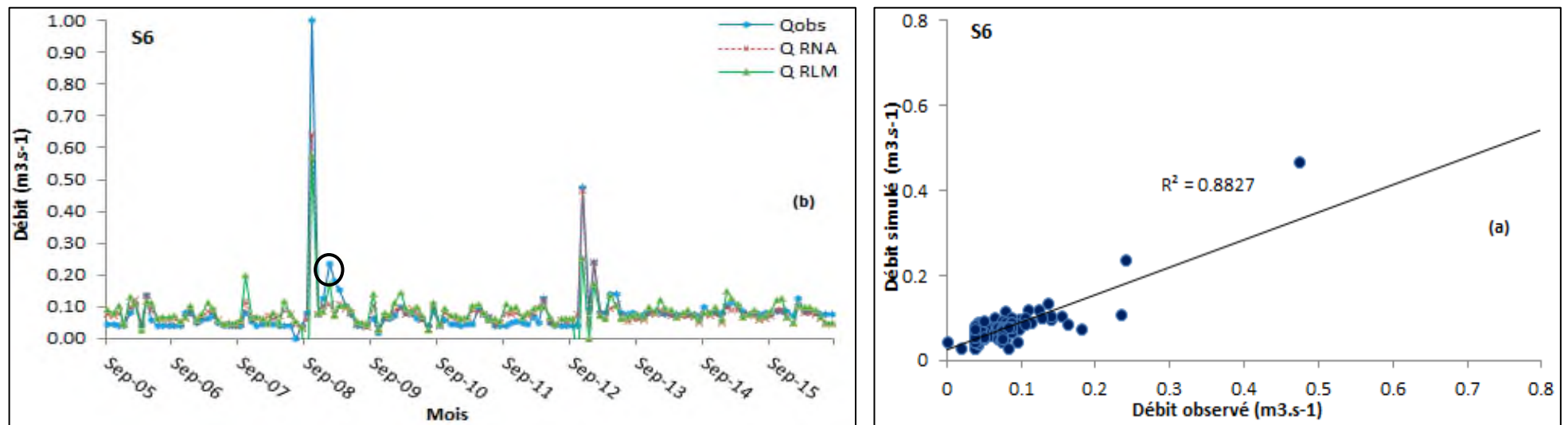


Figure IV.14 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S6, (b) : Visualisation de la phase validation

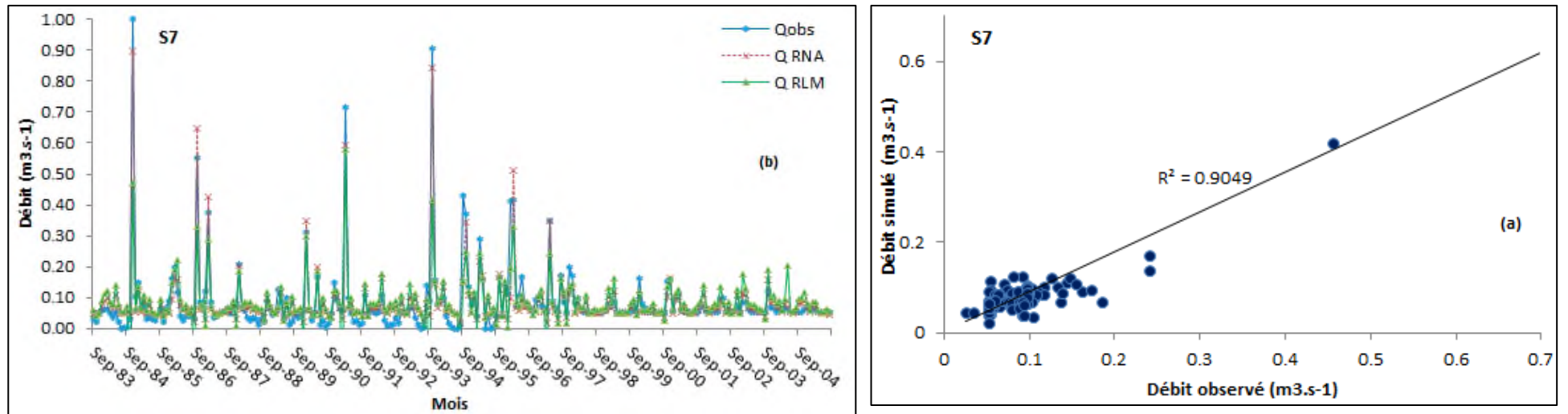


Figure IV.15 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S7 (a) , Visualisation de la phase calage (b)

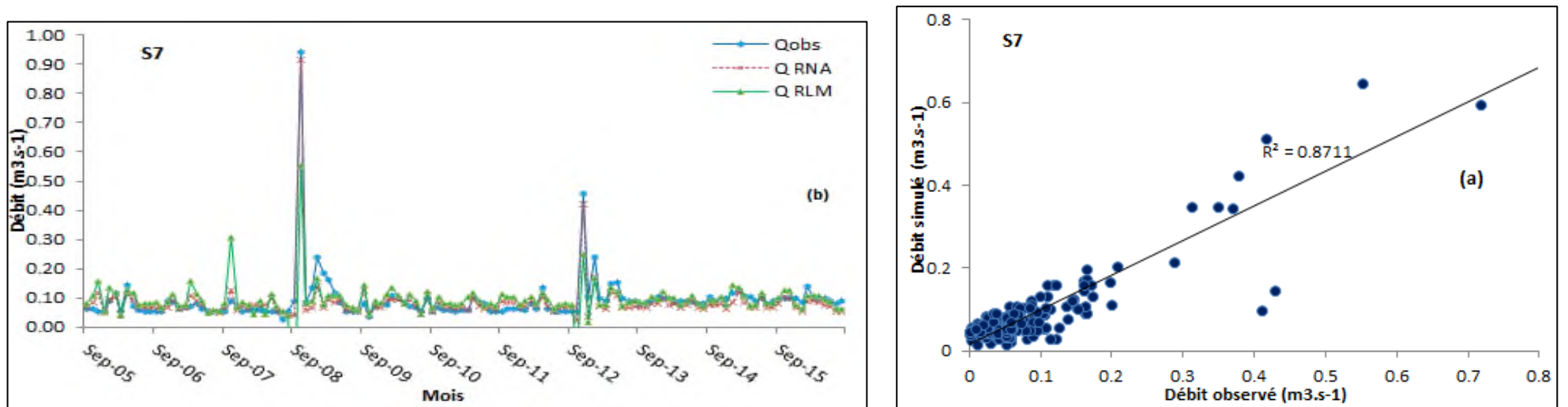


Figure IV.16 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S7 (a) , Visualisation de la phase validation (b)

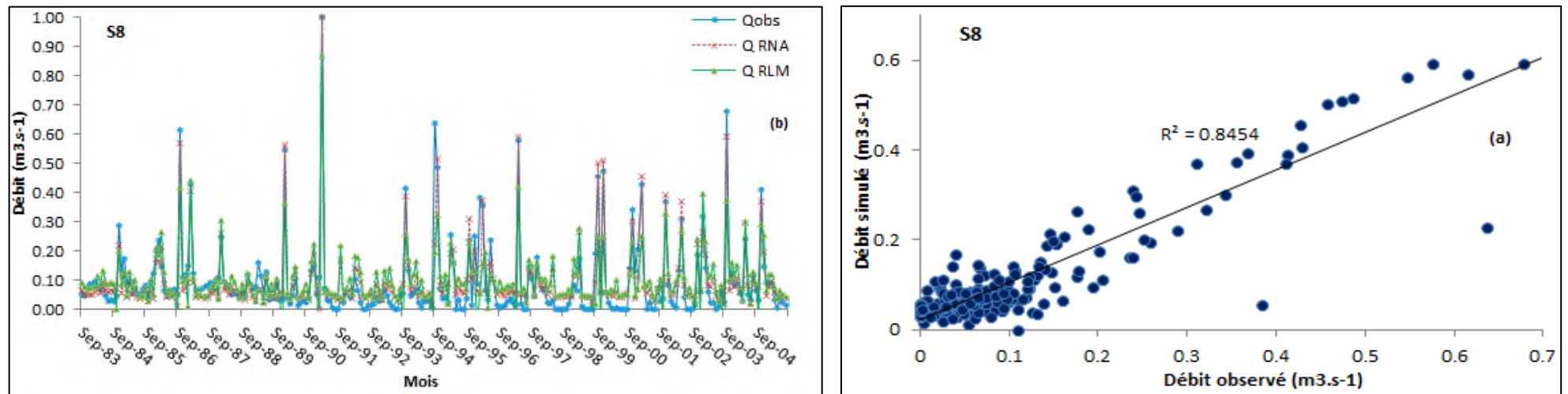


Figure IV.17 : (a) : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S8 (a), Visualisation de la phase calage (b)

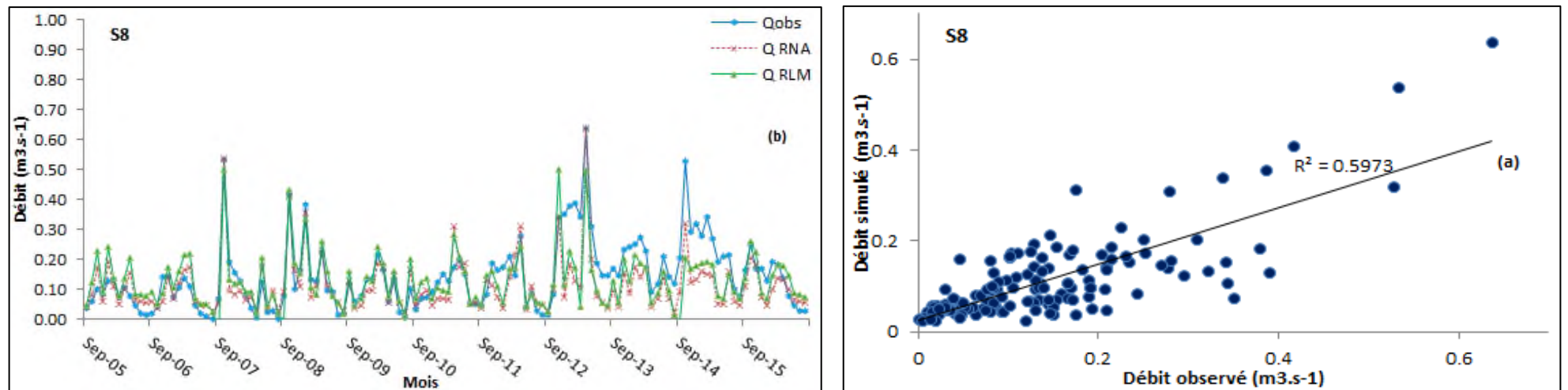


Figure IV.18 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S8 (a) , Visualisation de la phase validation (b)

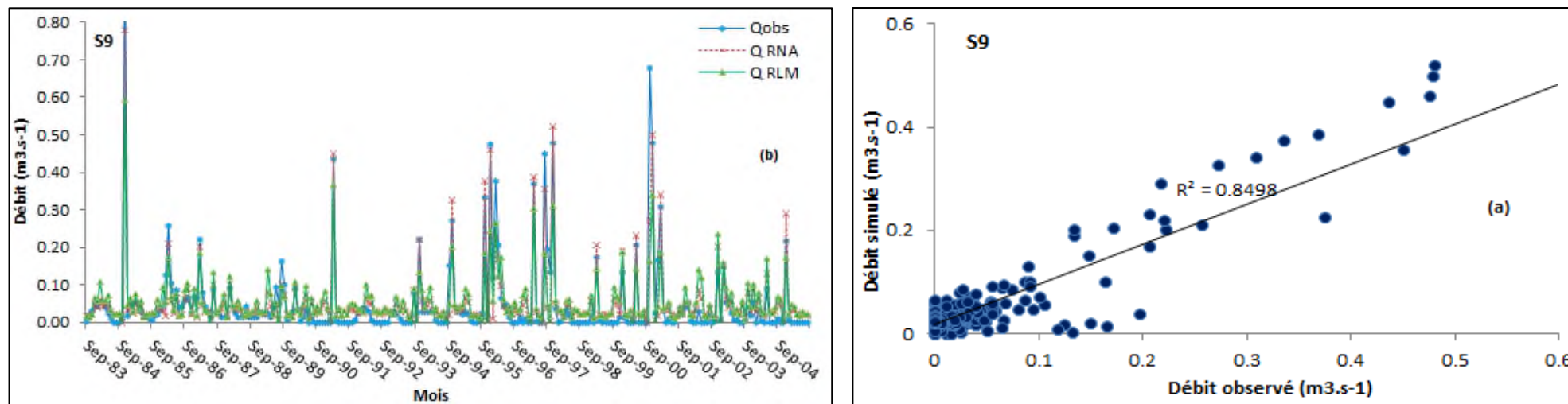


Figure IV.19 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S9 (a), Visualisation de la phase calage (b)

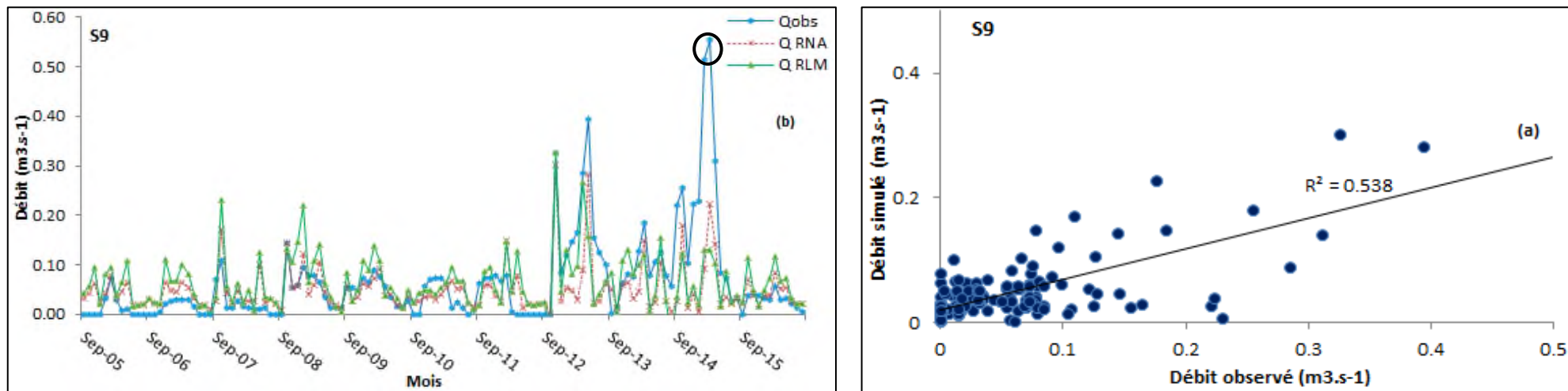


Figure IV.20 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S9 (a), Visualisation de la phase validation (b)

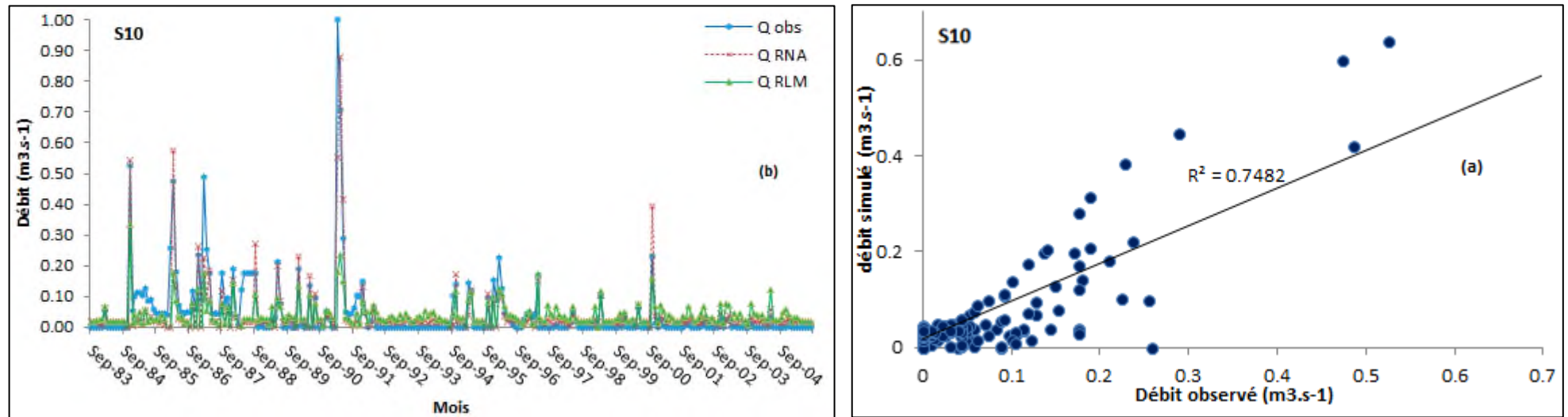


Figure IV.21 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S10 (a), Visualisation de la phase calage (b)

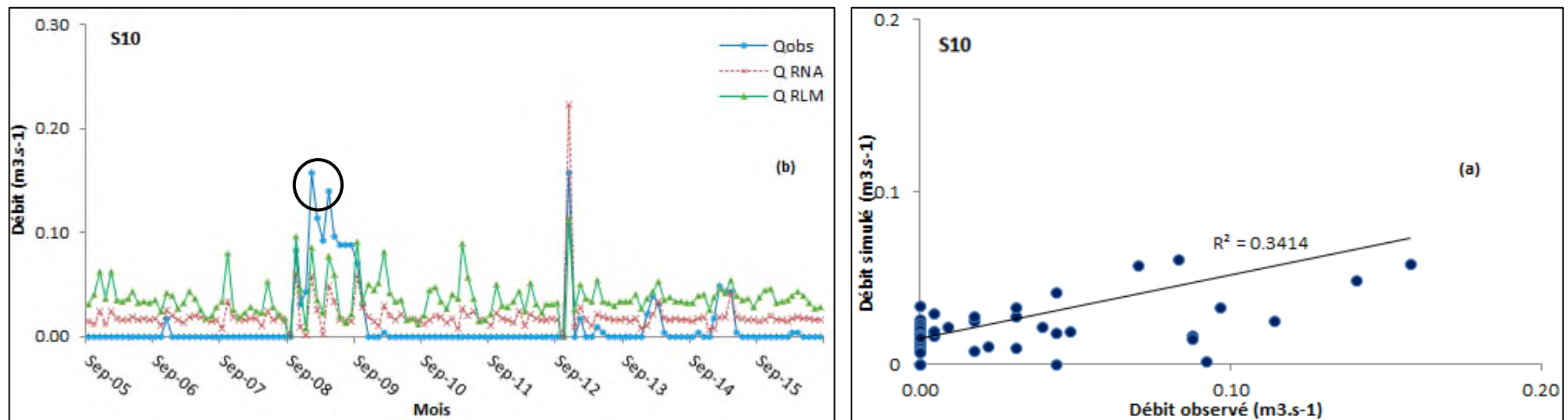


Figure IV.22 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S10 (a) , Visualisation de la phase validation (b)

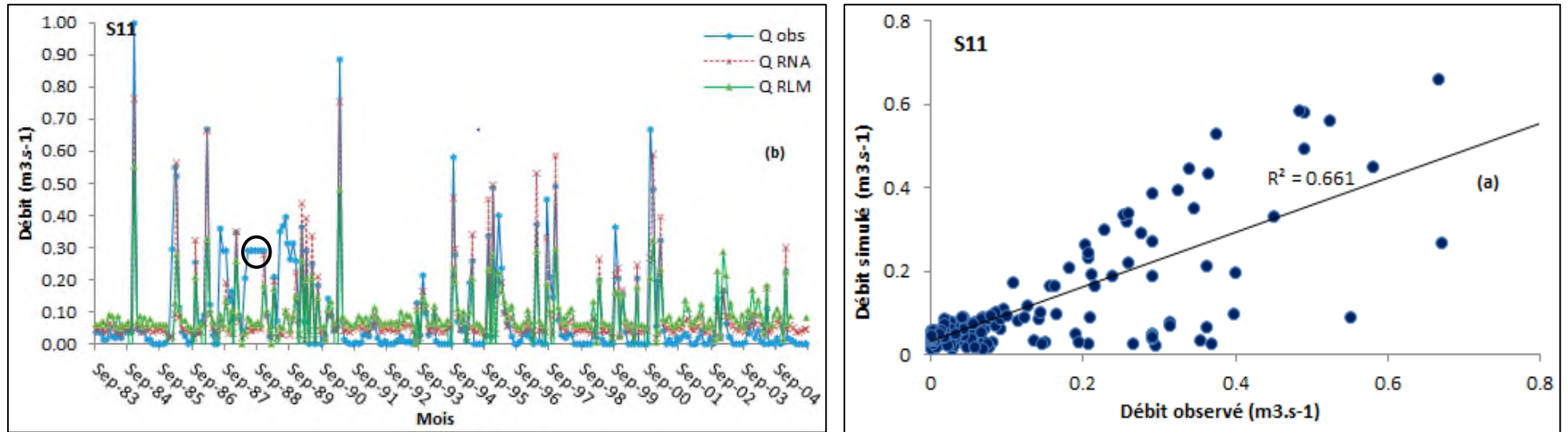


Figure IV.23 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S11 (a) , Visualisation de la phase calage (b)

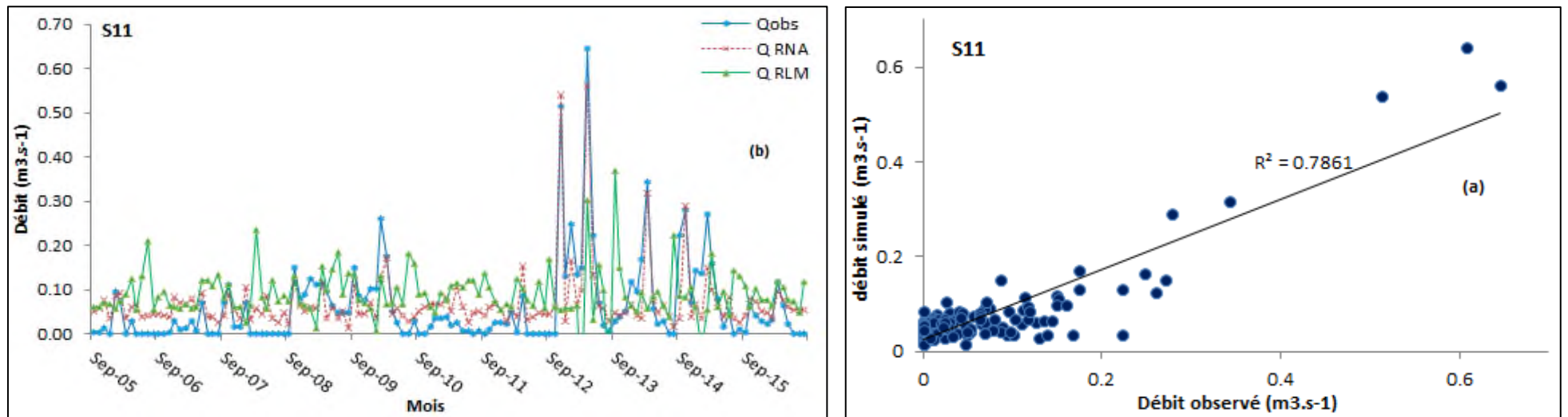


Figure IV.24 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S11 (a) , Visualisation de la phase validation (b)

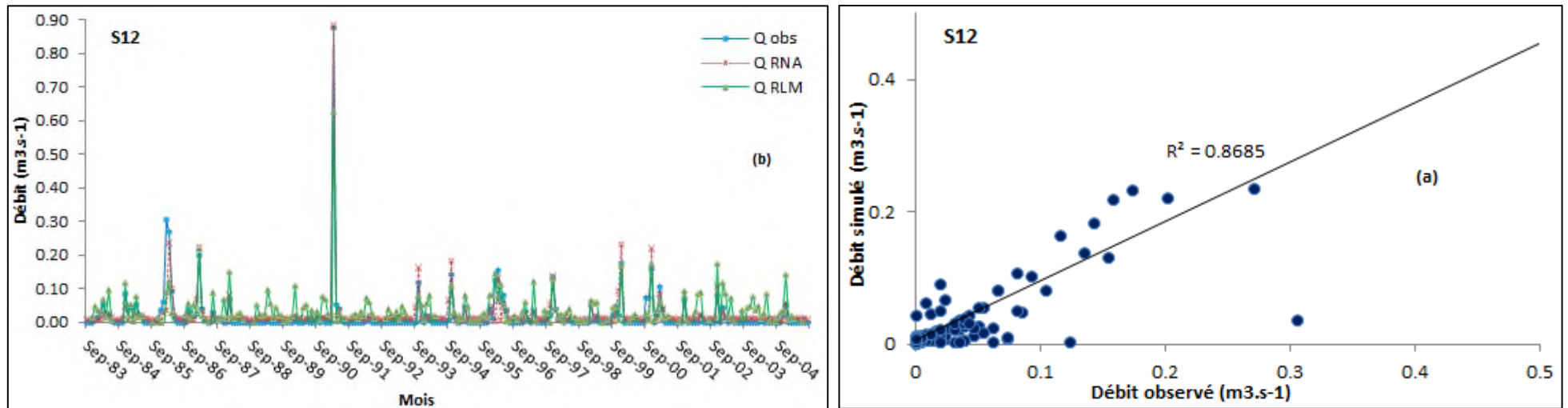


Figure IV.25 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S12 (a), Visualisation de la phase calage (b)

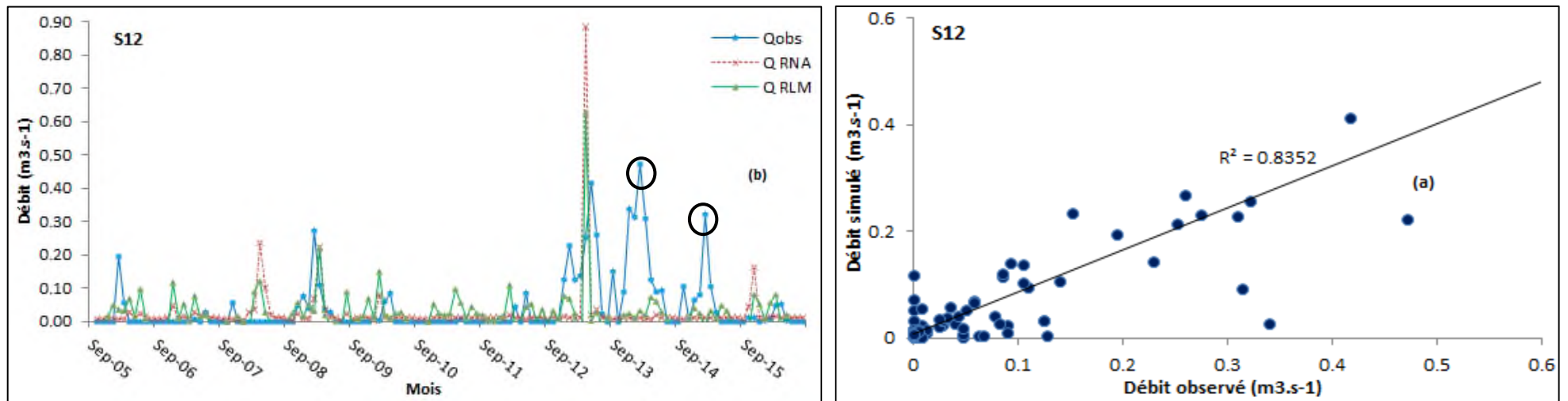


Figure IV.26 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S12 (a), Visualisation de la phase validation (b)

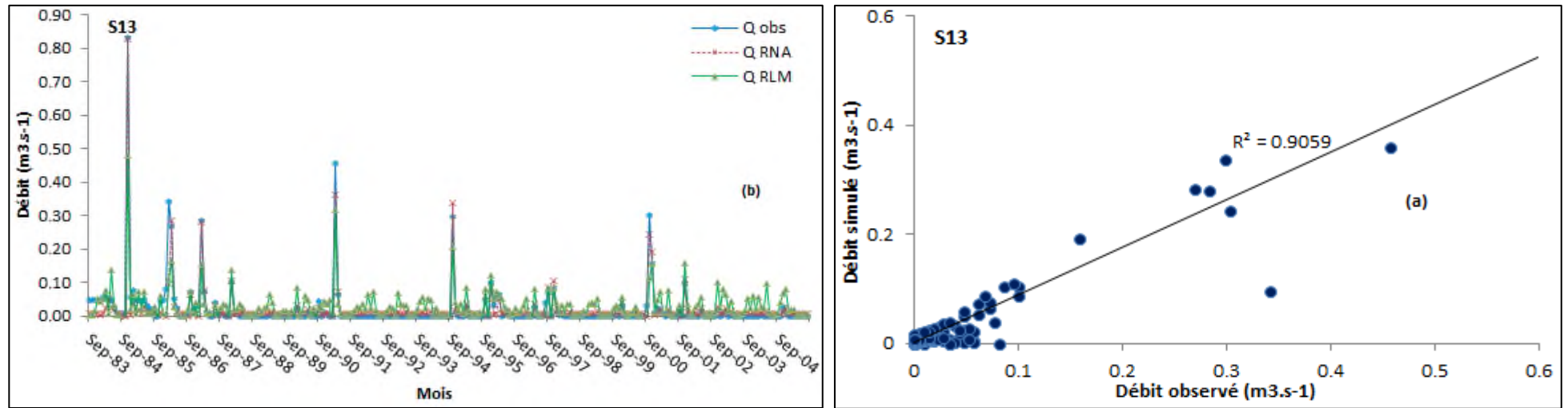


Figure IV.27 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S13 (a) , Visualisation de la phase calage (b)

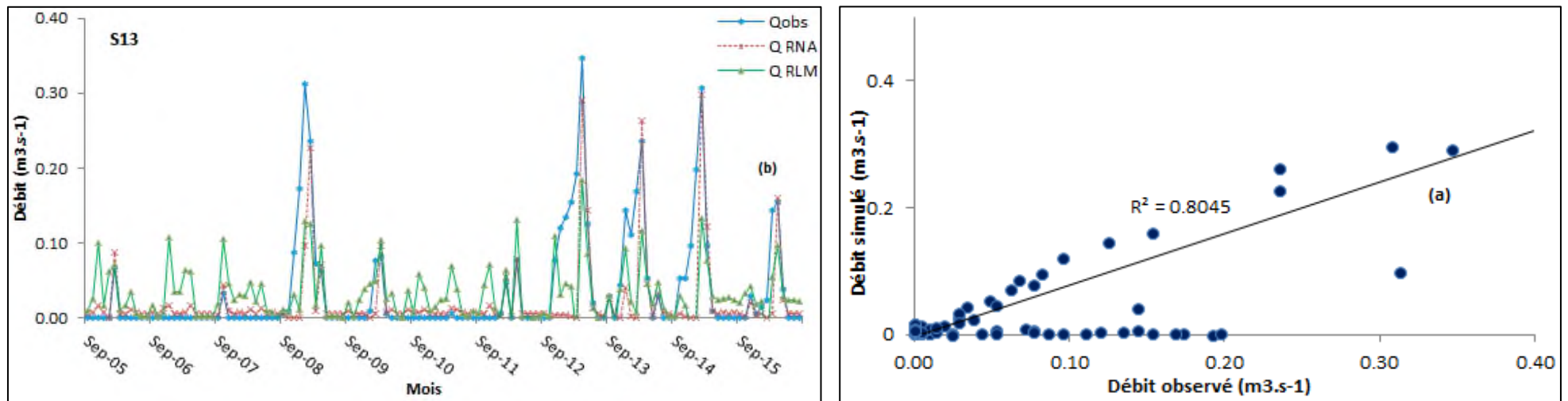


Figure IV.28 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés par RNA à la station S13 (a) , Visualisation de la phase validation (b)

L'examen visuel des séries chronologiques de superposition de la courbe du débit observé et celui simulé des oueds étudiés de la Macta montre que la courbe du débit simulé par RNA se rapproche de la courbe du débit observé par rapport à celle simulée par la RLM pour la quasi-totalité des stations hydrométriques étudiées. En outre, la courbe simulée par RNA longe souvent la courbe des débits observés sauf quelques exceptions signalées sur les graphes par un cercle noir. Cependant, les deux modèles de simulation du débit indiquent quelques points faibles à la fois dans la reproduction de petites valeurs en les surestimant et dans les pics de valeurs observées en les sous-estimant. Cette faiblesse est distincte au droit des stations hydrométriques suivantes : S6 (111127) où on observe une surestimation du débit observé durant (1983-1984) qui coïncide avec le début de calage des modèles. La station S10 (111208) : en période de validation les modèles de simulation surestiment les faibles débits observés. S11 (111220) : une surestimation des faibles débits liquides est considérée durant presque toute la période de validation. Alors qu'au niveau de la station S12 (111403) : une surestimation est remarquée en phase de validation des modèles de simulation durant la période (2013/14-2014/15). Toutes fois, la qualité de simulation par le modèle à base de RNA reste supérieure à celle du modèle de RLM.

Par ailleurs, ces observations peuvent être confirmées par le nuage de points indiquant le degré de corrélation entre les débits liquides observés et ceux simulés par la meilleure combinaison du modèle de RNA durant les deux phases d'apprentissage. La corrélation atteint des degrés satisfaisants à excellents durant le calage et la validation en référence des valeurs de R^2 ; (66 à 90)% et (53 à 90)% respectivement. Cette corrélation entre les valeurs observées et simulées a diminué significativement au-dessous du seuil de satisfaction au niveau de la station S10 ($R^2=34\%$).

Par conséquent, le modèle RNA a montré un niveau significatif de précision de simulation des débits liquides des différents oueds étudiés de la Macta sur la base des résultats des critères statistiques de performance r , NSE, RMSE et R^2 . Cette précision élevée de simulation atteinte par les RNA par rapport à la RLM pourrait être attribuée à leur capacité de capturer les interactions très complexes dans les systèmes hydrologiques sans rentrer dans le processus (boîte noire). En effet, c'est une propriété intéressante de ne considérer dans notre cas que les paramètres météorologiques (P_t, P_{t-1}, ETo_{t-1}) et les valeurs antérieures du débit (Q_{t-1}) pour

reproduire une seule variable de sortie, qui est le débit liquide mensuel, d'autant plus que les paramètres hydrogéologiques sont quasiment inexistantes pour notre cas.

Conclusion

Les trois (03) modèles (RLM, GR2M et RNA) choisis ont été appliqués pour simuler le débit liquide des oueds étudiés de la Macta au droit des stations de jaugeages durant la période (1983/84- 2015/16). Après apprentissage des modèles, les résultats ont montré que le modèle GR2M ne permet pas de simuler les débits observés sous le climat semi-aride. Les deux autres modèles sont meilleurs par rapport à GR2M. Cependant, le modèle linéaire RLM est moins efficace, est dû à sa nature linéaire qui ne peut pas capturer l'effet stochastique des composantes du processus hydrologique. Alors que le modèle à base de RNA produit de très bons résultats notamment celui M4 avec les entrées suivantes (P_t, ETo_{t-1}, Q_{t-1}). Dans la phase de validation, les résultats des NSE et r ont amélioré au niveau des données de neuf (09) stations alors que trois (03) stations ont connu une diminution de performance du modèle RNA mais restent dans une fourchette satisfaisante. L'avantage de l'utilisation du RNA dans l'hydrologie est sa capacité à refléter la non linéarité inhérente de la relation pluie-débit sans entrer dans le processus (boîte noire).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale & recommandations

Au terme de ce travail, qui s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la relation pluie-débit des oueds du bassin versant de la Macta en zone semi-aride, nous pensons avoir fourni une étude synthétique de la modélisation de la relation pluie débit à l'échelle mensuelle des oueds de la Macta par trois (03) approches à savoir RLM, GR2M et RNA en prenant en compte le maximum de l'information disponible dans le but d'une gestion quantitative et rationnelle de la ressource en eau dans le contexte de la variabilité climatique.

L'analyse détaillée du milieu physique et les données utilisées permet de tirer les résultats suivants:

- **Caractéristiques de la zone d'étude** ; un nouveau découpage des sous bassins versants a été effectué en considérant chaque station hydrométrique comme étant l'exutoire d'un nouveau sous bassin versant. Par conséquent, treize (13) nouvelles surfaces ont été obtenues. les nouveaux sous bassins versant de la Macta possèdent une forme allongée ($Kc > 1$), la densité de drainage varie d'un sous bassin à un autre, on passe d'un bassin bien hiérarchisé et drainé à d'autres peu drainés ($1,5 < Dd < 3,5$). Le relief du bassin versant est très varié allant des basses plaines ($< 50m$) du littoral aux hautes altitudes ($> 1000m$) où le caractère montagnard est très répandu. La géologie des terrains du bassin de la Macta est dominée par un faciès marneux et calcaires. Le couvert végétal dominant est de type temporaire (58% de la surface totale) dont l'agriculture est le secteur principal dans cette zone.
- **Etude des variables hydro-climatiques** ; Les données hydro-climatiques constituent le noyau de base de ce travail dont leurs acquisitions et leurs critiques a été une tâche très longue et fastidieuse. l'étude climatique des trois (03) stations climatologiques montre que le bassin versant de la Macta appartient à l'étage bioclimatique semi-aride caractérisé par une variabilité des précipitations tant spatiale que temporelle. L'analyse en composantes principales des séries pluviométriques de dix-huit (18) stations pluviométriques étudiés montrent que les précipitations croissent du Sud au Nord et de l'Ouest à l'Est où le coefficient de variation ne suit pas en général la grandeur de la hauteur pluviométrique ; les stations pluviométriques situées au sud du bassin connaissent une irrégularité remarquable des précipitations (jusqu'à 42%). Le régime saisonnier dominant est de type HPAE (Hiver

Printemps Automne Eté). L'application des tests statistiques de détection des ruptures a montré qu'une variabilité climatique a frappé le bassin versant de la Macta au milieu des années deux milles provoquant une augmentation du régime pluviométrique.

A l'échelle des débits liquides, le climat semi-aride du bassin versant est caractérisé par des écoulements temporaires où l'ensemble des oueds de la Macta au droit des stations hydrométriques étudiées sont irréguliers ($C_v > 0,5$). Cette variabilité est liée essentiellement à l'alimentation pluviale irrégulière des cours d'eau et l'écart entre l'apport maximum et minimum au cours de la période d'observation. Le maximum pluviométrique enregistré en saison d'hiver engendre un maximum de débits liquides en saison de printemps. L'application des tests statistiques de détection des ruptures sur les séries hydrométriques a montré que les débits liquides des oueds de la Macta connaissent une variabilité instable et considérable.

- **Application de la modélisation pluie-débit ;** Trois (03) modèles fonctionnant au pas de temps mensuel ont été testés durant la période (1983/84-2015/16) pour examiner leurs adéquations pour simuler les valeurs observées du débit liquide des oueds de la Macta dont leur efficacité a été évalué au moyen des critères statistiques de r , NSE et RMSE. La comparaison a montré que le modèle conceptuel à réservoir GR2M n'est pas adapté aux sous bassins versants jaugés sous le climat semi-aride dont les valeurs de NSE sont très médiocre et loin du seuil de satisfaction. Néanmoins, le modèle linéaire RLM est moins efficient, est dû à sa nature linéaire qui ne peut pas capturer l'effet stochastique des composantes du processus hydrologique notamment la non linéarité de la relation pluie-débit. Alors que le modèle à base de RNA produit de très bons résultats durant les deux (02) phases d'apprentissage, notamment la combinaison M4 avec les entrées suivantes (P_t, ETo_{t-1}, Q_{t-1}). Les critères statistiques (r , NSE) indiquent des valeurs très élevées (r varie entre 0,81 et 0,95 ; NSE oscille entre 66% et 91%). Ces résultats ont amélioré au niveau des données de neuf (09) stations alors que trois (03) stations ont connu une diminution de performance du modèle RNA mais restant dans une fourchette satisfaisante. L'avantage de l'utilisation du RNA dans l'hydrologie est sa capacité à refléter la non linéarité inhérente de la relation pluie-débit sans entrer dans le processus (boite noire) mais son point faible réside dans la simulation des valeurs très faibles en les surestimant et dans la simulation des pic de valeurs en les sous-estimant.

- **Recommandations ;** Dans le souci de préserver la ressource en eau superficielle des oueds du bassin versant de la Macta et lui assurer une gestion rationnelle et durable, il est recommandé de prendre en considération les points suivants :
 - ✓ Etudier la distribution spatiale des paramètres du modèle pluie-débit choisi pour élargir son application et donc accroître la faisabilité de l'estimation *a priori* des paramètres du modèle.
 - ✓ Etablir une carte de régionalisation des paramètres du modèle qui permettra aux décideurs d'extraire l'information sur le débit liquide dans d'autres régions de la Macta en tenant en compte des caractéristiques hydroclimatiques, morphométriques et biogéographiques.
 - ✓ Pour améliorer la précision de simulation et de prévision, il est suggéré l'application de nouveaux modèles tels que le système neuro-flou d'inférence adaptatif (ANFIS), support de régression vectorielle (SVR), la programmation génétique (GP).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abba, S.I., Elkiran, G. (2017).** Effluent prediction of chemical oxygen demand from the astewater treatment plant using artificial neural network application. *Procedia computer science* 120, 156-163.
- Abba, S I., Hadi, S.J., Jazouli, J. (2017).** River water modelling prediction using multi-linear regression, artificial neural network, and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. *Procedia computer science* 120, 75-82.
- Abba, S.I., Usman, A.G., Işik, S. (2020).** Simulation for response surface in the HPLC optimization method development using artificial intelligence models: A data-driven approach. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 104007. doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.104007
- Achite, M., Buttafuoco, G., Toubal, K. and Luca, F. (2017).** Precipitation spatial variability and dry areas temporal stability for different elevation classes in the Macta basin (Algeria). *Environmental Earth Sciences* 76(13), 458. [Doi 10.1007/s12665-017-6794-3](https://doi.org/10.1007/s12665-017-6794-3)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. Smith, M. (1998).** FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56, e156.
- Ambroise, B. (1999).** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 2-modélisation systémique et dynamique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 12(1), 125-153.
- Ardoin, S. (2000).** Prise en compte des spécificités de l'évapotranspiration en zone semi-aride dans la modélisation globale de la relation pluie-débit. Mémoire de DEA, Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. France.
- Arsenault, R., Breton-Dufour, M., Poulin, A., Dallaire, G. and Romero-Lopez, R. (2019).** Streamflow prediction in ungauged basins: analysis of regionalization methods in a hydrologically heterogeneous region of Mexico. *Hydrological sciences journal* 64(11), 1297-1311. [DOI: 10.1080/02626667.2019.1639716](https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1639716)
- Assaba, M. (2004).** La connaissance des pluies mensuelles au service de la modélisation hydrologique des apports mensuels en eau de surface: application à l'Algérie du Nord, au Sud de la France et à la Corse: thèse, Nice.
- Baahmed, D., Oudin, L. and Errih, M. (2015).** Current runoff variations in the Macta catchment (Algeria): is climate the sole factor? *Hydrological sciences journal* 60(7-8), 1331-1339. [DOI: 10.1080/02626667.2014.975708](https://doi.org/10.1080/02626667.2014.975708)
- Baahmed, D., Oudin, L. (2017).** Explaining the hydrological behavior of the Macta basin by solving the parameter of a hydrological model based on Schreiber's expression. *Larhyss journal, ISSN 1112-3680*, 32 (2017), 127-137.

- Baiche, A., Sidi Mohamed, H., Abloui, H. (2015).** Surexploitation des ressources en eau de l'aquifère du plateau de Mostaganem. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 153-165.
- Bakreti, A., Braud, I., Leblois, E. and Benali, A. (2013).** Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie Occidentale). *Hydrological sciences journal* 58(1), 133-151. doi.org/10.1080/02626667.2012.745080
- Bekkoussa, B., Meddi, M., Jourde, H. (2008).** Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d'une région semi-aride: cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 2008;19(3):173-84 [doi: 10.1684/sec.2008.0134](https://doi.org/10.1684/sec.2008.0134)
- Bekkoussa, B., Jourde, H., Batiot-Guilhe, C., Meddi, M., Khaldi, A., Azzaz, H. (2013).** Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien. *Hydrological sciences journal*, 58, 1111-1127. doi.org/10.1080/02626667.2013.800639
- Belouz, K. (2009).** Modélisation de l'évapotranspiration de référence et du déficit hydrique par les réseaux de neurones artificiels à différent pas de temps, 2009.
- Benkaci, T.A., Dechemi, N. (2004).** Scientific papers-Modelisation pluie-debit par les modeles conceptuels et" boite noire", test d'un modele neuroflou. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques* 49(5), 919-930.
- Benstaali, I., Benyada, L. (2017).** Bilan et variabilité temporelle des matières en suspension dans le bassin de la Macta: cas du sous bassin versant de Bou-Hanifia (Algérie du nord). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 30, 199-211. doi.org/10.7202/1044247ar
- Bentekhici, N., Benkesmia, Y., Berrichi, F., Bellali ,S. (2018).** Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 31, 43-59. doi.org/10.7202/1047052ar
- Bergstrom, S. (2006).** Experience from applications of the HBV hydrological model from the perspective of prediction in ungauged basins. IAHS publication 307, 97-107.
- Berhail, S., Tourki, M., Merrouche, I. and Bendekiche, H. (2021).** Geo-statistical assessment of meteorological drought in the context of climate change: case of the Macta basin (Northwest of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-21. doi.org/10.1007/s40808-020-01055-7
- Blöschl, G., Bloschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Savenije, H. and Viglione, A. (2013).** Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales, Cambridge University Press.

- Borne, P., Benrejeb, M. Haggège, J. (2007).** Les réseaux de neurones: présentation et applications, Editions OPHRYS.
- Bouanani, A., Baba Hamed, K., Mania, J. and Bensalah, M. (2005).** Le comportement d'un système hydrologique en climat méditerranéen par l'analyse corrélatoire et spectrale des débits et des pluies. Cas de trois sous bassins sud-méditerranéens:(oued Sebdou, Moulah et Isser-Tafna-NW Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 18(2), 215-224.
- Bouasria, S., Khalladi, M. Khaldi, A. (2010).** Ralentissement Dynamique des Inondations au niveau d'un bassin Versant de l'Ouest Algérien: cas de l'Oued Mekerra (Sidi Bel Abbes). *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X Vol.43 No.2 (2010), pp.172-182
- Boufekane, A., Saighi, O. (2018).**Flow estimation in a basin by using a hydrological model: application to the basin of wadi Djendjen (Jijel, North-East Algeria). *Water Resources* 45(4), 523-531.
- Boukhrissa, Z., Khanchoul, K., Le Bissonnais, Y., Tourki, M. (2013).** Prediction of sediment load by sediment rating curve and neural network (ANN) in El Kebir catchment, Algeria. *Journal of Earth System Science* 122(5), 1303-1312.
- Boulariah, O., Meddi, M., Longobardi, A. (2019).** Assessment of prediction performances of stochastic and conceptual hydrological models: monthly stream flow prediction in northwestern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 12(24), 1-14. doi.org/10.1007/s12517-019-4847-5
- Bouteldjaoui, F., Bessenasse, M., Guendouz, A. (2012).** Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). *Nature & Technology*, 07,109-116.
- Bouzeria, H., Ghenim, A.N. and Khanchoul, K. (2017).** Using artificial neural network (ANN) for prediction of sediment loads, application to the Mellah catchment, northeast Algeria. *Journal of Water and Land Development* 33(1), 47-55. [DOI: 10.1515/jwld-2017-0018](https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0018)
- Boyer, J. (2002).** Software Khronostat chronological series of statistical analysis. *IRD UR2, Programme*, 21.
- Burn, D.H., Boorman, D.B. (1993).** Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of hydrology* 143(3-4), 429-454.
- Campos, J.A. Pedrollo, O.C. (2021).** A regional ANN-based model to estimate suspended sediment concentrations in ungauged heterogeneous basins. *Hydrological sciences journal*. 34 pp. [DOI: 10.1080/02626667.2021.1918695](https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1918695)
- Chea, S. Oeurng, C. (2017).** Flow simulation in an ungauged catchment of Tonle Sap Lake Basin in Cambodia: Application of the HEC-HMS model. *Water Utility Journal* 17, 3-17.

- Chen, H., Xu, C.-Y., Guo, S. (2012).** Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of hydrology* 434, 36-45. [doi:10.1016/j.jhydrol.2012.02.040](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.040)
- Chibane, B., Bentchakal, M., Medjerab, A., Benfares, B. (2015).** Etude de la variabilité et de la structure de pluie annuelle dans une région semi-aride: cas du bassin versant de la Macta (nord-ouest algérien). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782* (23), 213-229.
- Cherif, E.A., Errih, M., Cherif, H.M. (2009).** Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. *Hydrological sciences journal*, 54, 338-348. doi.org/10.1623/hysj.54.2.338
- Chung, S.-W., Gassman, P.W., Gu, R., Kanwar, R.S. (2002).** Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management systems. *Transactions of the ASAE* 45(4), 1135.
- Coutagne, A. (1949).** Etude générale des variations de débit en fonction des facteurs qui les conditionnent. *La houille blanche* (2), 134-146.
- Dagnelie, P. (1970).** Théorie et méthodes statistiques: La méthode de l'inférence statistique, Éd. Duculot.
- Dawson, C.W., Wilby, R. (1998).** An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrological sciences journal* 43(1), 47-66. doi.org/10.1080/02626669809492102
- Dechemi, N., Benkaci, T. Issolah, A. (2003).** Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 16(4), 407-424. doi.org/10.7202/705515ar
- De Martonne, E. (1926).** Aréisme et indice d'aridité. *Comptes Rendus de L'Acad Sci, Paris*, 182, 1395-1398 pp.
- De Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., Rossi, F. (2016).** Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing* 192, 38-48. doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114
- Deo, R.C., Downs, N., Parisi, A.V., Adamowski, J.F. and Quilty, J.M. (2017).** Very short-term reactive forecasting of the solar ultraviolet index using an extreme learning machine integrated with the solar zenith angle. *Environmental research* 155, 141-166. doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.035
- Deri, J. (1977).** Étude générale de la ressource en eaux en Algérie. Document Technique, Direction d'Étude et d'Aménagement des Ressources Hydrauliques, Alger.
- Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Binnui, F., Khwanchum, L., Kuriqi, A., Khedher, K.M., Pham, Q.B. (2021).** Performance Evaluation of a Two-

Parameters Monthly Rainfall-Runoff Model in the Southern Basin of Thailand. Water 13(9), 1226. doi.org/10.3390/w13091226

Djerbouai, S., Souag-Gamane, D. (2016). Drought forecasting using neural networks, wavelet neural networks, and stochastic models: case of the Algerois Basin in North Algeria. Water Resources Management 30(7), 2445-2464. [DOI 10.1007/s11269-016-1298-6](https://doi.org/10.1007/s11269-016-1298-6)

Dogan, E., Ates, A., Yilmaz, E. C., Eren, B. (2008). Application of artificial neural networks to estimate wastewater treatment plant inlet biochemical oxygen demand. Environmental progress, 27, 439-446. [DOI 10.1002/ep.10295](https://doi.org/10.1002/ep.10295)

Elkiran, G., Nourani, V., Abba, S. (2019). Multi-step ahead modelling of river water quality parameters using ensemble artificial intelligence-based approach. Journal of hydrology 577, 123962. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123962

El Mahi, A., MEDDI, M., Bravard, J. P. (2012). Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological sciences journal*, 57, 1642-1661. [DOI: 10.1080/02626667.2012.717700](https://doi.org/10.1080/02626667.2012.717700)

El Mahi, A., MEDDI, M., Matari, A. Ketrouci, K. (2014). État de la pluviométrie en période de sécheresse en Algérie du nord et sa relation avec le phénomène ENSO. Production scientifique-Communications 1.

Elouissi, A., Habi, M., Benaricha, B., Boualem, S.A. (2017). Climatechange impact on rainfall spatio-temporal variability(Macta watershed case, Algeria). Arabian Journal of Geosciences 10(22), 496. doi.org/10.1007/s12517-017-3264-x

Estacio, A.B.S., Costa, A.C., Souza Filho, F.A., Rocha, R.V. (2021). Uncertainty analysis in parameter regionalisation for streamflow prediction in ungauged semi-arid catchments. *Hydrological sciences journal*. doi.org/10.1080/02626667.2021.1913281

Faraoun, F., Benabdeli, K. (2010). Cartographie et caractérisation physico-chimique des sols de la plaine de Sidi Bel Abbès (Algérie occidentale). Afrique Science ,ISSN 1813-548X, 6, 18-26.

Fortin, V., Ouarda, T., Rasmussen, P., Bobée, B. (1997a). Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science 10(4), 461-487. doi.org/10.7202/705289ar

Fortin, V., Bernier, J. and Bobée, B. (1997b). Simulation, Bayes, and bootstrap in statistical hydrology. Water resources research 33(3), 439-448. [Paper number 96WR03355.0043.](https://doi.org/10.1029/1996WR03355.0043)

Fotovatikhah, F., Herrera, M., Shamsirband, S., Chau, K.-w., Faizollahzadeh Ardabili, S. Piran, M.J. (2018). Survey of computational intelligence as basis to big flood management: Challenges, research directions and future work. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 12(1), 411-437. [doi.org/10.1080/19942060.2018.1448896.](https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1448896)

- Fouchier, C. (2010).** Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues, Doctorat Université Montpellier II.231p.
- Froget, C. (1980).** La sédimentation au quaternaire terminal dans le golfe d'arzew (Algérie). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 30, 41-64.
- Gherissi, R. (2018).** Modélisation hydrologique d'un bassin versant en climat méditerranéen par l'approche conceptuelle globale. Cas de l'oued Lakhdar (ex: Chouly)(Tafna, Nord-Ouest algérien), Thèse de doctorat, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 244p.
- Grayson, R.B., Blöschl, G., Western, A.W. McMahon., T.A. (2002).** Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response. *Advances in Water Resources* 25(8-12), 1313-1334. [PII: S0309-1708\(0 2\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00060-X)
- Gutiérrez, A. (2003).** Modélisation stochastique des régimes pluviométriques à l'échelle régionale pour la prévision des crues au nord-Mexique. Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, France, 174 p.
- Hadj-Said, S. (2007).** Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière : cas de la nappe de Guerbes. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhta, Annaba. Algérie, 215 p
- Hadour, A., Mahé, G., Meddi, M. (2020).** Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100671. doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100671
- Hai, T., Sharafati, A., Achite, M., Salih, S.Q., Deo, R.C., Al-Ansari, N., Yaseen, Z.M. (2020).** Global solar radiation estimation and climatic variability analysis using extreme learning machine based predictive model. *IEEE Access* 8, 12026-12042. [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965303](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965303)
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Karahacane, H., Ali Rahmani, S. (2019).** Tendances des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique: bassin versant de l'oued Mina en Algérie. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 32(2), 83-114. doi.org/10.7202/1065202ar
- He, H., Siu, W.-C. (2011).** Single image super-resolution using Gaussian process regression, pp. 449-456, IEEE.
- Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H. (1989).** Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, 2, 359-366.
- Hrachowitz, M., Savenije, H., Blöschl, G., McDonnell, J., Sivapalan, M., Pomeroy, J., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M., Ehret, U. (2013).** A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological sciences journal* 58(6), 1198-1255. doi.org/10.1080/02626667.2013.803183

- Hubert, P., Carbonnel, J. P., Chaouche, A. (1989).** Segmentation des séries hydrométéorologiques—application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of hydrology*, 110, 349-367.
- Hsu, K. L., Gupta, H. V., Sorooshian, S. (1995).** Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water resources research*, 31, 2517-2530.
- Kabouya, M. (1990).** Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université de Paris sud, France, 347 p.
- Kabouya, M. Michel, C. (1991).** Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 4(4), 569-587. doi.org/10.7202/705116ar
- Kalteh, A.M., Hjorth, P., Berndtsson, R. (2008).** Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. *Environmental Modelling & Software* 23(7), 835-845. [doi:10.1016/j.envsoft.2007.10.001](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.10.001)
- Kamni, H. (2017).** Modélisation et régionalisation de la relation «pluie-débit» face au changement climatique: Impact sur les ressources en eau. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 229p.
- Khair, U., Fahmi, H., Al Hakim, S., Rahim, R. (2017).** Forecasting error calculation with mean absolute deviation and mean absolute percentage error, p. 012002, IOP Publishing. [doi :10.1088/1742-6596/930/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/930/1/012002)
- Khaldi, A. (2005).** Impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien « Monts de Tlemcen –Saida ». Thèse de Doctorat, Université d'Oran, Algérie, 229 p.
- Korichi, K., Hazzab, A. (2012).** Hydrodynamic investigation and numerical simulation of intermittent and ephemeral flows in semi-arid regions: Wadi Mekerra, Algeria. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 60(2), 125-142. [DOI: 10.2478/v10098-012-0011-6](https://doi.org/10.2478/v10098-012-0011-6)
- Kourgialas, N.N., Dokou, Z., Karatzas, G.P. (2015).** Statistical analysis and ANN modeling for predicting hydrological extremes under climate change scenarios: The example of a small Mediterranean agro-watershed. *Journal of environmental management* 154, 86-101. doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.034
- Lakache, H., Nouaceur, Z., Mebarki, A., Mesnage, V. (2019).** La relation pluie-débit dans un hydro système semi-aride méditerranéen: cas du bassin de l'oued Endja, à l'amont du barrage de Beni Haroun (Algérie orientale). *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre* (50), 25-35.
- Lapedes, A. and Farber, R. (1987).** Nonlinear signal processing using neural networks: Prediction and system modelling.

- Laurent, F. (1996).** Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau: Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux.
- Legates, D.R., McCabe Jr, G.J. (1999).** Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research* 35(1), 233-241. [Paper number 1998WR900018](#)
- Lehbab-Boukezzi, Z., Boukezzi, L., Errih, M. (2016).** Uncertainty analysis of HEC-HMS model using the GLUE method for flash flood forecasting of Mekerra watershed, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 9(20), 751. [DOI 10.1007/s12517-016-2771-5](#)
- Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. (1993).** Hydrologic forecasting, McGraw-Hill New York.
- Machado, F., Mine, M., Kaviski, E., Fill, H. (2011).** Monthly rainfall–runoff modelling using artificial neural networks. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques* 56(3), 349-361. [doi.org/10.1080/02626667.2011.559949](#)
- Maizi, D., Boufekane, A., Ouali, K. A., Aoudia, M. (2020).** Identification of potential area of recharge using geospatial and multi-criteria decision analysis in the Macta watershed (Western Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 127. [doi.org/10.1007/s12517-020-5076-7](#)
- Makhlouf, Z. (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris 11.
- Makhlouf, Z., Michel, C. (1994).** A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of hydrology* 162(3-4), 299-318.
- McCulloch, W.S., Pitts, W. (1943).** A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics* 5(4), 115-133.
- Meddi, M., Hubert, P. (2003).** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium) IAHS publication* (238), 229-235.
- Meddi, H., Meddi, M. (2007).** Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Géographia technica* 2, 49-55.
- Meddi, M., Talia, A., Martin, C. (2009)** Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement (Volume 3)*, 61-84.
- Meddi, M., Assani, A.A., Meddi, H. (2010).** Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24(14), 3817-3833. [DOI 10.1007/s11269-010-9635-7](#)

- Medinger, G. (1948).** Tableau général de l'hydrologie algérienne dans Hydrologie Algérienne, recueil des observations de 1924 à 1946. SCEGGT Alger, Algérie.
- Medjber, A., Berkane, F. (2016).** Quantification Et Evolution Du Bilan De La Nappe Karstique De Saida (Nord-Ouest De l'Algerie). European Scientific Journal, vol.12, No.9 ,296-312 doi.org/10.19044/esj.2016.v12n9p296
- Meshram, S.G., Pourghasemi, H.R., Abba, S I., Alvandi, E., Meshram, C., Khedher, K.M. (2021).** A comparative study between dynamic and soft computing models for sediment forecasting. Soft Computing, 1-13. doi.org/10.1007/s00500-021-05834-x
- Michel, C. (1983).** Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre? La houille blanche (1), 39-44. doi.org/10.1051/lhb/1983004
- Moriassi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007).** Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) ISSN 0001–2351 50(3), 885-900.
- Mosavi, A., Ozturk, P. and Chau, K.-w. (2018).** Flood prediction using machine learning models: Literature review. Water 10(11), 1536. [doi:10.3390/w10111536](https://doi.org/10.3390/w10111536)
- Mouelhi, S. (2003).** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, Doctorat Géosciences et ressources naturelles, ENGREF Paris.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. (2006).** Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. Journal of hydrology 318 (1-4), 200-214. [doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014)
- Mrad, D., Dairi, S., Djebbar, Y. (2014).** Rainfall-Rain off Modeling Using Artificial Neural Network. APCBEE procedia 10, 251-256. [doi: 10.1016/j.apcbee.2014.10.048](https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.10.048)
- Msaaf, M., Belmajdoub, F. (2015).** L'application des réseaux de neurone de type «feedforward» dans le diagnostic statique. Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, hal-01260830- 6 p
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970).** River flow forecasting through conceptual models part I–A discussion of principles. Journal of hydrology 10(3), 282-290.
- Nourani, V., Alami, M. T., Vousoughi, F. D. (2015).** Wavelet-entropy data pre-processing approach for ANN-based groundwater level modeling. Journal of Hydrology, 524, 255-269. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.048
- Nourani, V., Elkiran, G., Jazouli, A., Tahsin, A. (2019a).** Multi-region modeling of daily global solar radiation with artificial intelligence ensemble. Natural Resources Research 28(4), 1217-1238. doi.org/10.1007/s11053-018-09450-9

- Nourani, V., Paknezhad, N.J., Sharghi, E., Khosravi, A. (2019b).** Estimation of prediction interval in ANN-based multi-GCMs downscaling of hydro-climatologic parameters. *Journal of hydrology* 579, 124226. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124226
- Otmane, A., Baba-Hamed, K., Bouanani, A.,Safa, A. (2017).** Prédétermination des valeurs de crues extrêmes et contribution de la plaine de Sidi Bel-Abbès dans le bilan hydrologique du bassin versant de l'oued Mekerra. *Techniques Sciences Méthodes (7-8)*, 27-48.
- Otmane, A., Baba-Hamed, K., Bouanani, A., Kebir, L. (2018).** Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest algérien). *Techniques Sciences Méthodes (9)*, 23-37.
- Otmane, A., Baba Hamed, K., Bouanani, A., Kebir, L.W., Ghabi, M. (2018).** Impact de la sécheresse sur la rétention hydrique à travers les sous bassins de l'oued Mekerra (Macta, NW-Algérie).
- Otmane, A., Baba Hamed, K., Bouanani, A. (2019).** Apport de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du bassin versant dans la modélisation hydrologique et les sous-produits du bilan hydrologique: cas du bassin versant de l'aval Mekerra, Algérie. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 32(2), 117-144. doi.org/10.7202/1065203ar
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005).** Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology* 303(1-4), 290-306. [doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026)
- 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). [doi:10.1029/2007WR006240](https://doi.org/10.1029/2007WR006240),
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Ouazar, D., Goumih, A. and Zouari, K. (2020).** Assessment the climate change impact on the future evapotranspiration and flows from a semi-arid environment. *Arabian Journal of Geosciences* 13(2), 1-14. doi.org/10.1007/s12517-020-5065-x
- Ouis, S. (2012).** Impact des fluctuations climatiques sur la quantité et la qualité des eaux souterraines d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*.
- Perrin, C., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., Mathevet, T. (2007).** Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrological sciences journal* 52(1), 131-151. doi.org/10.1623/hysj.52.1.131

- Pettitt A. N., (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. *App. Statist.* 28(2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Razavi, T., Coulibaly, P. (2013).** Classification of Ontario watersheds based on physical attributes and streamflow series. *Journal of hydrology* 493, 81-94. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.013
- Refsgaard, J.C., Storm, B. (1990).** Distributed hydrological modelling, pp. 41-54, Springer.
- Remenieras, G. (1976).** L'hydrologie de l'ingénieur-Éditions Eyrolles. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, 2ème édition, 456pp.
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L., Najjar, Y. (2004).** Rainfall-runoff model using an artificial neural network approach. *Mathematical and Computer Modelling* 40(7-8), 839-846. [doi:10.1016/j.mcm.2004.10.012](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2004.10.012)
- Saidi, H. (2012).** Impact des changements climatiques sur régime des cours d'eau: cas de l'Oued Mina (w. Relizane), Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique Arbaoui Abdedllah.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., Hauck, L. M. (2001).** Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37, 5, 1169-1188.
- Sharghi, E., Nourani, V., Molajou, A., Najafi, H. (2019).** Conjunction of emotional ANN (EANN) and wavelet transform for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydroinformatics* 21(1), 136-152. [doi: 10.2166/hydro.2018.054](https://doi.org/10.2166/hydro.2018.054)
- Sharifi, S. S., Delirhasannia, R., Nourani, V., Sadraddini, A. A., Ghorbani, A. (2013).** Using artificial neural networks (ANNs) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for modeling and sensitivity analysis of effective rainfall. *Recent Advances in Continuum Mechanics, Hydrology and Ecology*, Mladenov V (eds), 133-139.
- Singh, P., Ramasastri, K., Singh, U., Gergan, J., Dobhal, D. (1995).** Hydrological characteristics of the Dokriani Glacier in the Garhwal Himalayas. *Hydrological sciences journal* 40(2), 243-257. doi.org/10.1080/02626669509491407
- Soro, T. D., Soro, N., Oga, Y. M.-S., Lasm, T., Soro, G., Ahoussi, K. E., Biémi, J. (2011).** La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 55-73. doi.org/10.4000/physio-geo.1581
- Sourisseau, B. (1973).** Étude hydrogéologique de la nappe de Sidi Bel Abbès. *Rapport de la direction des études de milieu et de la recherche hydraulique*, 30.

- Stolc, V., Shmygelska, A., Griko, Y. (2011).** Adaptation of organisms by resonance of RNA transcription with the cellular redox cycle. *PloS one* 6(9), e25270. [doi:10.1371/journal.pone.0025270](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025270)
- Tachi, S.E., Ouerdachi, L., Remaoun, M., Derdous, O., Boutaghane, H. (2016).** Forecasting suspended sediment load using regularized neural network: Case study of the Isser River (Algeria). *Journal of Water and Land Development* (29), 75--81. [DOI: 10.1515/jwld-2016-0014](https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0014)
- Taibi, R. (1993).** Contribution à l'étude de l'écoulement des cours d'eau de l'Algérie septentrionale.
- Touaïbia, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. ISBN 9947-0-03367-1, Blida-Algérie, 159 p.
- Touazi, M. (2003).** Evaluation des ressources en eau et acquisition de bases de données à références spatiale et temporelle en Algérie du Nord, Nice. Thèse de doctorat.
- Touazi, M., Laborde, J.P., Bhiry, N. (2004).** Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria. *Journal of hydrology* 296(1-4), 179-191. [doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.030)
- Touazi, M., Bhiry, N., Laborde, J.-P. and Achour, F. (2011).** Régionalisation des débits moyens mensuels en Algérie du nord. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 24(2), 177-191. doi.org/10.7202/1006110ar
- Willmott, C.J. (1982).** Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63(11), 1309-1313.
- Wira, P. (2009).** Réseaux de neurones artificiels: architectures et applications. Cours en ligne, Université de Haute-Alsace.
- Yaseen, Z.M., Sulaiman, S.O., Deo, R.C., Chau, K.-W. (2019).** An enhanced extreme learning machine model for river flow forecasting: State-of-the-art, practical applications in water resource engineering area and future research direction. *Journal of hydrology* 569, 387-408. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.069
- Zakhrouf, M., Bouchelkia, H., Stamboul, M. (2016).** Neuro-Wavelet (WNN) and Neuro-Fuzzy (ANFIS) systems for modeling hydrological time series in arid areas. A case study: the catchment of Aïn Hadjadj (Algeria). *Desalination and Water Treatment* 57(37), 17182-17194.
- 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(11), 342. doi.org/10.1007/s12517-019-4487-9
- Zamoum, S. (2020)** Modélisation spatiotemporelle des variables hydrométéorologiques pour l'évaluation des risques liés à la variabilité

climatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.Thèse de doctorat.

Zeroual, A., Meddi, M., Assani, A.A. (2016). Artificial neural network rainfall-discharge model assessment under rating curve uncertainty and monthly discharge volume predictions. *Water Resources Management* 30(9), 3191-3205. [DOI 10.1007/s11269-016-1340-8](https://doi.org/10.1007/s11269-016-1340-8)

Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Rajae, T. (2013). Performance of radial basis and LM-feed forward artificial neural networks for predicting daily watershed runoff. *Applied Soft Computing* 13(12), 4633-4644. doi.org/10.1016/j.asoc.2013.07.007