



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف -

Université Hassiba Ben Bouali Chlef

معهد العلوم الزراعية

Institut des Sciences Agronomiques

مخبر الماء و البيئة

Laboratoire Eau - Environnement

Département : SCIENCES AGRONOMIQUES

Mémoire en Vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : Hydraulique Agricole

Option : Hydrologie et Aménagement des Bassins Versants

Thème

*Analyse statistique des apports liquides en climat semi-aride, cas
du bassin versant de la Macta*

Présenté par : M^{elle} BEDDAL Dalila

Devant le Jury composé de :

Président	Mr. BOUTHIBA A.	Professeur, U.H.B Chlef
Encadreur	Mr. ACHITE M.	Maitre de conférences (A), U.H.B Chlef
Examineur	Mme. BETTAHAR N.	Maitre de conférences (A), U.H.B Chlef
	Mr. NEDJAI S.	Maitre de conférences (B), U.H.B Chlef
	Mr. NABED N.	Maitre assistant (A), U.H.B Chlef

Année universitaire : 2014–2015

Résumé

Les apports liquides peuvent être estimés avec une précision plus ou moins grande, mais les erreurs commises sur ces estimations peuvent entraîner soit une mauvaise utilisation de la ressource, soit une dépense inutile. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail dont l'objectif principal est l'évaluation statistique des apports liquides des oueds de la Macta en vue d'une gestion quantitative et rationnelle durable.

Le bassin versant de la Macta est caractérisé par un climat semi-aride, où une variabilité spatio-temporelle du régime hydrologique est observée.

L'étude du régime hydro-pluviométrique du bassin versant de la Macta a permis de déduire que le maximum pluviométrique observé en hiver est responsable de l'abondance des apports liquides en printemps. En outre, l'analyse des séries pluviométriques par des méthodes statistiques montre une rupture de stationnarité durant la période (1970-1985) ; dates à partir desquelles les totaux pluviométriques annuels ont baissé jusqu'à 29%. Cette réduction des pluies affecte le renouvellement de la ressource en eau superficielle dont les apports liquides ont régressé considérablement jusqu'à 65%, ce qui confirme l'hypothèse formulée relative à la variabilité climatique installée et persistée au nord-ouest du pays.

Le test de performance des formules empiriques de calcul des apports liquides, appliquées aux sous bassins jaugés de la Macta montre qu'elles ne sont pas adéquates et ne peuvent en aucun cas remplacer les valeurs observées. Cette inadaptation est validée par les critères statistiques de R^2 , Nash et RMSE.

Enfin, en tenant en compte des caractéristiques hydroclimatiques, morphométriques et biogéographiques tirées des sous bassins de la Macta, une analyse multidimensionnelle des apports liquides a permis de dégager des relations liant l'apport liquide aux caractéristiques des sous bassins versant ainsi que le modèle régressif prévisionnel résultant basé sur la régression linéaire multiple.

Mots clés: bassin versant de la Macta, apport liquide, Statistique, semi-aride, gestion de la ressource en eau.

ملخص

تدفقات المياه من الوديان يمكن أن تقدر عموماً بنسب متفاوتة، لكن الأخطاء الناجمة عن هذه التقديرات ينجم عنها سوء استخدام للموارد المائية أو ضياعها. في هذا السياق تدرج هذه الدراسة الهادفة إلى تقييم التدفقات المائية لأودية المقطع و هذا باستعمال الإحصائيات من أجل الإدارة الرشيدة والمستدامة للموارد السطحية للمياه.

يعتبر مناخ الحوض الهيدروغرافي للمقطع شبه جاف، يتميز بتغيرات حيزية و وقتية ملاحظة في النمط الهيدرولوجي. حيث أن دراسة النمط الهيدرو-المطري لهذا الحوض أثبتت أن الأمطار المسجلة في فصل الشتاء هي المسؤولة عن التدفق الكبير للمياه في الربيع. من جهة أخرى، أثبت التحليل الإحصائي للسلاسل السنوية للأمطار وقوع انقطاع خلال الفترة (1970-1985) و الذي نتج عنه انخفاض في معدل تساقط الأمطار السنوية إلى غاية 29%. هذا الانخفاض أثر سلباً على مصادر المياه السطحية مؤدياً إلى تراجع في التدفق حتى 65% مؤكداً فرضية التغيرات المناخية المحدثة في الشمال الغربي للبلاد.

أثبت اختبار فعالية الصيغ التجريبية لحساب التدفقات المائية المطبقة على الأحواض الثانوية للمقطع عدم فعالية هذه الصيغ و أنها لا تستطيع أن تعبر عن القيمة الحقيقية المسجلة على مستوى المحطة. هذه النتائج أثبتت باستعمال معايير R^2 , Nash, RMSE.

و في الأخير و اعتماداً على الخصائص الشكلية، الهيدروغرافية للأحواض الثانوية للمقطع، سمح التحليل المختلف الأبعاد بظهور علاقات بين التدفقات السائلة و خصائص الأحواض و كذا صيغة النموذج المستخرج.

الكلمات الرئيسية: الحوض الهيدروغرافي المقطع، التدفقات السائلة، الإحصاء، شبه الجاف، إدارة الموارد المائية.

Abstract

Streamflow can be estimated with more or less accuracy, but the mistakes made on these estimates may result a wrong use or useless of resource. In this perspective that inscribes the present work whose main objective is the statistical evaluation of streamflow Macta's wadis for a quantitative and rational management of water resources. Semi-arid climate is characterized Macta watershed, where a spatio-temporal variability of the hydrological regime is observed.

The study of hydro-rainfall of Macta showed the maximum rainfall observed in Winter is responsible for richness of streamflow in spring. Furthermore, analysis of rainfall data by statistical methods shows a breakdown of stationary during the period (1970-1985); dates from which the annual rainfall totals have gone down to 29%. This reduction in rainfall affects the water resource when streamflow decreased significantly to 65%. This confirms the hypothesis about climate variability installed and persisted in the northwest of the country. The performance test of empirical formulas calculates streamflow applied to gauged basins Macta shows that they are inadequate and it can't replace the observed values. This inadequacy is validated by the statistical criteria of R^2 , RMSE and Nash. Finally, we have taking morphométriques and biogeography characteristics from Macta sub basins, a multidimensional analysis of streamflow has identified relationships between streamflow and characteristics of sub watersheds. And also the regression model estimated based on multiple linear regressions.

Key words: Macta watershed, streamflow, Statistics, semi-arid climate, management of water resources.

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 notre responsable d'option « Hydrologie et Aménagement des bassins versants », mon encadreur Dr ACHITE M. qui m'a accordé sa confiance, en me proposant ce thème de recherche et auprès duquel j'ai trouvé les conseils, l'aide et l'appui malgré ses multiples engagements.

Je tiens également à assurer ma gratitude Monsieur le président Pr BOUTHIBA A. qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce travail.

Je tiens également à remercier Mesdames et Messieurs les membres jury ; Dr. BETTAHAR N, Dr. NEDJAI S et Dr. NABED N. d'avoir acceptés d'examiner ce travail.

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

Je voudrais ensuite exprimer mes sincères remerciements aux personnels de l'Office National de Météorologie (ONM) d'Oran et d'Alger pour l'apport des données climatiques nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Mes remerciements s'adressent à l'ensemble du personnel de l'agence du bassin hydrique (ABH) Chott Chergui d'Oran pour leur sympathie, leur orientation et leur disponibilité qui contribue énormément à l'enrichissement de ma connaissance à la zone d'étude.

Je ne pourrai jamais oublier l'aide de l'ensemble du personnel du service de documentation de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Alger pour l'accueil chaleureux, l'aide précieuse en termes de documentations et de conseils.

Par ailleurs, Je manifeste une gratitude particulière au professeur SARI, A. de l'université Houari Boumediene (UHBC) d'Alger, pour les réponses électroniques, les discussions enrichissantes et ses précieux conseils qui m'ont été d'un grand intérêt.

Un grand remerciement s'adresse au professeur ASSABA, M. de l'université de Nice Sophia Antipolis (France) d'avoir lu et répandu à mes correspondances électroniques.

Ma reconnaissance toute particulière s'adresse à Mr FEKIR, Y. enseignant à l'université Istanbouli, Mascara pour sa générosité, son aide précieuse dans le domaine de télédétection.

Je voudrais remercier aussi l'ensemble des enseignants de la première année Magistère de l'université Hassiba Ben Bouali (UHB) Chlef et notamment Mr MEZIANE N, Mr BRADAI H et Mr NEDJAI S. qui m'ont beaucoup aidé et orienté dans mon travail, ils étaient tout le temps disponibles et répondaient toujours avec joie à mes préoccupations. Enfin, je remercie mes collègues Magistrants et Doctorants qui m'ont énormément aidé et qui n'ont pas été avares pour toute information utile.

*À mon soleil et ma lune, chers père et mère qu'ils y
retrouvent le fruit de leurs sacrifices.*

À mes chers frères et sœurs qui sont toujours à côté de moi.

Table des matières

Remerciements

Table des matières

Résumé

ملخص

Abstract

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Recueil bibliographique	
I.1 Cycle de l'eau	3
I.1.1 Définition	3
I.1.2 Eléments du cycle de l'eau.....	3
I.1.3 Cycle de l'eau en milieu semi-aride.....	4
I.1.4 Cycle de l'eau autour des changements climatiques.....	5
I.1.5 L'écoulements et ses différents types.....	5
I.2 Quantification de l'apport liquide	6
I.2.1 Définition de l'apport liquide	6
I.2.2 Caractéristiques de l'écoulement	6
I.2.3 Facteurs influençant sur les écoulements	10

Table des matières

I.2.4 Méthodes de quantification de l'apport liquide.....	10
I.2.4.1 Mesures directes	10
I.2.4.2 Formules empiriques	11
I.2.4.2.1 Critères du choix du modèle empirique.....	17
I.2.4.3 Méthode analogique	18
I.3 Utilisation de l'outil statistique.....	19
I.3.1 Objectifs	19
I.3.2 Etapes de l'analyse fréquentielle.....	19
I.3.2.1 Contrôle statistique de la série des données	19
I.3.2.2 Tracé de la fonction de répartition empirique	21
I.3.2.3 Choix et ajustement du modèle fréquentiel	22
I.3.2.4 Contrôle de l'ajustement.....	25
I.3.7 Analyse multidimensionnelle.....	27
I.3.7.1 Définition de l'Analyse en composantes principales (ACP).....	27
I.3.7.2 Etapes de l'ACP	28
I.3.7.3 Choix des axes à retenir.....	29
I.3.8 Variabilité de l'apport liquide des cours d'eau	29
I.3.9 Rupture dans les séries hydrologiques d'observation	30
I.3.9.1 Définition de la variabilité des données hydrologiques.....	30
I.3.9.2 Méthodes de détection de rupture.....	30
I.3.9.3 Calcul des variations de la moyenne	33

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1 Localisation géographique.....	34
II.2 Relief	36
II.3 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques.....	37
II.3.1 Nouveau découpage des sous bassins versants de la Macta	39
II.4 : Etude climatique	42
II.4.1 : Précipitations	43
II.4.2 Température	45
II.4.3 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls.....	47
II.4.4 Climatogramme d'Emmberger	49
II.4.5 Indice d'aridité annuelle de DE MARTONE	50
II.5 Bilan hydrologique	52
II.5.1 L'évapotranspiration	52
II.5.1.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle "ETP"	52
II.5.1.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle "ETR" et l'excédent "EXC"	55
II.5 Cadre géologique.....	59
II.6 Occupation du sol	62
II.7 Ressources en eau	64
II.7.1 Ressources en eau souterraines	64
II.7.2 Ressources en eau superficielles	64
II.8 L'agriculture comme activité principale.....	66

Chapitre III : Collecte et traitement des données

III.1 Présentation des données.....	67
III.1.1 Données hydrométriques	67
III.1.1.1 Caractéristiques et localisation	67
III.1.2 Données pluviométriques	70
III.1.2.1 Caractéristiques et localisation	70
III.2 Traitement des données	73
III.2.1 Comblement des lacunes	73
III.2.1.1 Comblement des lacunes dans les séries hydrométriques	73
III.2.1.2 Comblement des lacunes dans les séries pluviométriques.....	75
III.2.2 Vérification des hypothèses « échantillon Indépendant et Identiquement Distribué » I.D.D.....	77
III.2.2.1 Vérification des données hydrométriques.....	77
III.2.2.2 Vérification des données pluviométriques.....	79
III.3 Ajustement des données hydrologiques à une loi de probabilité	75
III.3.1 Ajustement des données hydrométriques.....	81
III.3.1.1 Calcul des quantiles	83
III.3.2 Ajustement des données pluviométriques.....	85
III.3.2.1 Calcul des quantiles	87

Chapitre IV : Etude du régime hydro-pluviométrique

IV.1 Etude du régime pluviométrique.....	89
IV.1.1 Choix des séries pluviométriques et leurs périodes d'étude.....	89
IV.1.2 Distribution annuelle des précipitations	89

Table des matières

IV.1.3 Analyse en composantes principales des précipitations annuelles.....	92
IV.1.3.1 Résultats de l'ACP.....	92
IV.1.4 Distribution mensuelle des précipitations et régime saisonnier	97
IV.1.5 Détection de ruptures dans les séries pluviométriques.....	102
IV.2 Etude du régime hydrométrique.....	104
IV.2.1 Choix des séries hydrométriques et leurs périodes d'étude	104
IV.2.2 Variation des apports moyens annuels et interannuels.....	104
IV.2.3 Analyse en composantes principales des apports liquides	106
IV.2.3.1 Résultats de l'ACP.....	106
IV.2.4 Distribution des apports moyens mensuels et leurs caractéristiques statistiques...	111
IV.2.4.1 Coefficient mensuel de débits (CMD).....	111
IV.2.5 Détection de ruptures dans les séries hydrométriques.....	115
IV.3 Impact de la variabilité du régime pluviométrique sur le régime hydrométrique.....	117
Chapitre V : Etude de performance des modèles empiriques	
V.1 Objectif d'utilisation des formules empiriques	120
V.2 Application des modèles empiriques aux sous bassins versants de la Macta.....	120
V.3 Choix du modèle empirique	130
Chapitre VI : Analyse multidimensionnel des apports liquides du bassin versant Macta	
VI.1 Choix des variables	133
VI.1.1 Caractéristiques climatiques.....	133
VI.1.2 Caractéristiques morphométriques	133
VI.1.3 Caractéristiques physio-lithologiques	134
VI.2 Caractéristiques des sous bassins versant de la Macta selon les variables retenues	134

Table des matières

VI.3 Analyse en composantes principales des apports liquides	150
VI.1.3.1 Résultats de l'ACP	150
VI.4 Etude de la relation apport liquide- Géomorphométrie.....	154
VI.4.1 La régression linéaire multiple (RLM).....	154
VI.4.1.1 Méthode de régression pas à pas	154
VI.4.1.2 Application de la méthode de régression pas à pas	155
VI.4.1.3 Validation du modèle de régression retenu	156
Conclusion générale & recommandations	158

Références bibliographiques

Annexes

Annexe 1 : Synthèse de la régression linéaire des débits liquides au droit des stations hydrométriques.

Annexe 2 : Synthèse de la régression linéaire des précipitations mensuelles enregistrées aux stations pluviométrique.

Annexe 3 : Résultats des tests des hypothèses I.D.D des séries des stations hydrométriques.

Annexe 4 : Résultats des tests des hypothèses I.D.D des séries des stations pluviométriques.

Annexe 5 : Ajustement des apports liquides annuels aux lois de distribution.

Annexe 6 : Ajustement des précipitations annuelles aux lois de distribution.

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma du cycle général de l'eau	4
Figure I.2 : différents types d'écoulement	6
Figure I.3 : Principe de la méthode de l'interpolation linéaire	18
Figure I.4 : Etapes de l'Analyse fréquentielle	19
Figure I.5 : Etapes de l'Analyse en composantes principales	29
Figure II.1 : Localisation géographique du bassin versant de la Macta.....	35
Figure II.2 : Modèle numérique du terrain et réseau hydrographique du bassin versant de la Macta.....	37
Figure II.3 : Sous bassins versants de la Macta et réseau hydrographique.....	39
Figure II.4 : Nouvelle délimitation des sous bassins versants de la Macta	40
Figure II.5 : Localisation des stations climatologiques utilisées dans le bassin versant de la Macta.....	43
Figure II.6 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Matmore (Mascara).....	45
Figure II.7 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Saida	46
Figure II.8 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Sidi Belabbes	46
Figure II.9 : Diagramme ombrothémique à la station de Matmore (Mascara)	47
Figure II.10 : Diagramme ombrothémique à la station de Saida	48
Figure II.11 : Diagramme ombrothémique à la station de Sidi Belabbes.....	48
Figure II.12 : Quotient pluviométrique des stations climatologiques utilisées sur le climatogramme d'EMBERGER.....	50

Figure II.13 : Diagramme de DE MARTONE des trois stations climatologiques	51
Figure II.14 : Carte géologique du bassin versant de la Macta.....	60
Figure II.15 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Macta.....	63
Figure II.16 : Ressources en eau superficielles et souterraines dans le bassin versant de la Macta.....	65
Figure III.1 : Localisation des stations hydrométriques dans le bassin versant de la Macta ..	69
Figure III.2 : Localisation des stations pluviométriques dans le bassin versant de la Macta .	72
Figure III.3 : Ajustement des apports liquides moyens annuels de la station 110101 à la loi racine normale (RN).....	83
Figure III.4 : Ajustement des précipitations annuelles de la station 110102 à la loi log normale (LN3).....	86
Figure IV.1 : Précipitation moyenne interannuelle enregistrées aux stations pluviométriques.....	89
Figure IV.2 : Projection des variables pluviométriques sur les plans (CP1xCP2).....	95
Figure IV.3 : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2).....	96
Figure IV.4 : Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP2)	110
Figure IV.5 : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)	110
Figure IV.6 : Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP3)	111
Figure V.1 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Mekerra amont.....	121
Figure V.2 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Mekerra moyen.....	121
Figure V.3 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Mekerra aval .	122
Figure V.4 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Sarno amont..	122
Figure V.5 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Louza	123

Figure V.6 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Hounet	123
Figure V.7 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Saida (PN03).....	124
Figure V.8 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Saida (PK50)..	124
Figure V.9 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Saida	125
Figure V.10 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Bouchikhi ...	125
Figure V.11 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Sidi Mimoun.....	126
Figure V.12 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Taria.....	126
Figure V.13 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Khalouia	127
Figure V.14 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Ghriss.....	127
Figure V.15 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Fekane.....	128
Figure VI.1 : Projection des variables et des individus sur les plans (CP1xCP2)	153

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Eléments du cycle de l'eau	3
Tableau I.2 : Valeurs du coefficient K_{moy} en fonction de l'altitude	15
Tableau I.3 : Récapitulatif des formules empiriques utilisées	16
Tableau I.4 : Récapitulatif des lois de probabilités utilisées en hydrologie	23
Tableau II.1 : Principales caractéristiques des sous bassins versants de la Macta	38
Tableau II.2 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du nouveau découpage du bassin versant de la Macta.....	41
Tableau II.3 : Caractéristiques des stations climatologiques.....	42
Tableau II.4 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Matmore.....	44
Tableau II.5 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Saida	44
Tableau II.6 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Belabbes	44
Tableau II.7 : Valeurs du quotient pluviométrique Q_2 des trois stations climatologiques	49
Tableau II.8 : Classification du climat selon l'indice (I) d'aridité de DE MARTONNE	51
Tableau II.9 : Indice d'aridité (I) annuelle de DE MARTONE des trois (03) stations climatologiques	51
Tableau II.10 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Matmore.....	53
Tableau II.11 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Saida.....	54
Tableau II.12 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Sidi Belabbes	54
Tableau II.13 : Bilan hydrique à la station de Matmore selon Thornthwaite	56
Tableau II.14 : Bilan hydrique de la station à la station de Saida selon Thornthwaite.....	56
Tableau II.15 : Bilan hydrique à la station de Sidi Belabbes selon Thornthwaite.....	57

Tableau II.16 : Stratigraphie du bassin versant de la Macta.....	61
Tableau II.17 : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol dans le bassin versant de la Macta	62
Tableau II.18 : Ressources en eau dans le bassin versant de la Macta	64
Tableau II.19 : Caractéristiques des barrages existants dans le bassin versant de la Macta.....	64
Tableau II.20 : Périmètres irrigués existants dans le bassin versant de la Macta.....	66
Tableau III.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues dans le bassin versant de la Macta	68
Tableau III.2 : Caractéristiques des stations pluviométriques retenues dans le bassin versant de la Macta	71
Tableau III.3 : Synthèse de la régression linéaire entre la station hydrométrique 110101 et 110201	74
Tableau III.4 : Synthèse de la régression linéaire entre la station pluviométrique 110102 et la station 110203	76
Tableau III.5 : Résultats des tests de vérification des hypothèses I.D.D à la station hydrométrique 110101	78
Tableau III.6 : Résultats des tests de vérification des hypothèses I.D.D à la station pluviométrique 110102	80
Tableau III.7 : Résultats d'ajustement des stations hydrométriques de la Macta aux lois de distribution	82
Tableau III.8 : Equations des droites d'ajustement des séries hydrométriques.....	84
Tableau III.9 : Apports liquide des oueds de la Macta pour différentes périodes de retour....	84
Tableau III.10 : Résultats d'ajustement des stations pluviométriques de la Macta aux lois de distribution	85
Tableau III.11 : Equations des droites d'ajustement des séries pluviométriques.....	87
Tableau III.12 : Hauteur pluviométrique (mm) pour différentes périodes de retour.....	88

Tableau IV.1 : Caractéristiques des séries pluviométrique annuelles dans le bassin versant de la Macta	90
Tableau IV.2 : Valeurs propres et variances expliquées	92
Tableau IV.3 : Matrice de corrélation entre les variables	93
Tableau IV.4 : Projection des variables sur les principaux axes.....	94
Tableau IV.5 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières enregistrées au niveau des stations pluviométriques.....	98
Tableau IV.6 : Régime saisonnier des précipitations dans le bassin versant de la Macta	101
Tableau IV.7 : Résultats des tests d’homogénéité et années de ruptures dans les séries pluviométriques annuelles étudiées	103
Tableau IV.8 : Caractéristiques hydrologiques des stations hydrométriques du bassin versant de la Macta	105
Tableau IV.9 : Valeurs propres et variances expliquées.....	106
Tableau IV.10 : Matrice de corrélation entre les variables	108
Tableau IV.11 : Projection des variables sur les principaux axes.....	109
Tableau IV.12 : Répartition des débits moyens mensuels (m^3/s) et leurs caractéristiques statistiques	112
Tableau IV.13 : Résultats des tests d’homogénéité et années de ruptures dans les séries hydrométriques annuelles étudiées.....	116
Tableau IV.14 : Synthèse du taux de variation du régime pluviométrique sur le régime hydrométrique des oueds de la Macta	118
Tableau V.1 : Résultats de calcul de l’apport moyen interannuel par les modèles empiriques... ..	129
Tableau V.2 : Résultats des critères de Nash, R^2 et RMSE appliqués aux sous bassins versants étudiés de la Macta.....	131

Tableau VI.1 : Synthèse des paramètres caractéristiques du sous bassin versant Mekerra amont (SBV1)	135
Tableau VI.2 : Synthèse des paramètres caractéristiques du sous bassin versant Mekerra moyen (SBV2).....	136
Tableau VI.3 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Sarno amont (SBV3A)	137
Tableau VI.4 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Mekerra aval (SBV3B).....	138
Tableau VI.5 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Louza (SBV5)	139
Tableau VI.6 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Hounet (SBV10).....	140
Tableau VI.7 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Saida PN03 (SBV11A).....	141
Tableau VI.8 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Saida PK50 (SBV11B).....	142
Tableau VI.9 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Saida (SBV11C).....	143
Tableau VI.10 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Sidi Mimoun (SBV12A)	144
Tableau VI.11 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Domaine Bouchikhi (SBV12B)	145
Tableau VI.12 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Taria (SBV12C)	146
Tableau VI.13 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Khalouia (SBV14A).....	147

Tableau VI.14 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Ghriss (SBV14B)	148
Tableau VI.15 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Ain Fekan (SBV14C)	149
Tableau VI.16 : Valeurs propres et variances expliquées.....	150
Tableau VI.17 : Matrice de corrélation entre les variables.....	151
Tableau VI.18 : Projection des variables sur les axes factoriels.....	152
Tableau VI.19 : Modèles régressifs obtenus.....	155
Tableau VI.20 : Coefficients de corrélation partielle de chaque modèle	156
Tableau VI. 21 : Critères de validité du modèle	157

Liste des abréviations

ABH O.C.C	: Agence du Bassin Hydrique Oranais Chott Chergui
ACP	: Analyse en composantes principales
AHPE	: Automne Hiver Printemps Eté
AIC	: Akaike information criterium
ANBT	: Agence Nationale des Barrages et des Transferts
ANRH	: Agence nationale des ressources hydriques
APHE	: Automne Printemps Hiver Eté
BIC	: Bayesian information criterium
CMD	: Coefficient mensuel de débit
Cv	: Coefficient de variation
D	: Déficit hydrique
ENVI	: Environment for Visualizing Images
ETP	: Evapotranspiration potentielle
ETR	: Evapotranspiration réelle
EXC	: Excédent
HAPE	: Hiver Automne Printemps Eté
HPAE	: Hiver Printemps Automne Eté
I	: Indice d'aridité annuelle de DE MARTONE
IPCC	: International Panel for Climate Change
MNT	: Modèle numérique du terrain
ONM	: Organisme National de Météorologie
OMM	: Organisme Mondial de Météorologie
PHAE	: Printemps Hiver Automne Eté
RFU	: Réserve facilement utilisable
RMSE	: Root Mean Square Error
Var	: Taux de variation de la moyenne

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'eau est reconnue comme facteur de développement, et si l'on ne prend pas garde, cette ressource naturelle risque à terme de s'imposer comme « facteur limitant » pour le développement économique. Actuellement, la gestion de la ressource en eau revêt un sujet de première importance. Cependant, on ne peut bien gérer une ressource que quand elle est connue.

En Algérie, il faut rappeler l'importance que revêt la connaissance de la ressource en eau où le déséquilibre des pluies et par conséquent les apports liquides des oueds est très prononcé. Depuis les années soixante-dix, une variabilité climatique marquée par une réduction de précipitations a frappé le milieu méditerranéen et en Algérie, la région ouest a été particulièrement la plus touchée ([Meddi et Hubert, 2003](#) ; [Achite et Touaibia, 2007](#) et [Meddi *et al.*, 2009](#)).

Le bassin versant de la Macta, situé au nord-ouest de l'Algérie n'a pas été épargné de ce phénomène qui ne cesse de causer l'épuisement des ressources en eau mobilisables pour une population sans cesse croissante et dont la conséquence pèse lourdement sur l'activité agricole, économique et sociale. Les potentialités du bassin versant de la Macta en eau superficielle sont évaluées à environ 227 HM³/an ([ABH, 2013](#)), mobilisées par cinq (05) barrages dont 57 % se déversent dans la mer par l'intermédiaire du marais de la Macta.

La gestion rationnelle et durable de la ressource en eau n'est possible que sur la base d'un concept d'évaluation hydrologique fondé. Ainsi, La ressource en eau peut être estimée avec une précision plus ou moins grande suivant la disponibilité des données hydroclimatiques et physiques. Mais les erreurs faites sur ces estimations peuvent entraîner, soit une mauvaise utilisation de la ressource, soit une dépense inutile.

Dans ce contexte, le recours à des outils mathématiques (modèle linéaire ou autre) s'avère nécessaire en cas de non disponibilité des données. En outre, l'utilisation des outils de type statistique permet de mieux cerner la variabilité des distributions hydrologiques étudiées, en leur donnant une signification physique.

Le présent travail a pour objectif l'évaluation des ressources en eau superficielles des sous bassins jaugés de la Macta en vue de recommander une gestion rationnelle et durable et de mettre en évidence les relations liants l'apport liquide aux caractéristiques hydroclimatiques et physiques.

Il est structuré en six (06) chapitres :

- le premier est une synthèse bibliographique, ayant servi de base à notre étude,
- le second est une description détaillée du bassin versant de la Macta: la situation géographique, les grands traits climatiques, hydrographiques, géologiques et hydrogéologiques,
- le troisième chapitre décrit le réseau d'observation installé dans le bassin versant de la Macta et expose les données utilisées (données hydrométriques de seize (16) stations et des données pluviométriques de vingt (20) stations) ainsi que la critique et le traitement qu'elles subissent,
- le quatrième chapitre porte sur l'étude du régime des précipitations et des apports liquides. S'ensuit une évaluation de la répercussion des changements du régime pluviométrique sur les apports liquide des oueds de la Macta,
- le cinquième chapitre expose la performance des modèles empiriques de calcul des apports liquides, par rapport à l'apport liquide mesuré au droit des stations hydrométriques du bassin versant de la Macta. Des modèles pouvant être utilisés en cas d'absence de mesure.
- le dernier chapitre porte sur deux approches :
 - l'analyse multidimensionnelle des sous bassins jaugés de la Macta en fonction des caractéristiques hydroclimatiques, physiques et biogéographiques afin de montrer les affinités entre les régions de la Macta et déceler les facteurs influençant les apports liquides des oueds,
 - développement des modèles efficaces de calcul de l'apport liquide spécifiques à chaque région par une régression linéaire multiple (RLM).

CHAPITRE I :

RECUEIL BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Recueil bibliographique

Introduction

Ce chapitre rassemble tous les termes utilisés dans ce travail, il englobe trois (03) points essentiels à savoir, le cycle de l'eau et les changements climatiques en climat semi-aride, les méthodes de quantification des apports liquides et l'utilisation de l'outil statistique dans l'évaluation des apports liquides.

I.1 Cycle de l'eau

I.1.1 Définition

Le cycle de l'eau est l'ensemble des cheminements parcourus par une particule d'eau à la surface du globe (Bois, 2000). Ces mouvements accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol dont chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle (Laborde, 2000).

I.1.2 Eléments du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est composé de quatre (04) éléments indiqués dans le tableau I.1 et la figure I.1.

Tableau I.1 : Eléments du cycle de l'eau

Eléments du cycle	Précipitation	Ruissellement	Evapotranspiration	Infiltration
Source d'énergie	Atmosphère	Gravité	Atmosphère (radiation, advection)	Rétention hydrique (capillarité, adsorption)
Facteur du milieu	Topographie	Topographie, morphologie, couvert végétal,...	Climat, stade végétatif,...	Texture et structure (surface, sol, sous sol),...

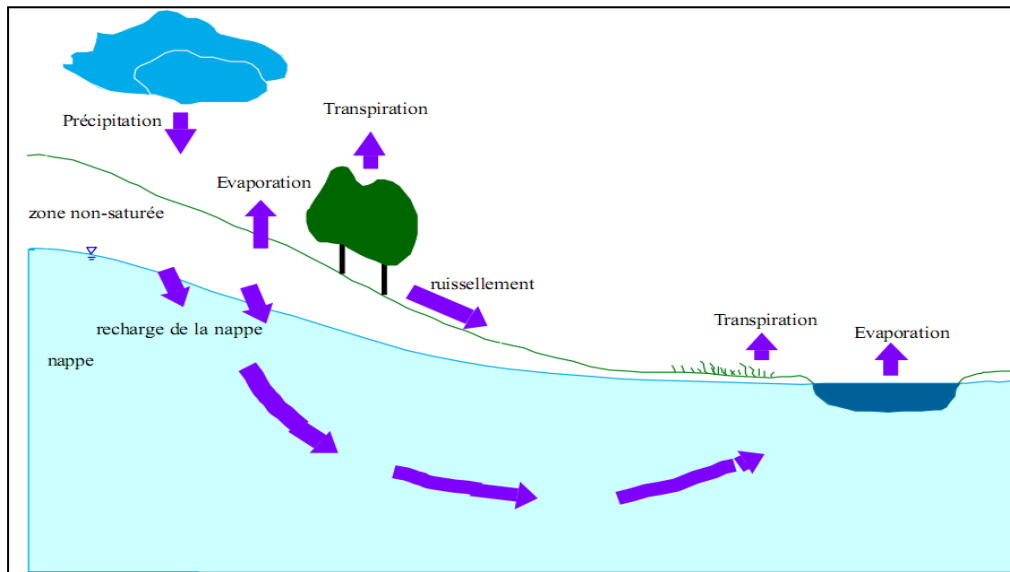


Figure I.1 : Schéma du cycle général de l'eau (Source : Merrien Soukatchoff, 2004)

I.1.3 Cycle de l'eau en milieu semi-aride

En milieu semi-aride le cycle hydrologique présente des particularités où l'eau est une ressource limitée (Chaponnière, 2005). Cependant, il est caractérisé par :

- ☞ La brièveté des événements (courte durée, forte intensité et hétérogénéité spatiale et temporelle) (Chaponnière, 2005).
- ☞ L'évaporation du sol nu a souvent un poids supérieur à la transpiration des plantes sous ce type de climat et peut recycler jusqu'à 80% des précipitations (Pilgrim *et al.*, 1988 in Chaponnière, 2005).
- ☞ Le ruissellement de surface (hortonien) a lieu pendant et juste après un événement pluvieux et il contribue à la génération des débits de façon majoritaire. Ce type de ruissellement est dû aux fortes intensités des événements, conjuguées à la faible capacité d'infiltration des sols. La nappe étant souvent située loin en profondeur, déconnectée de l'hydrologie de surface (Pilgrim *et al.*, 1988 in Chaponnière, 2005).
- ☞ Les pertes par infiltration dans le lit des oueds peuvent représenter des volumes d'eau importants qui expliquent parfois une diminution avale du débit. Elles représentent le principal mécanisme de recharge des aquifères (Chaponnière, 2005).

I.1.4 Cycle de l'eau autour des changements climatiques

Les études les plus récentes de l'IPCC (International Panel for Climate Change) montrent que la température de la terre a été augmentée de 0,74°C au cours des 100 dernières années et pourrait augmenter de 1,5 à 6°C d'ici à 2100 (GIEC, 2007).

Les conséquences de ce réchauffement sont :

- ✓ Augmentation des précipitations et par conséquent le débit des cours d'eau dans les hautes latitudes et leur diminutions dans les plus basses latitudes, en particulier dans la région méditerranéenne et les zones subtropicales.
- ✓ L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes tels que les inondations et tsunamis (Ducharne *et al.*, 2003).
- ✓ La hausse du niveau de la mer (Ducharne *et al.*, 2003).
- ✓ Le risque d'épisodes de sécheresse notamment dans des pays qui souffrent déjà d'un climat sec et qui doivent avoir un recours à l'irrigation pour pouvoir subvenir aux besoins alimentaires de leurs populations (Ducharne *et al.*, 2003).

I.1.5 l'écoulement et ses différents types

Les écoulements peuvent être générés par une combinaison de processus reposant sur la notion de capacité d'infiltration du sol. Cependant, on distingue :

- ☞ **Écoulement de surface (Hortonien)**, apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité maximale du sol à absorber l'eau (Musy et Higy, 1998).
- ☞ **Écoulement de base ou souterrain**, après percolation, l'eau transite à travers l'aquifère pour rejoindre le cours d'eau souvent par le biais d'un phénomène de résurgence de la nappe (Musy et Higy, 1998).
- ☞ **Écoulement de subsurface (hypodermique)**, apparaît dans les couches peu profondes du sol, et se caractérise principalement par un mouvement latéral de l'eau suite à un processus d'infiltration (Musy et Higy, 1998).
- ☞ **Écoulement sur surfaces saturées**, qui se produit lorsque la capacité du sol à stocker et à transmettre latéralement le flux de l'eau est épuisée. Par conséquent, l'eau va s'écouler en surface (Musy et Higy, 1998).

☞ Précipitations directes à la surface des cours d'eau.

Les différents types d'écoulement sont schématisés dans la figure I.2

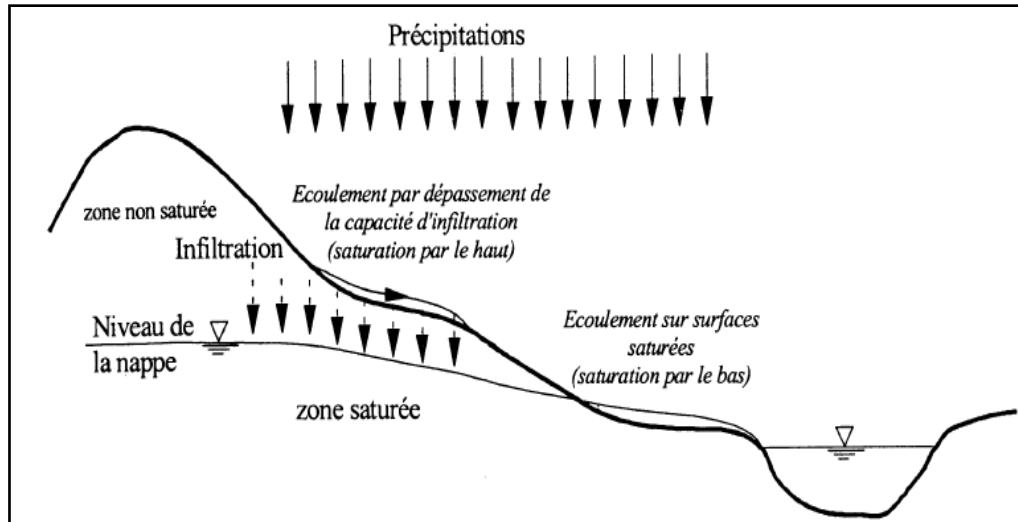


Figure I.2 : Différents types d'écoulement (Source : [Musy et Higy, 1998](#))

I.2 Quantification de l'apport liquide

I.2.1 Définition de l'apport liquide

L'apport liquide est un terme purement hydrologique, il représente le volume d'eau recueilli pendant une durée déterminée généralement rattachée au mois, à la saison ou à l'année en m^3 ou Hm^3 .

Cependant, on distingue : l'apport mensuel, saisonnier, annuel ou interannuel.

I.2.2 Caractéristiques de l'écoulement

En hydrologie, chaque cours d'eau est caractérisé par :

a. Débit moyen annuel Q_{0a} (m^3/s)

Appelé aussi module d'écoulement annuel M_e , qui est la moyenne des débits mensuels Q_{imens} du cours d'eau. Il est donné par:

$$Q_{0a} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_{imens} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

Q_{imens} : débit moyen mensuel (m^3/s).

b. Apport moyen annuel A_{0a} (m^3)

Il représente le volume d'eau moyen apporté par l'oued pendant une année. Il est donné par :

$$A_{0a} = Q_{0a} \cdot T \quad (I.2)$$

Avec :

Q_{0a} : Débit moyen annuel (m^3/s).

T : Nombre de seconde en une année (s).

c. Débit moyen interannuel Q_0 (m^3/s)

C'est le débit moyen observé pendant un certain nombre d'année. Il est donné par :

$$Q_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{0ai} \quad (I.3)$$

Avec :

Q_{0ai} : Débit moyen annuel de l'année i (m^3/s).

N : Nombre des années observé.

d. Apport moyen interannuel A_0 (m^3)

Il représente le volume d'eau moyen apporté par l'oued pendant un certain nombre d'années. Il est donné par :

$$A_0 = Q_0 \cdot N \quad (I.4)$$

Avec :

Q_0 : Débit moyen interannuel (m^3/s).

N : Nombre des années observé.

Le calcul de l'apport moyen interannuel est très utile dans la régularisation interannuelle des débits pour combler le déficit en eau de plusieurs années.

e. lame d'eau écoulée L_e (mm)

C'est la hauteur d'eau répartie uniformément sur une surface plane égale à celle du bassin versant et de volume égal au volume annuel des apports. Elle est donnée par :

$$L_e = \frac{A_{0a}}{S} \quad (I.5)$$

Avec :

A_{0a} : Apport moyen annuel (m^3).

S : Surface du bassin versant (Km^2).

f. Module de l'écoulement spécifique M_0 ($\ell/s.Km^2$)

Appelé aussi module d'écoulement relatif. Il représente le débit moyen annuel d'un cours d'eau par unité de surface. Il est donné par :

$$M_0 = \frac{Q_{0a}}{S} \quad (I.6)$$

Avec :

Q_{0a} : Débit moyen annuel (m^3/s).

S : Surface du bassin versant (Km^2).

g. Coefficient d'écoulement C_e

C'est le rapport de la lame écoulée à la lame d'eau précipitée. Il est donné par :

$$C_e = \frac{L_e}{L_p} \quad (I.7)$$

Avec :

L_e : lame d'eau écoulée (mm).

L_p : lame d'eau précipitée (mm).

h. Déficit d'écoulement D (mm)

C'est la quantité d'eau perdue par infiltration, évaporation et évapotranspiration. Il est donné par :

$$D = L_p - L_e \quad (I.8)$$

Avec :

L_p : Lamme d'eau précipitée (mm).

L_e : Lamme d'eau écoulee (mm).

i. Coefficient du débit (hydraulicité) K_i

L'hydraulicité mesure l'irrégularité interannuelle des apports liquides, il est donné par :

$$K_i = \frac{Q_{0ai}}{Q_0} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

Q_{0ai} : Débit moyen annuel de l'année i (m^3/s).

Q_0 : Débit moyen interannuel (m^3/s).

Si : $K_i > 1$; l'année est humide ; $K_i = 1$; l'année est moyenne ; $K_i < 1$; l'année est sèche.

j. Coefficient d'immodération R

Est le rapport entre le débit annuel maximal et minimale enregistrés au cours de la période d'observation. Il est donné par la formule suivante :

$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

Q_{\max} : Débit maximal (m^3/s).

Q_{\min} : Débit minimal (m^3/s).

h. Coefficient mensuel du débit (CMD)

Il permet de comparer les variations mensuelles du régime des oueds (Hebal, 2011).

$$CMD = \frac{Q_{\text{mens}}}{Q_0} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

Q_{mens} : Débit moyen mensuel interannuel (m^3/s).

Q_0 : Débit moyen interannuel (m^3/s).

Si : $CMD < 1$, il correspond aux mois de basses eaux.

$CMD > 1$, il correspond aux mois de hautes eaux.

I.2.3 Facteurs influençant sur les écoulements

La réponse hydrologique à l'exutoire d'un bassin versant est sans doute un débit liquide dont la pluviométrie est le principal intervenant, combinée à plusieurs facteurs comme :

- Etats de surface (géologie et relief du bassin, couverture végétale, ...) qui influencent la productivité des écoulements (Latron et Gallart, 2008).
- Les activités humaines telles que les caractéristiques physiographiques (pente, pédologie, occupation du sol...) qui jouent un rôle important dans la distribution spatiale de la production des écoulements (Akognongbé, 2009).

I.2.4 Méthodes de quantification de l'apport liquide

I.2.4.1 Mesures directes

Ces mesures sont effectuées sur terrain par un ensemble de techniques appelées l'hydrométrie. Les mesures directes sont nombreuses et le choix de la méthode de mesure dépend de la nature de l'écoulement dans le cours d'eau (crue, étiage). Cependant on distingue :

- ☞ Jaugeage par exploration du champ de vitesses.
- ☞ Jaugeage au flotteur.
- ☞ Jaugeage chimique.
- ☞ Jaugeage par déversoir.

Généralement, au niveau des stations hydrométriques, il n'existe pas de mesure directe de débit mais d'un enregistrement continu des variations de la hauteur d'eau en une section donnée. La courbe obtenue est la courbe des hauteurs d'eau en fonction du temps $H = f(t)$ qui sera transformée en courbe des débits $Q = f(t)$.

La section de mesure au droit de la station hydrométrique comporte une échelle limnimétrique inclinée pour faciliter la lecture. Un limnigraphe est installé à l'intérieur de la

station hydrométrique qui fournit sur un support (papier) un enregistrement continu des variations du niveau du cours d'eau.

I.2.4.2 Formules empiriques

Elles sont couramment utilisées en cas d'absence de stations hydrométriques ou de mesure in situ. **Penk** est le pionnier sur les recherches des apports liquides (Sogreah, 1986-1989 in Baahmed, 2004), sa formule générale s'écrit sous la forme :

$$y = C_e \cdot (\bar{P} - P_{\min}) \quad (\text{I.12})$$

Avec :

y : Écoulement moyen annuel (mm).

\bar{P} : Pluie moyenne annuelle (mm).

P_{\min} : Pluie minimale annuelle pour laquelle il y a un écoulement (mm).

C_e : Coefficient d'écoulement.

a. Formule de MALLET et GAUTHIER (1947)

L'équation s'écrit sous la forme :

$$L_e = 0,6\bar{P}(1 - 10^{-0,36\bar{P}^2}) \quad (\text{I.13})$$

Où :

L_e : Lamme d'eau écoulée annuelle (mm).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

b. Formule de MEDINGER (1948)

La formule a été établie dans les conditions suivantes: $410\text{mm} < P < 630\text{mm}$ et $139\text{Km}^2 < S < 7854\text{Km}^2$. Et s'écrit sous la forme :

$$Q = 0,75(\bar{P} - 400)^2 \quad (\text{I.14})$$

Où :

Q : Lamme d'eau écoulée annuelle (mm).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

c. Formules de COUTAGNE (1949)

La formule a été établie dans les conditions suivantes : $400mm < P < 600mm$ et s'écrit sous la forme :

$$Q = 1,024(\bar{P} - 0,26)^2 \quad (\text{I.15})$$

Où :

Q : Lamme d'eau écoulee annuelle (m).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (m).

d. Formule de SAMIE (1956)

Elle a été appliquée sur 12 bassins versant dont : $300mm < \bar{P} < 500mm$ (CNEA, 2003 in Souadi, 2011), sous la forme:

$$L_e = \bar{P}^2 (293 - 2,2\sqrt{S}) \quad (\text{I.16})$$

Avec :

L_e : Lamme d'eau écoulee annuelle (mm).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

S : Surface du bassin versant (Km^2).

e. Formule de DERI (1977)

Cette formule a été établie sous les conditions suivantes : $386mm < P < 1400mm$ et $102Km^2 < S < 4000Km^2$ et s'écrit sous la forme:

$$M_0 = 11,8\bar{P}^{-2,82} \quad (\text{I.17})$$

Où :

M_0 : Module spécifique annuel ($\ell/s.Km^2$).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (m).

f. Formule de DERI II

L'équation s'écrit sous la forme:

$$A_0 = 0,513.\bar{P}^{-2,683}.Dd.S^{0,842} \quad (\text{I.18})$$

Où :

A_0 : Apport moyen annuel (m^3).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

Dd : Densité de drainage (Km/Km^2).

S : Surface du bassin versant (Km^2).

g. Formule de l'INRH

L'équation s'écrit sous la forme:

$$A_0 = 0,915.\bar{P}^{-2,684}.S^{0,842} \quad (\text{I.19})$$

Avec :

A_0 : Apport moyen annuel (m^3).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

S : Surface du bassin versant (Km^2).

h. Formule de TURC

L'équation s'écrit sous la forme :

$$L_e = \bar{P} - \frac{\bar{P}}{\sqrt{0,9 + \frac{\bar{P}^2}{L^2}}} \quad (\text{I.20})$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (\text{I.21})$$

Où :

L_e : Lamme d'eau écoulée annuelle (mm).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle ($^{\circ}\text{C}$).

i. Formule de TIXERONT

La formule s'écrit sous la forme :

$$c_e = \frac{\sqrt{\bar{P}^3 - E_v - E_v}}{\bar{P}} \quad (\text{I.22})$$

$$L_e = C_e \cdot \bar{P} \quad (\text{I.23})$$

Où :

c_e : Coefficient d'écoulement.

E_v : Evaporation moyenne annuelle (mm).

L_e : Lamme d'eau écoulée annuelle (mm) ;

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

j. Formule de CHAUMONT (1963)

La formule a été appliquée sur 60 bassins versants Algériens et Tunisiens ([Sogreah, 1986-1989](#) in [Baahmed, 2004](#)) et s'écrit sous la forme :

$$L_e = S \cdot \bar{P} \cdot (1 - 10^{-k \bar{P}^2}) \quad (\text{I.24})$$

$$k = a - 0,01 \log(S) \quad (\text{I.25})$$

Où :

L_e : Lamme d'eau écoulée annuelle (mm) ;

S : Surface du bassin versant (Km^2).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

a : Coefficient dépendant des conditions d'écoulement ($a = 0,2$ dans les régions à écoulement favorable, $a = 0,175$ dans les régions à écoulement défavorable).

k. Formule de CORDONNA

L'équation s'écrit sous la forme :

$$D = K(\bar{P} + C) \quad (\text{I.26})$$

$$L_e = \bar{P} - D \quad (\text{I.27})$$

Où :

D : Déficit d'écoulement (m).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

L_e : Lamme d'eau écoulee (mm).

K,C : Constantes égales à 0,941 et 9,1 respectivement.

l. Formule de PADOUN (1973)

Cette équation est définie sous la condition $200\text{mm} < \bar{P} < 900\text{mm}$ et s'écrit sous la forme :

$$Q = K_{\text{moy}} (0,0019\bar{P})^{3,57} \quad (\text{I.28})$$

Où :

Q : Lamme d'eau écoulee annuelle (l/s.Km²).

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

K_{moy} : Coefficient caractérisant le degré d'influence de l'altitude moyenne du bassin versant sur l'écoulement (tableau I.2).

Tableau I.2 : Valeurs du coefficient K_{moy} en fonction de l'altitude

Altitude moyen (m)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
K_{moy}	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,28
Altitude moyen (m)	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	
K_{moy}	1,32	1,36	1,40	1,44	1,49	1,54	1,59	1,64	1,70	

(Source : [Kabouya, 1990](#))

m. Formule de SOGREAH

L'équation s'écrit sous la forme:

$$L_e = 720 \cdot \left(\frac{\bar{P} - 150}{1000} \right)^{1,85} \quad (\text{I.29})$$

Où :

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

L_e : Lamme d'eau écoulee annuelle (mm).

L'ensemble des formules empiriques sont récapitulées dans le tableau I.3.

Tableau I.3 : Récapitulatif des formules empiriques utilisées

N°	Nom de la Formule	Formule	Paramètres	Domaine d'application	Référence
1	MALLET et GAUTHIER	$L_e = 0,6\bar{P}(1 - 10^{-0,36\bar{P}^2})$	\bar{P}	/	(MATHE, 2003)
2	MEDINGER	$Q = 0,75(\bar{P} - 400)^2$	\bar{P}	$410mm < P < 630mm$ $139Km^2 < S < 7854Km^2$	(Kabouya, 1990)
3	COUTAGNE	$Q = 1,024(\bar{P} - 0,26)^2$	\bar{P}	$400mm < P < 600mm$	(CNEA, 2003 dans Souadi, 2011)
4	SAMIE	$L_e = \bar{P}^2 (293 - 2,2\sqrt{S})$	\bar{P}	$300mm < \bar{P} < 500mm$	(Kabouya, 1990)
5	DERI	$M_0 = 11,8\bar{P}^{2,82}$	\bar{P}	$386mm < P < 1400mm$ $102Km^2 < S < 4000Km^2$	(Kabouya, 1990)
6	DERI II	$A_0 = 0,513.\bar{P}^{2,683} .Dd.S^{0,842}$	\bar{P}, Dd, S	/	(Touaibia, 2004)
7	INRH	$A_0 = 0,915.\bar{P}^{2,684} .S^{0,842}$	\bar{P}, S	/	(Kabouya, 1990)
8	TURC	$L_e = \bar{P} - \frac{\bar{P}}{\sqrt{0,9 + \frac{\bar{P}^2}{L^2}}}, L = 300 + 25T + 0,05T^3$	\bar{P}, T	/	(OMM, 1994)
9	TIXERONT	$c_e = \frac{\sqrt{\bar{P}^3 - Ev - Ev}}{\bar{P}}, L_e = C_e.\bar{P}$	\bar{P}, Ev	/	(Touaibia, 2004)
10	CHAUMONT	$L_e = S.\bar{P}.(1 - 10^{-k\bar{P}^2}), k = a - 0,01\log(S)$	S, \bar{P}, k, a	/	(Sogreah., 1986-1989 dans Baahmed, 2004)
11	CORDONNA	$D = K(\bar{P} + C), L_e = \bar{P} - D$	\bar{P}, K, C	/	(Sogreah, 1986-1989 dans Baahmed, 2004)
12	PADOUN	$Q = K_{moy}(0,0019\bar{P})^{3,57}$	K_{moy}, \bar{P}	$200mm < \bar{P} < 900mm$	(Kabouya, 1990)
13	SOGREAH	$L_e = 720.\left(\frac{\bar{P} - 150}{1000}\right)^{1,85}$	\bar{P}	/	(MATHE, 2003)

I.2.4.2.1 Critères du choix du modèle empirique

Le choix du modèle empirique est une appréciation qualitative des résultats exprimés par des critères. Cependant, il existe :

➤ Coefficient de détermination R^2

Il constitue l'outil le plus ancien et le plus largement utilisé qui étudie les liaisons entre deux (02) ou plusieurs variables (Touaibia, 2004). Il est défini par la relation suivante :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{I.30})$$

Avec :

\bar{x}, \bar{y} : Moyennes arithmétiques des variables observés et calculés respectivement.

x_i, y_i : Variable observée et calculée pour l'année i respectivement.

➤ Critère de Nash

D'après Ardoin (2000), Ce critère adimensionnel, a été proposé par Nash et Sutcliffe en 1970. Il est couramment utilisé en hydrologie et défini par :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_{ci} - A_{0i})^2}{\sum_{i=1}^n (A_{0i} - A_0)^2} \quad (\text{I.31})$$

Avec :

A_{ci} : Apport moyen calculé de l'année i (Hm^3).

A_{0i} : Apport moyen observé de l'année i (Hm^3).

A_0 : Apport moyen interannuel observé (Hm^3).

Si :

☞ $Nash \geq 0$, le modèle empirique prédit mieux les valeurs observées (Szczypta, 2012).

☞ $Nash < 0$, signifie que le modèle utilisé n'est pas adéquat (Szczypta, 2012).

☞ Plus Nash est proche de 1, plus les valeurs données par le modèle empirique sont proches des observations.

➤ Critère de RMSE

C'est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**), il est défini par:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_{ci} - A_{0i})^2} \quad (I.32)$$

Avec :

N : Nombre d'années d'observation.

A_{ci} : Apport moyen calculé de l'année i (Hm^3).

A_{0i} : Apport moyen observé de l'année i (Hm^3).

Le modèle empirique est meilleur d'autant plus que le critère RMSE est faible (Ferrer, 1992).

I.2.4.3 Méthode analogique

Appelée aussi méthode de l'interpolation linéaire. Elle consiste à déterminer les caractéristiques hydrologiques (M_0) d'un bassin versant inconnu à partir des caractéristiques des autres bassins voisins placés dans des conditions hydrologiques semblables (Touaibia, 2004).

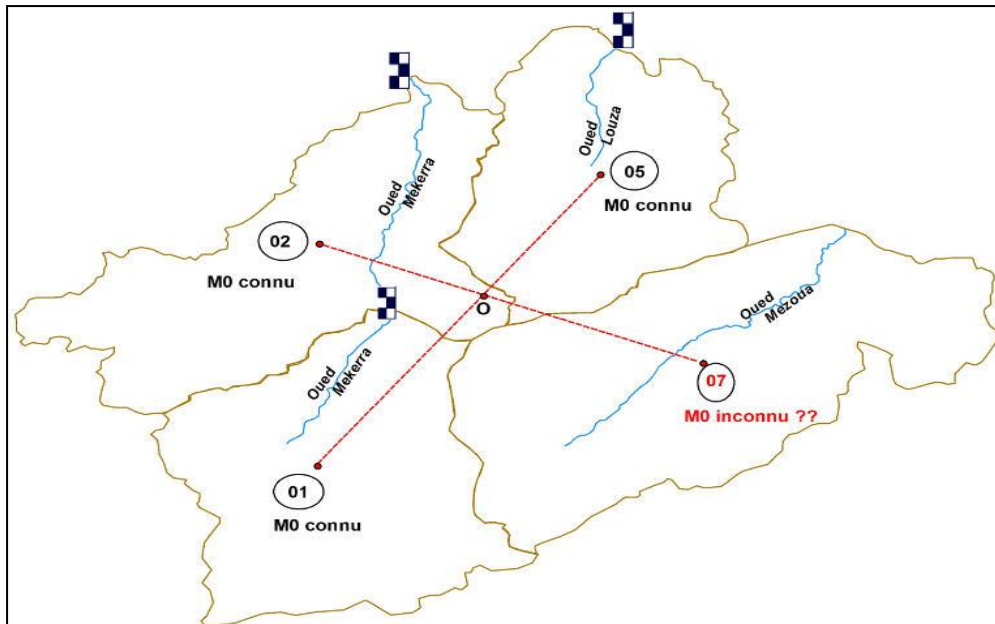


Figure I.3 : Principe de la Méthode de l'interpolation linéaire

Elle s'écrit :

$$M_{07} = -(M_{02} - M_{00}) \cdot \frac{L_{2-7}}{L_{2-0}} + M_{02} \quad (I.33)$$

I.3 Utilisation de l'outil statistique

I.3.1 Objectifs

- ✓ Donner des outils et des méthodes permettant d'analyser et d'interpréter les résultats d'expériences en choisissant une loi de probabilité théorique.
- ✓ Caractériser de la meilleure façon possible le comportement de la variable étudiée dont on ne connaît que quelques réalisations qui constituent l'échantillon.
- ✓ Analyse des relations entre plusieurs variables dépendantes (Analyse multidimensionnelle).

I.3.2 Etapes de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle doit être passée par les étapes suivantes (figure I.4).

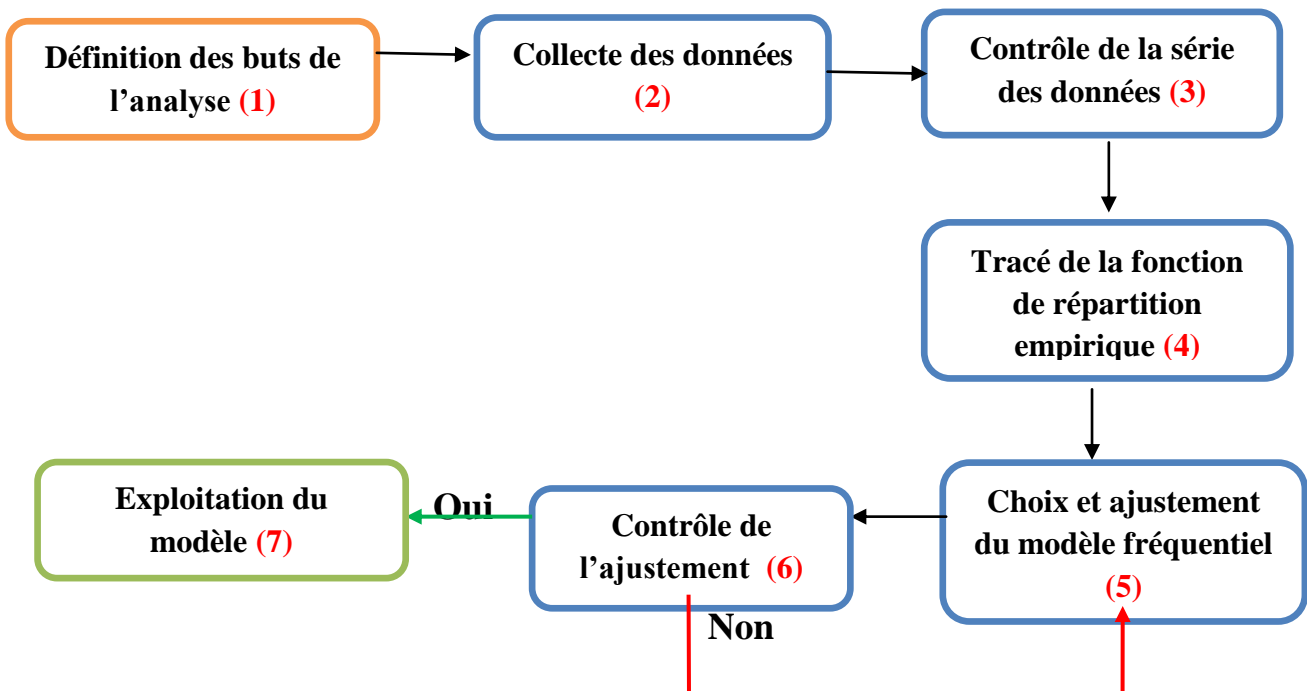


Figure I.4 : Etapes de l'analyse fréquentielle

I.3.2.1 Contrôle statistique de la série des données

Les données brutes doivent être examinées pour déceler les anomalies, et corriger les valeurs erronées. Pour cela, la série doit être vérifiée en terme de : Homogénéité (Test de Wilcoxon), Indépendance (Test de Wald-Wolfowitz) et Stationnarité (Test de Kendall).

❖ Test de Wilcoxon (Test des rangs)

Hypothèses :

- ✓ Les éléments d'un échantillon doivent provenir de la même population au niveau de signification α .
- ✓ Subdiviser l'échantillon N en deux (02) sous échantillons de tailles respectives N_1 et (avec $N_1 < N_2$).

Le test de Wilcoxon considère les quantités suivantes :

$$V = R - \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} \quad (\text{I.34})$$

$$W = N_1 N_2 - V \quad (\text{I.35})$$

Avec :

R : Somme des rangs des éléments de l'échantillon N_1 dans la série considérée.

V : Nombre de dépassement des éléments de l'échantillon N_2 par ceux de l'échantillon N_1 .

W : Nombre de dépassement des éléments de l'échantillon N_1 par ceux de l'échantillon N_2 .

Pour $N > 20$, $N_1 > 3$, $N_2 > 3$, on peut admettre que V et W suivent la loi normale (Bobée et Robitaille, 1976).

Il est alors possible de tester l'hypothèse H_0 que les deux échantillons proviennent de la même population au niveau de signification α en comparant la quantité $u = \left| \frac{V - \bar{V}}{\sqrt{\text{var}(V)}} \right|$ avec la variable

normale centré réduite de probabilité au dépassement $\frac{\alpha}{2}$

❖ Test de Wald-Wolfowitz (1943)

Pour un échantillon de taille N , le test de Wald-Wolfowitz considère la valeur statistique R :

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X_i X_{i+1} + X_1 X_N \quad (\text{I.36})$$

Si les observations de l'échantillon sont indépendantes, alors R suit une loi normale

$$R \sim N[\bar{R}, \text{var } R]$$

On calcule la quantité u , qui suit la loi normale $N(0,1)$. $u = \left| \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{\text{var}(R)}} \right|$

Et, on teste l'hypothèse d'indépendance de l'échantillon.

Soient $u_1 = 1,96$, $u_2 = 2,57$ les variables normales dont la probabilité au dépassement est respectivement 2,5 % et 0,5%.

Si :

$|u| < u_1$; On accepte l'hypothèse d'indépendance au niveau de signification 5%.

$u_1 < |u| < u_2$; On rejette l'hypothèse d'indépendance au niveau de signification 5% et on l'accepte au niveau de 1%.

$|u| > u_2$; On rejette l'hypothèse au niveau de signification 1%.

❖ Test de Kendall

Il repose sur la détection d'une dépendance monotone entre deux variables, au vu de n couples d'observations (x_i, y_i) (Meylan et Musy, 1999).

Pour un échantillon classé par ordre chronologique : X_1, X_2, \dots, X_n , on calcule la statistique S telle que :

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (j > i) \quad (\text{I.37})$$

Nous avons :

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

Pour vérifier la stationnarité :

- Si S est voisin de sa moyenne, alors les observations sont stationnaires.
- Si S est élevé, donc les observations sont non stationnaires.

I.3.2.2 Tracé de la fonction de répartition empirique

C'est attribuer à chaque observation classée d'un échantillon une probabilité empirique, aidant au choix de la loi de probabilité (prédétermination du modèle fréquentiel).

Parmi les principales formules donnant la probabilité empirique d'ordre m dans un échantillon de taille N , on cite la formule de HAZEN utilisée dans ce travail :

a. Formule de HAZEN

Cette formule est utilisable pour les lois normales et quasi normales. Elle s'écrit sous la forme :

$$f(x) = \frac{m-0,5}{N} \quad (\text{I.38})$$

Avec :

$f(x)$: Densité de probabilité.

m : Numéro d'ordre.

N : Taille de la série.

En statistique, on travaille avec la fréquence expérimentale F qui est la relation entre le nombre de fois qu'un évènement est appaait (n) dans la série et le nombre total d'observation (N) (Roche, 1963).

Cependant, on travaille soit à :

❖ La fréquence expérimentale au non dépassement ;

$$F_1(x) = \text{Prob}[X \leq x] = \int_{-\infty}^x f(x)dx$$

❖ La fréquence expérimentale au dépassement ;

$$F_2(x) = \text{Prob}[X > x] = \int_x^{\infty} f(x)dx \quad \text{ou bien} \quad F_2(x) = 1 - F_1(x)$$

Avec :

$f(x)$: Densité de probabilité.

$F_1(x)$: Fonction de répartition au non dépassement.

$F_2(x)$: Fonction de répartition au dépassement.

I.3.2.3 Choix et ajustement du modèle fréquentiel

L'ajustement est le choix d'une loi de probabilité susceptible de s'ajuster d'une manière adéquate à la série hydrologique. Chaque loi de probabilité est définie d'une part sa formule mathématique, d'autre part par les valeurs numériques des paramètres de distribution (moyenne, écart type...) (Brunet-Moret, 1969).

Nous allons présenter les principales distributions utilisées en hydrologie aux quelles peuvent s'ajuster les séries d'observations hydrologiques (exemple : débits de cours d'eau, précipitations).

Tableau I.4 : Récapitulatif des lois de probabilités utilisées en hydrologie

N°	Nom de loi et ses dérivées	Fonction de densité de probabilité	Nombre de Paramètres	Référence
1	NORMALE	Gauss $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2}$	\bar{x}, σ	(Bobée, 1978)
2		Log Normale (LN2) $f(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln x}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \bar{x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2}$	$\bar{x}, \sigma_{\ln x}$	(Roche, 1963)
3		Log Normale (LN3) $f(x) = \frac{1}{b(x-x_0)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x-x_0)-a}{b}\right)^2}$	x_0, a, b	(Roche, 1963)
4	EXPONENTIELLE	Exponentielle $f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x-m}{\alpha}}$	α, m	(Meylan et Musy, 1999)
5		Gumbel $f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-u} \cdot e^{-e^{-u}} \quad u = \frac{x-x_0}{\alpha}$	α, x_0	(Bois <i>et al.</i> , 2007)
6		Weibull $f(x) = \frac{c}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right]$	α, c	(Perreault et Bobée, 1992)
7		Loi Généralisée des valeurs extrêmes $f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{c}{\alpha}(x-u)\right]^{\frac{1}{c-1}} \exp\left[-\left(1 - \frac{c}{\alpha}(x-u)\right)^{\frac{1}{c}}\right]$	α, u, c	(Perreault et Bobée, 1992)
8		Halphen type A $f(x) = \frac{1}{2x.k_v(2\alpha)} \exp\left[-\alpha\left(\frac{x}{m} + \frac{m}{x}\right)\right]$	$\alpha, m, k_v(2\alpha)$	(Perreault et Bobée, 1997)

9		Halphen type B	$f(x) = \frac{2}{m^{2\nu} ef_\nu(\alpha)} x^{2\nu-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{m}\right)^2 + \alpha\left(\frac{x}{m}\right)\right]$	$\alpha, m, \nu, ef_\nu(\alpha)$	(Perreault et Bobée, 1997)
10		Halphen type B⁻¹	$f(x) = \frac{2m^{2\nu}}{ef_\nu(\alpha)} x^{-2\nu-1} \exp\left[-\left(\frac{m}{x}\right)^2 + \alpha\left(\frac{m}{x}\right)\right]$	$\alpha, m, \nu, ef_\nu(\alpha)$	(Perreault et Bobée, 1997)
11	PEARSON	Pearson type III	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{T(\lambda)} (x-m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)}$	$\alpha, m, \lambda, T(\lambda)$	(Bobée et Robitaille, 1976)
12		Gamma généralisée	$f(x) = \frac{ S \alpha^{s\lambda}}{T(\lambda)} x^{s\lambda-1} e^{-(\alpha x)^s}$	$\alpha, S, \lambda, T(\lambda)$	(Bobée et Des grosseilliers, 1985)
13		Gamma	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{T(\lambda)} e^{-\alpha x} x^{\lambda-1}$	$\alpha, \lambda, T(\lambda)$	(Bobée et Robitaille, 1976)
14		Gamma inverse	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{T(\lambda)} \left(\frac{1}{x}\right)^{\lambda+1} e^{-\frac{\alpha}{x}}$	$\alpha, \lambda, T(\lambda)$	(Kotz et Johnson, 1983)
15		Log Pearson type III	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{T(\lambda)} (\ln x - m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(\ln x - m)}$	$\alpha, \lambda, T(\lambda), m$	(Bobée et Robitaille, 1976)

I.3.2.4 Contrôle de l'ajustement

La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du bon choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Diverses méthodes peuvent contribuer à contrôler l'adéquation de la loi de probabilité choisie au préalable.

a) Choix graphique

Cette méthode graphique est assez rapide où l'allure des points permet à prime d'abord d'accepter ou de rejeter la loi (toute sinuosité, mauvaise courbure ou cassure de pente est considérée comme un mauvais ajustement) (Touaibia, 2004).

b) Tests de dispersion

Appelés aussi tests d'adéquation ou de conformité qui permettent d'accepter ou de rejeter l'hypothèse d'appartenance d'un échantillon à une loi donnée en fonction d'un seuil de tolérance fixé a priori (en général 5%) (Touaibia, 2004).

❖ Test du Khi-deux χ^2 ou test de Pizzeti-Pearson

L'ampleur de l'écart entre les fréquences théoriques et observées est évaluée en utilisant la formule suivante:

$$x_{calculé}^2 = \frac{(f_{01} - f_{i1})^2}{f_{i1}} + \frac{(f_{02} - f_{i2})^2}{f_{i2}} + \dots + \frac{(f_{0k} - f_{ik})^2}{f_{ik}} = \sum_{i=1}^k \frac{(f_{0i} - f_{ii})^2}{f_{ii}} \quad (I.39)$$

Avec :

f_{0i} : Fréquence absolue observée ou l'effectif de la classe i .

f_{ii} : Fréquence théorique de la loi supposée adéquate dans la classe i .

Et comparons $x_{calculé}^2$ avec $x_{1-\alpha}^2$ pour ν degré de liberté et un risque de $\alpha = 5\%$

$$\nu = K - 1 - r$$

Sachant que :

K : Nombre de classe.

r : Nombre de paramètre qui caractérisent la loi de distribution théorique.

Les $x_{1-\alpha}^2$ avec ν degré de liberté sont tabulés.

Si

- ✓ $\chi^2_{calculé} < \chi^2_{1-\alpha}$ l'hypothèse d'appartenance du phénomène étudié à la distribution théorique choisie est acceptée et l'écart entre les fréquences observées et les fréquences théoriques n'est pas significatif.
- ✓ $\chi^2_{calculé} > \chi^2_{1-\alpha}$, l'hypothèse est rejetée et les données expérimentales suivent une autre loi d'ajustement.

❖ Test de Kolmogorov-Smirnov

Il mesure le plus grand écart entre la fréquence expérimentale $F_N(x)$ d'un échantillon de N valeurs et la fonction théorique $F(x)$ définie à priori (Sari, 2002).

$$D_N = D_{\max} = \max |F_N(x) - F(x)| \quad (\text{I.40})$$

Comparons D_{\max} et l'écart critique théorique d_n pour un seuil de confiance $1-\alpha$, $\alpha = 5\%$.

Si

$D_{\max} < d_n$, l'hypothèse que la loi choisie représente notre échantillon est acceptée ;

$D_{\max} > d_n$, l'hypothèse est rejetée.

Les valeurs de l'écart critique théorique d_n sont tabulées en fonction de la taille de l'échantillon N et le seuil de confiance α .

❖ Critère d'information (AIC et BIC)

L'Akaike Information Criterium (AIC) et le bayesian information criterium (BIC) mesurent la qualité de l'ajustement d'un modèle statistique lors de la sélection du modèle le plus adéquat parmi un ensemble de modèles acceptables (Meddi et Ben Abbes, 2013).

Le critère d'AIC est donné par :

$$AIC = -2\log(L) + 2k \quad (\text{I.41})$$

Avec :

L : Vraisemblance maximisée.

k : Nombre de paramètres dans le modèle.

Donc, un meilleur modèle est celui qui possède l'AIC faible.

Mais les valeurs de $L'AIC$ sont parfois, très proches l'un de l'autre pour différents modèles, et il est délicat de décider le choix du meilleur modèle (Meddi et Ben Abbes, 2013).

Dans ce cas, le BIC est proposé qui fait intervenir la taille de l'échantillon n . Il est donnée par :

$$BIC = -2\log(L) + k \log(n) \quad (I.42)$$

Avec :

L : Vraisemblance maximisée ;

k : Nombre de paramètres dans le modèle ;

n : Nombre d'observation.

Ce critère pénalise les modèles comportant trop de variables.

I.3.7 Analyse multidimensionnelle

Appelée encore analyse à plusieurs variables ou analyse multivariée, qui est l'ensemble des méthodes statistiques qui étudient les relations existantes entre plusieurs variables dépendantes dans le but de résumer l'information apportée par un grand nombre de variable à un nombre plus restreint (Touaibia, 2004).

Parmi les méthodes multidimensionnelles, il existe l'analyse en composantes principales (ACP), très utilisé en hydrologie, sans inconvénient, sans danger et ne nécessite pas au préalable d'hypothèses restrictives (Duband, 1982).

I.3.7.1 Définition de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

Est un procédé statistique essentiellement descriptif : son objectif principal est de présenter, d'une manière graphique, le maximum d'information contenue dans une matrice de données par une transformation de variables quantitatives initiales liées entre elles, en nouvelles variables quantitatives, non liées, appelées composantes principales (Gutierrez, 2003).

L'ACP est utilisée pour:

- ✓ Trouver les espaces visibles en utilisant des indices qui maximisent la variance dans les séries chronologiques de chaque site appelés « composantes principales » (Gutierrez, 2003)

- ✓ Mettre en évidence les variables redondantes et donc de ne retenir que les plus importantes. Et ce afin de sélectionner les caractéristiques (variables hydrologiques) qui sont employées dans une analyse régionale (Duband, 1982) ;
- ✓ Vérifier, de manière quantitative, la corrélation entre les différentes caractéristiques physiographiques employées dans l'étude (Duband, 1982) ;
- ✓ Former de groupes de variables qui suivent un même type de comportement.

I.3.7.2 Etapes de l'ACP

Pour faire une analyse en composantes principales, on doit suivre les étapes suivantes :

- ✓ Construction de la matrice de données de départ ; formée par des lignes et des colonnes (individus).
- ✓ Standardisation des données ; Donner la même importance (poids) aux différentes variables en les divisant par leur écart-type.
- ✓ Construction de la matrice de corrélation entre les variables, qui est symétrique.
- ✓ Diagonalisation ; dont les composantes sont indépendantes. Cette étape permet de trouver les coefficients des combinaisons linéaires des variables initiales, appelés « vecteurs propres », dont la variance de chacune sur les axes principaux sera donnée par les valeurs propres $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$.
- ✓ Calcul des coordonnées des individus et des variables sur ces vecteurs pour la représentation graphique. Il convient de signaler que la première composante principale (premier axe principal) explique une grande partie de la variance totale, tandis que l'information contenue dans les autres composantes est de moins en moins importante.

L'utilisation de l'ACP est très fréquente en Hydrologie (Etude des apports liquides, précipitation) dont plusieurs chercheurs utilise cette méthode statistique dans l'interprétation des phénomènes, on cite quelques auteurs (Gutierrez, 2003 ; Assaba, 2004 et Khaldi, 2005).

Les principales étapes de l'ACP sont schématisées dans la figure I.4

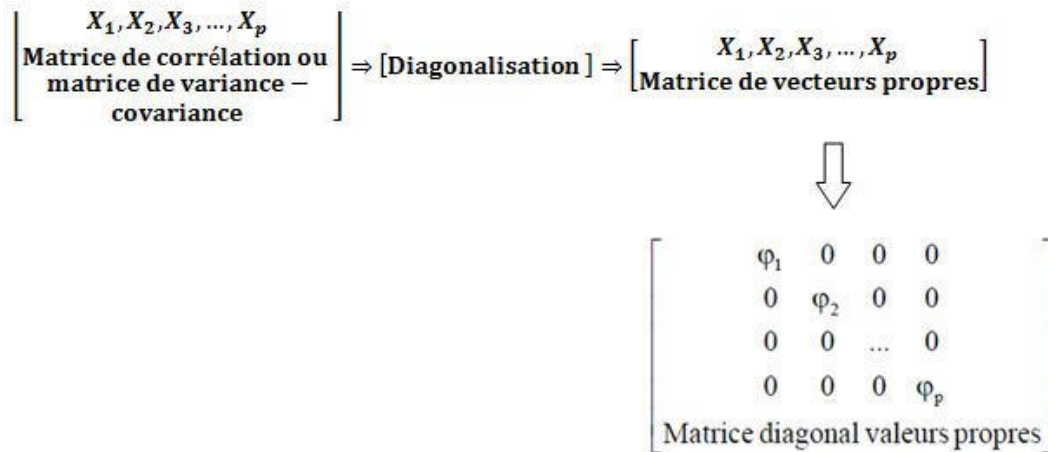


Figure I.5 : Etapes de l'Analyse en composantes principales

Pour interpréter les composantes, il est important d'identifier et de vérifier la répartition des variables, c'est-à-dire la corrélation entre les variables de mesure. Ces corrélations s'appellent les saturations et peuvent varier entre -1 et +1 (Touaibia, 2004).

I.3.7.3 Choix des axes à retenir

Plusieurs méthodes existent pour limiter le nombre de composantes principales à retenir :

- On peut ne retenir que les valeurs propres les plus grandes dont la somme représente un certain pourcentage de la variance totale (Laborde, 2000) ;
- Un graphe du numéro d'ordre des composantes principales en fonction de leur pourcentage des variances est tracé dont le point d'inflexion de la courbe obtenue permet de fixer le nombre des composantes à retenir (Khaldi, 2005).

I.3.8 Variabilité de l'apport liquide des cours d'eau

L'apport des cours d'eau est variable d'une année à une autre et même à l'échelle mensuelle et saisonnière. Un coefficient de variation Cv calculé permettra d'apprécier l'homogénéité de la distribution.

En général, une valeur du coefficient de variation inférieure à 15% traduit une bonne homogénéité de la distribution des données dans une série d'observation (Veysseyere, 2006).

- ☞ Le coefficient de variation d'un cours d'eau régulier est de 0,3 (Veysseyere, 2006).
- ☞ Pour un cours d'eau irrégulier, le coefficient de variation peut atteindre 0,5 ou même 1 (Veysseyere, 2006).

I.3.9 Rupture dans les séries d'observation hydrologiques

I.3.9.1 Définition

La variabilité des données hydrologiques est définie par la non stationnarité des séries d'observation (chronologiques) traduite par un changement de moyenne (Perreault, 2000).

Les types de changements de moyenne dans les séries sont classés en deux grandes catégories :

- ✓ **Rupture**, qui correspond à une modification brusque dans les propriétés d'une variable à étudier marquée par une modification du régime hydrologique (Perreault, 2000).
- ✓ **Tendance**, qui est un changement graduel dans les propriétés d'une variable à étudier à l'échelle de la période d'échantillonnage qui traduit l'aspect général de la grandeur étudiée (Boukherouba, 2010).

I.3.9.2 Méthodes de détection de rupture

Il existe plusieurs méthodes de détection de rupture de la stationnarité des séries d'observations.

a) Test de Pettitt

Est un test non paramétrique dérive du test de Mann-whitney dont L'absence de rupture dans la série d'observation (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle (Gutiérrez, 2003).

Le principe de cette approche consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1 et N-1. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous séries ont des distributions différentes (Gutiérrez, 2003).

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

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{I.43})$$

Où :

$$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \quad \text{avec : } \text{sgn}(Z) = 1 \text{ si } Z > 0, 0 \text{ si } Z = 0 \text{ et } -1 \text{ si } Z < 0$$

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 $U_{t,N}$.

b) Méthode bayésienne de Lee & Heghinian

Cette méthode permet de déceler la date et l'amplitude de rupture dont le modèle de base de la procédure est le suivant (Kotz *et al.*, 1981 in Gutiérrez, 2003) :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases} \quad (\text{I.44})$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 .

τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus, $1 \leq \tau \leq N-1$, $-\alpha < \mu < +\alpha$, $-\alpha < \delta < +\alpha$, $\sigma > 0$, et sont indépendants.

Avec :

τ : date de rupture.

δ : l'amplitude du changement de moyenne.

c) Statistique B de Buishand

La procédure de Buishand est de nature bayésienne, et fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian.

En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture m , on définit la statistique B par:

$$B = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k^*}{D_x} \right)^2}{N(N+1)} \quad (\text{I.45})$$

$$\text{Où : } S_k^* = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \quad \text{pour } k = 1, \dots, N$$

Avec :

D_x : L'écart type de la série.

\bar{X} : Moyenne des valeurs x_1, x_2, \dots, x_N .

N : taille de l'échantillon.

De plus, il est possible de définir une région de confiance appelée ellipse de contrôle pour un seuil de confiance donné contenant la série S_k^* , sous l'hypothèse nulle (Bois, 2000).

d) Procédure de segmentation d'Hubert

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher de multiples changements de moyenne, donc une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus (Gutiérrez, 2003).

Le principe de cette méthode est de découper une série en m segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit nettement différente de la moyenne du (des) segment (s) voisin (s) (Hubert *et al.*, 1989 in Gutiérrez, 2003).

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

$i_k, k = 1, 2, \dots, m$

$$\begin{aligned} n_k &= i_k - i_{k-1} \\ \bar{X}_k &= \frac{\sum_{i=i_{k-1}}^{i=i_k} X_i}{n_k} \\ D_m &= \sum_{k=1}^m d_k \end{aligned} \tag{I.46}$$

Avec

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2$$

La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum. (Dagnelie, 1970 in Gutiérrez, 2003).

N.B : Si plusieurs années de rupture apparaissent dans la même série hydrologique, la première année de rupture est pris comme référence pour le calcul du taux de variation de grandeur hydrologique.

I.3.9.3 Calcul des variations de la moyenne

Le calcul des variations de la moyenne de part et d'autre de la rupture est effectué en appliquant la formule suivante :

$$\text{var}(\%) = \frac{(X_i - X_j)}{X_i} \times 100 \quad (\text{I.47})$$

Avec :

var : Taux de variation de la moyenne (%).

X_i : Moyenne avant la date de rupture.

X_j : Moyenne après la date de rupture.

Si $\text{var} > 0 \Rightarrow X_i > X_j$, il y a une réduction du taux du variable hydrologique (déficit), après la date de rupture .

$\text{var} < 0 \Rightarrow X_i < X_j$, il y a une augmentation du taux du variable hydrologique (excédent), après la date de rupture.

Conclusion

L'ensemble des termes cités et décrits dans cette partie nous servira de base pour comprendre les phénomènes et interpréter les résultats trouvés.

CHAPITRE II :

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

Introduction

La bonne connaissance du milieu physique (zone d'étude) est un moyen d'aide à la compréhension du phénomène étudié et à l'interprétation des résultats obtenus. Ce chapitre est une synthèse des caractéristiques géographiques, hydrographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques du bassin versant de la Macta.

II.1 Localisation géographique

Situé au nord Ouest de l'Algérie, le bassin versant de la Macta se trouve entre la latitude **34°34'** et **35°79'** Nord et entre la longitude **0°56'** Est et **1°06'** Ouest (Figure II.1) ; il est limité :

- ✓ Au Nord par la mer méditerranée ;
- ✓ A l'Est par le plateau de Tighenif et les monts de Saïda.
- ✓ Au Sud par les hauts plateaux de Ras El Ma et les plaines de Maalif.
- ✓ A l'Ouest par le plateau de Telagh, les monts de Tessala et les monts de Tlemcen.

Le bassin versant de la Macta s'étend sur une superficie de l'ordre de **14 389 Km²**, incluant les wilayas de Mascara, Sidi Belabbes et Saida. Il se jette directement dans la mer méditerranée par l'intermédiaire du marais de la Macta.

Le bassin versant de la Macta 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.

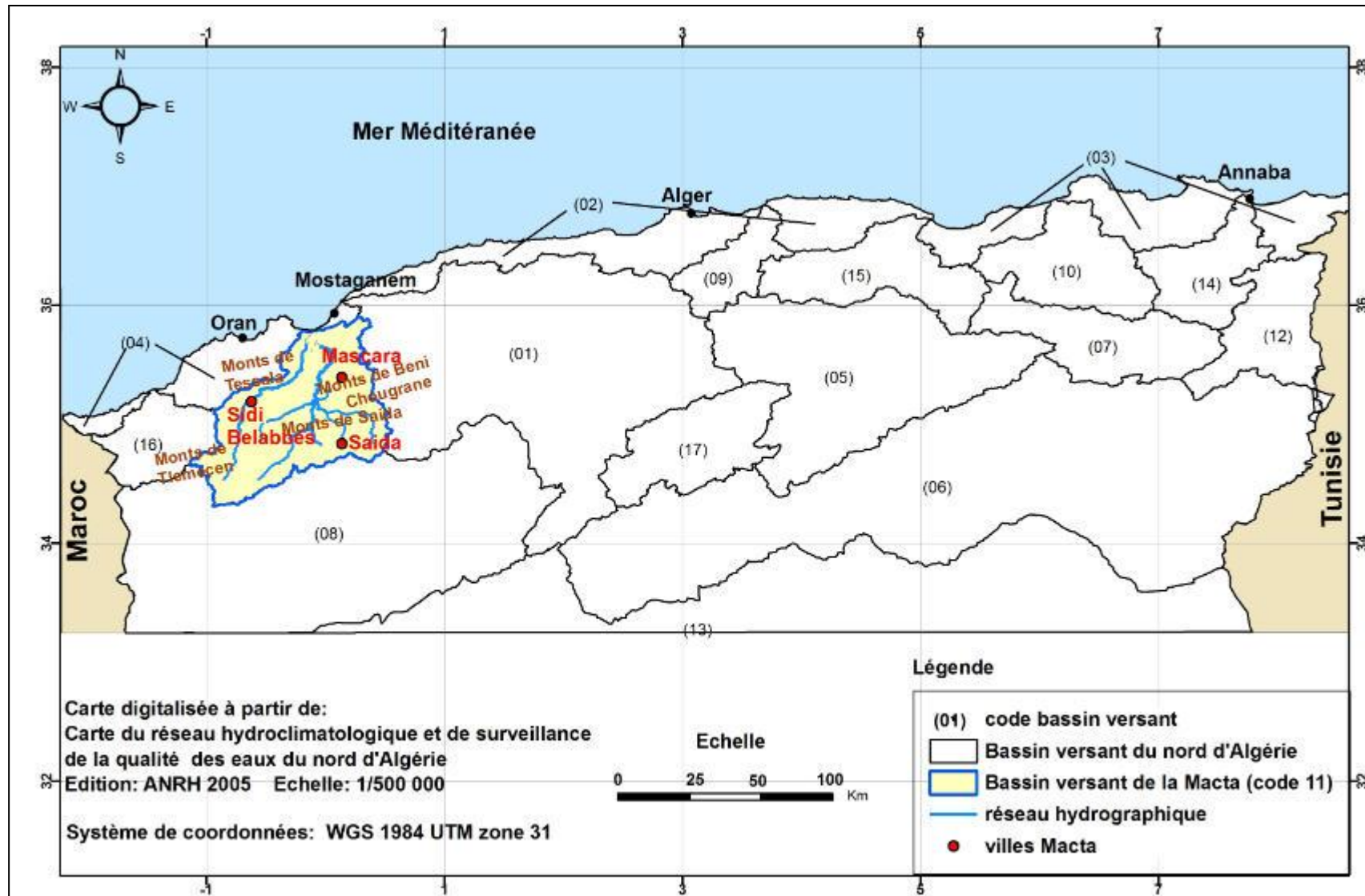


Figure II.1 : Localisation géographique du bassin versant de la Macta

II.2 Relief

Le relief du bassin versant de la Macta est très varié allant des hautes altitudes (> 1000 m) du sud, aux dépressions sublittoral (< 50 m) au nord (Figure II.1). Cependant, on distingue :

➤ Zone des basses plaines littorales

Séparée de la mer par un cordon dunaire et présente des altitudes les plus faibles (inférieures à 9 m), ce qui favorise la présence de plans d'eau, du marais et de steppes plus ou moins humides (Meddi *et al.*, 2009).

➤ Massifs montagneux

Ils confèrent un caractère montagneux à la plus grande partie du bassin versant de la Macta : A l'Ouest et au Nord Ouest se trouve les monts de Tessala (point culminant à 1061 m) qui sont traversés par l'oued Mebtouh avant qu'ils rejoignent la basse plaine inférieure (Meddi *et al.*, 2009). Au Sud-Ouest, ils sont relayés par la partie orientale des monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla) (Meddi *et al.*, 2009). Les monts de Beni Chougrane (700 m) occupent une bonne partie de la zone moyenne du bassin versant qui remonte, à l'Est, jusqu'aux monts de Saïda (1201 m au djebel Tiffrit) et au Sud, jusqu'aux monts de Dhaya (1455 m au djebel Mezioud) et les hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (1415 m au djebel Beghira) (Meddi *et al.*, 2009).

➤ Zone des plaines alluviales

Les plaines alluviales sont insérées dans les massifs montagneux comme la plaine de Sidi Bel Abbès de direction S-N, qui est associée à l'oued Mekerra et la plaine de Ghriss à l'Est drainée par l'oued Ain Fekane (Meddi *et al.*, 2009).

Le relief du bassin versant de la Macta a été obtenu en faisant une interpolation de type IDW (inverse de distance) des courbes de niveaux du Nord de l'Algérie. Ce mode d'interpolation est intégré dans le logiciel Arc Gis 9.3. Un modèle numérique du terrain (MNT) raster est ainsi obtenu en affectant une couleur à une fourchette d'altitude donnée (figure II.2).

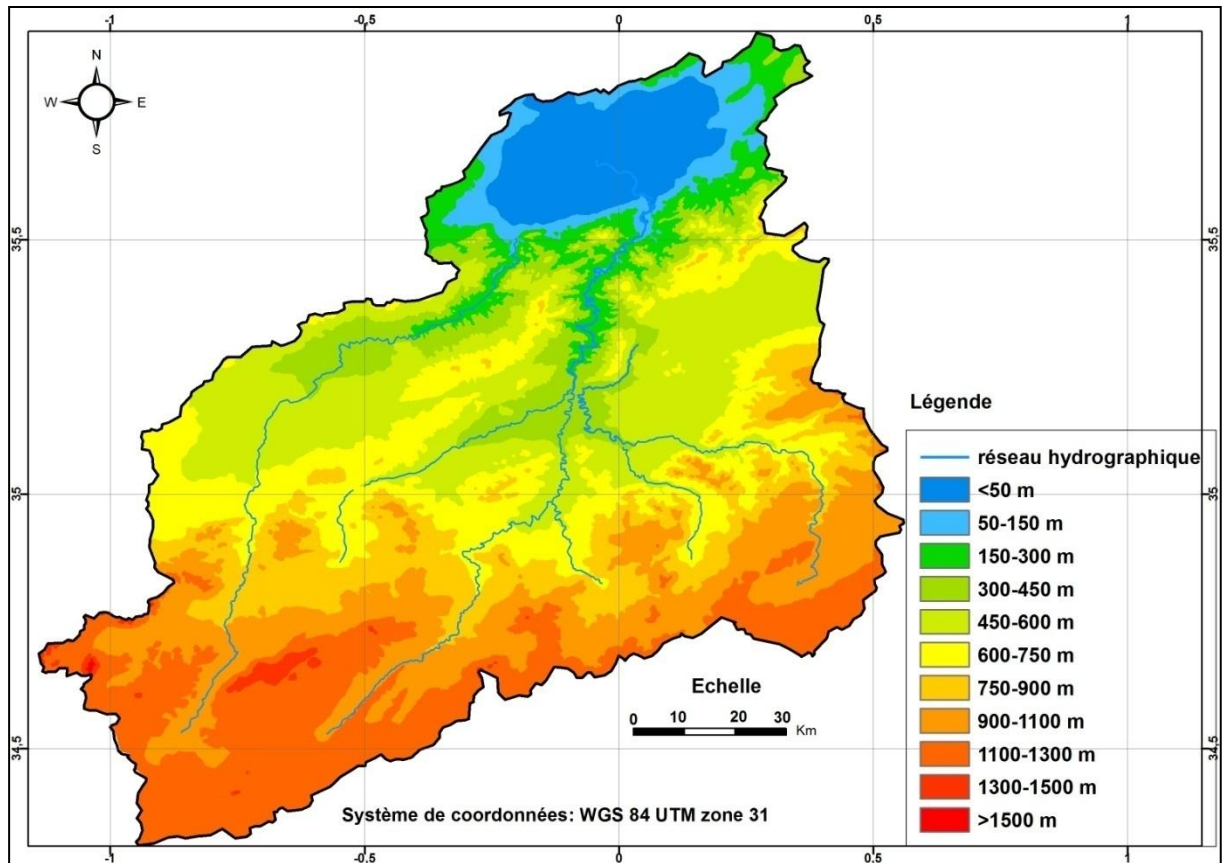


Figure II.2 : Modèle numérique du terrain et réseau hydrographique du bassin versant de la Macta

II.3 Caractéristiques morphométriques et hydrographiques

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 (Tableau II.1 et figure II.3) 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 non loin de la cote Méditerranéenne pour former la Macta.

Les affluents du bassin versant de la Macta prennent naissance des massifs calcaires des monts de Dhaya et Saïda au sud (Khaldi, 2005).

Les caractéristiques morphométriques des sous bassins versants de la Macta ont été obtenues après digitalisation de la carte hydroclimatologique de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) par le logiciel Arc Gis 9.3 (Tableau II.1).

Tableau II.1 : Principales caractéristiques des sous bassins versants de la Macta

Code du sous bassin versant	Nom du sous bassin versant	S (Km ²)	P (Km)	L (Km)
01	Mekerra amont	955	127	21
02	Mekerra moyen	936	140	35
03	Mekerra aval	1500	190	61
04	El Mabtouh	476	96	40
05	Louza	763	123	19
06	Melrir	701	122,5	48
07	Mezoua	1249	162	30
08	Sefioun	461	96	40
09	Berbour	605	110	25
10	Hounet	258	89,6	34
11	Saida	618	119	35
12	Taria	1457	169	37
13	Sahaout	141	66	24
14	Ain Fekan	1185	147,5	16
15	El Hammam	848	148,2	67
16	Macta maritime	1998	218,5	41

Avec :

S : Surface du sous bassin versant (Km²).

P : Périmètre du sous bassin versant (Km).

L : Longueur de l'oued principal (Km)

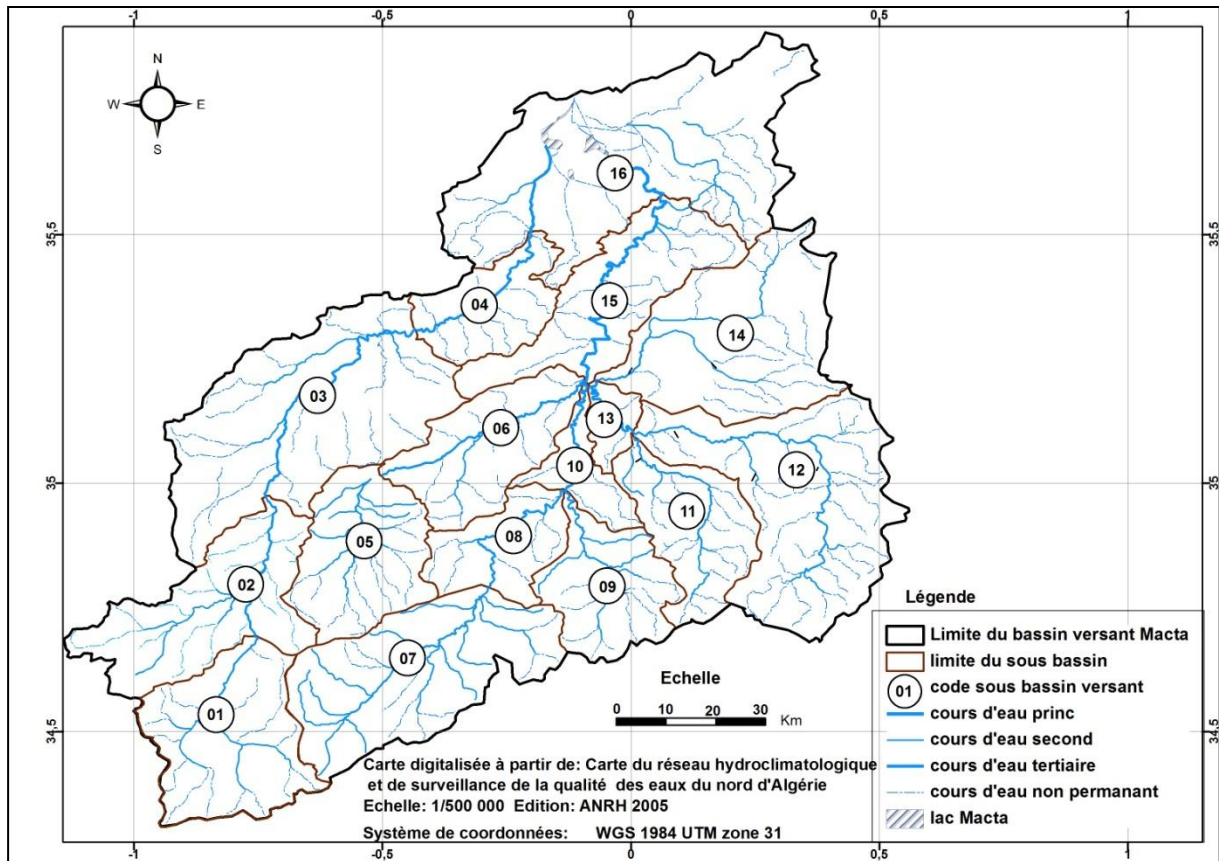


Figure II.3 : Sous bassins versants de la Macta et réseau hydrographique

II.3.1 Nouveau découpage des sous bassins versant de la Macta

Selon l'objectif du présent travail, un autre découpage a été effectué, en considérant que chaque station hydrométrique est l'exutoire d'un nouveau sous bassin. A partir de cet exutoire comme point de départ, des segments de droites ont été tracés perpendiculairement aux courbes de niveau, sans couper un cours d'eau jusqu'à revenir au même point de départ où une nouvelle surface est ainsi obtenue (Figure II.4).

Les surfaces issues du nouveau découpage ont été tracées par Arc Gis 9.3 dont leurs caractéristiques morphométriques et hydrographiques sont mentionnées au tableau II.2.

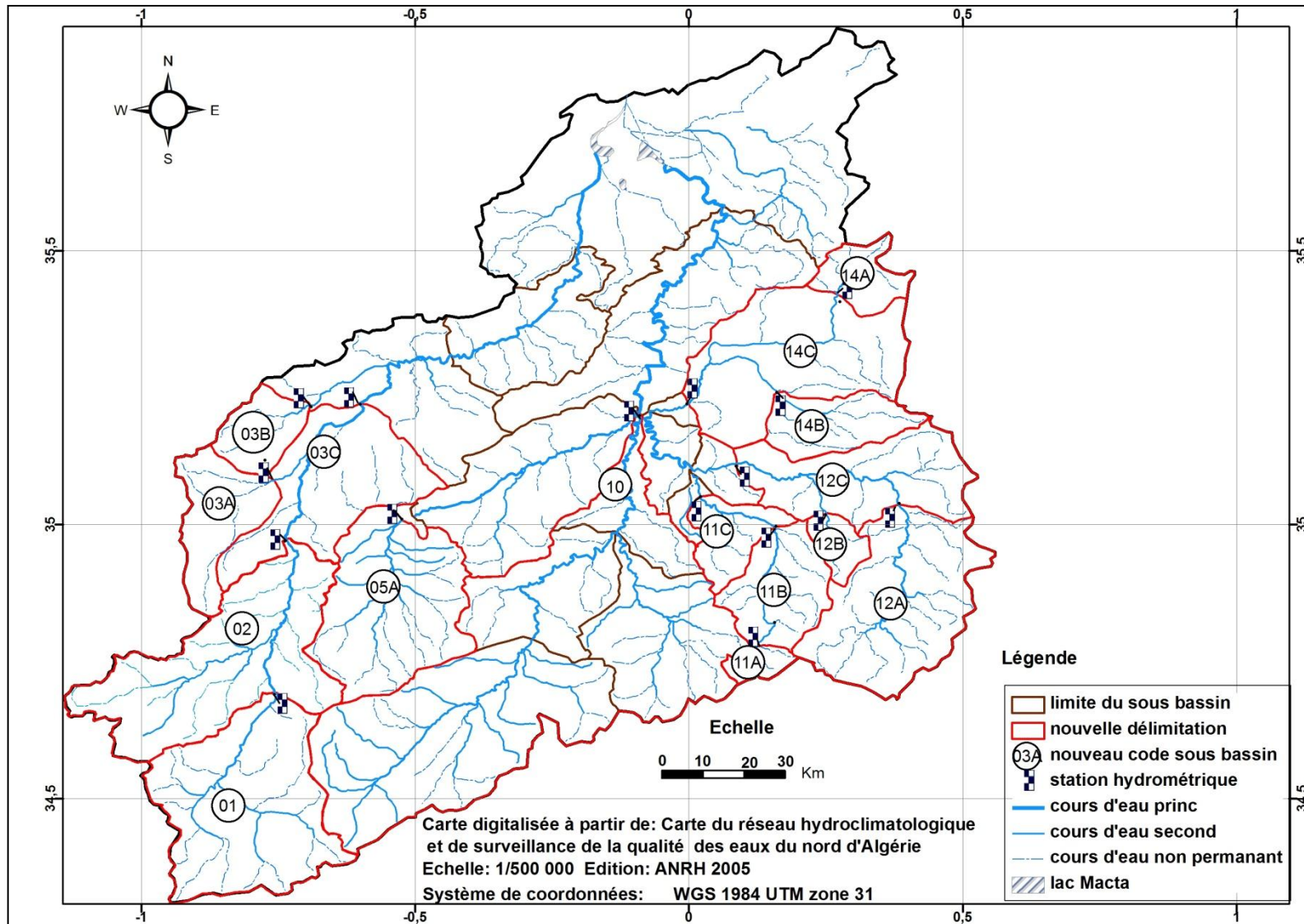


Figure II.4: Nouvelle délimitation des sous bassins versants de la Macta

Tableau II.2 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du nouveau découpage des sous bassins versant de la Macta

Code SBV	Nom SBV	Nouveau SBV	Nouveau code	S (Km ²)	P (Km)	K _c	L (Km)	I _m (%)	D _a (Km/Km ²)
01	Mekerra amont	Mekerra amont	01	955	127	1,15	21	5,95	2,70
02	Mekerra moyen	Mekerra moyen	02	1871,2	257,2	1,66	56	8,30	2,87
03	Mekerra aval	Tissaf	03A	277	92	1,55	8	5,56	2,01
		Sarno amont	03B	218,5	64,2	1,22	4	6,32	2,50
		Sidi Belabbes	03C	2785,6	344	1,82	113	7,27	3,50
05	Louza	Louza	05	744,1	120	1,23	19	7,46	2,90
10	Hounet	Hounet	10	2576,8	301	1,66	34	8,03	2,78
11	Saida	Saida PN 03	11A	60,6	35,5	1,28	7	5,71	1,95
		Kilomètre 50	11B	385,7	94	1,34	21	8,16	2,53
		Saida	11C	574,6	114	1,33	35	10,92	2,91
12	Taria	Sidi Mimoune	12A	689,5	133,5	1,42	29	8,64	2,90
		Dne Bouchikhi	12B	116,7	48,1	1,25	1	7,00	2,33
		Taria	12C	1389,9	204,2	1,53	37	9,89	2,83
14	Ain Fekan	Kalouia	14A	112,6	58	1,53	9	4,97	1,65
		Ghriss	14B	199,8	70	1,39	10	9,72	1,50
		Fekan	14C	1158,7	154	1,27	16	6,73	2,94

Avec :

SBV : Sous bassin versant.

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²).

P : Périmètre (Km).

$$K_c : \text{Indice de forme.} \quad K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (\text{II.1})$$

L : longueur de l'oued principal (Km).

$$I_m : \text{pente moyenne du bassin versant (\%)} \quad I_m = \frac{\Delta H \cdot L}{S} \quad (\text{II.2})$$

ΔH : Équidistance entre deux (02) courbes de niveau consécutives, dans notre cas $\Delta H = 50m$.

L : Longueur des courbes de niveau qui traversent chaque surface (m).

$$D_d : \text{Densité de drainage (Km/Km}^2\text{)}. \quad D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (\text{II.3})$$

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

Au regard des résultats du tableau II.2, seize (16) nouvelles surfaces (sous bassin versant) ont été obtenues dont leurs surfaces allant de 60,6 km² (Saida PN03) à 2785,6 km² (Sidi Belabbes) avec une forme allongée ($K_c > 1$). La densité de drainage D_d est variable (1,50 à Ghriss et 3,50 Sidi Belabbes).

II.4 Etude climatique

Le bassin versant de la Macta est soumis à l'influence de la mer et du relief, pour identifier son régime climatique, trois (03) stations climatologiques ont été utilisées dont leurs localisations et leurs caractéristiques sont mentionnées dans la figure II.5 et le tableau II.3.

Tableau II.3 : Caractéristiques des stations climatologiques

Nom de la station	Coordonnées			Année de mise en service	Période d'observation
	Lat. (°)	Long. (°)	Z (m)		
Matmore (Mascara)	35°36 N	00°18E	474	1977	1977-2010
Saida	34°52 N	00°09 E	750	1977	1977-2010
Sidi Belabbes	35°12 N	00°37W	475	1985	1985-2010

Avec :

Lat. : latitude, **Long.** : Longitude et **Z** : Altitude.

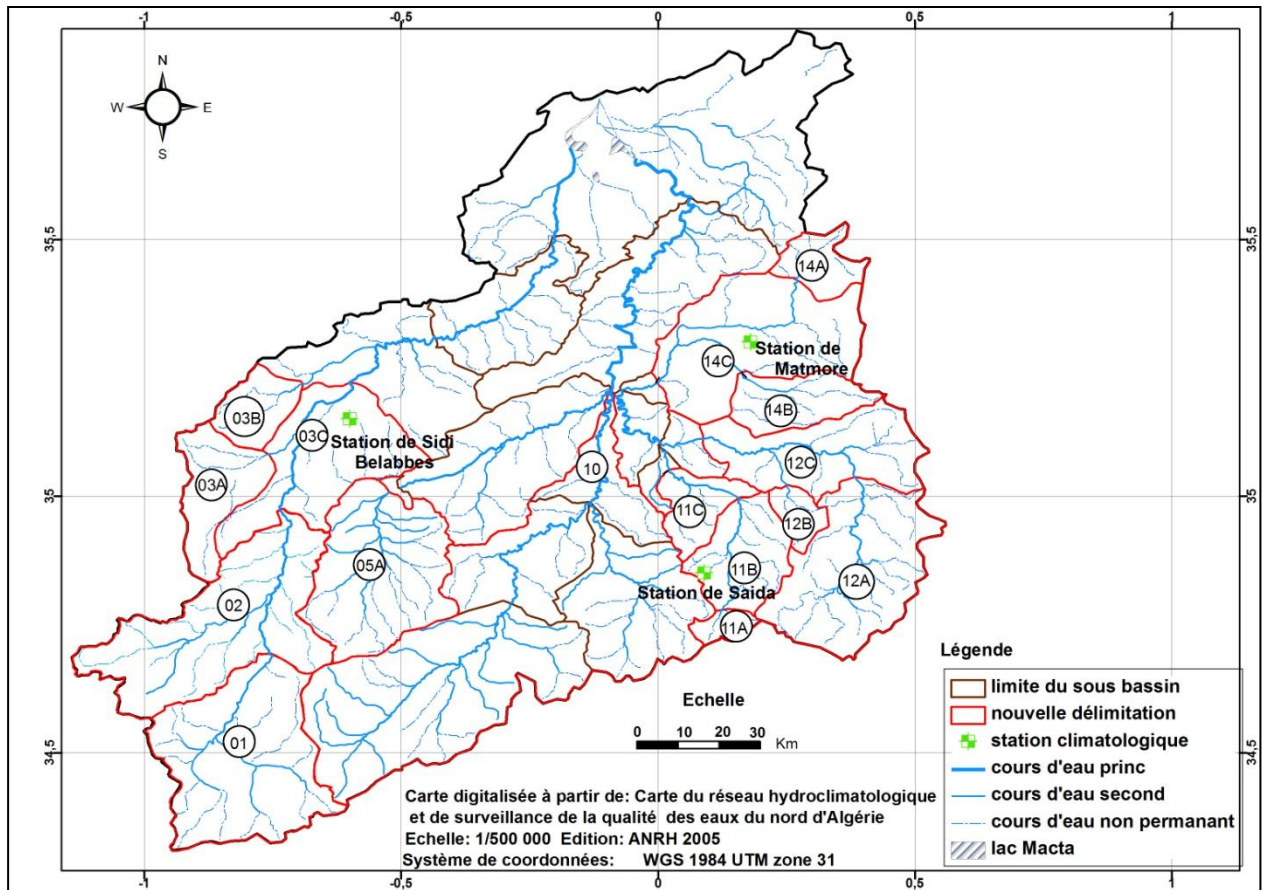


Figure II.5: Localisation des stations climatologiques utilisées dans le bassin versant de la Macta

II.4.1 Précipitations

C'est un facteur primordial dans la détermination du régime climatique. Les tableaux II.4, II.5 et II.6 présentent les moyennes mensuelles des précipitations enregistrées aux trois (03) stations climatologiques. Ces données ont été fournies par les services de l'Office National de Météorologie (O.N.M) d'Oran et d'Alger.

L'analyse de ces tableaux montre que les précipitations moyennes annuelles enregistrées aux trois stations climatologiques s'échelonnent entre 321 et 345 mm, ce qui caractérise un climat semi-aride ($200 < P < 400$ mm).

Tableau II.4 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Matmore (1977-2010)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	annuel
P(mm)	15,8	31,3	47,6	42,4	41,8	40,8	37,8	29,6	26,6	4,2	2,0	5,2	325,3

Source : (O.N.M, 2013)

Tableau II.5 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Saida (1977-2010)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	annuel
P(mm)	22,5	42,5	39,6	36,9	40,1	37,4	38,6	33,9	29,3	10,4	5,4	8,7	345,4

Source : (O.N.M, 2013)

Tableau II.6 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Belabbes (1985-2010)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	annuel
P(mm)	19,3	27,5	42,8	36,2	52,5	40,2	39,4	29,6	20,7	7	0,9	4,7	320,7

Source : (O.N.M, 2013)

II.4.2 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.

Les figures II.6, II.7 et II.8 présentent les températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées aux trois (03) stations climatologiques. Ces données ont été fournies par les services de l'Office National de Météorologie (O.N.M) d'Oran et d'Alger.

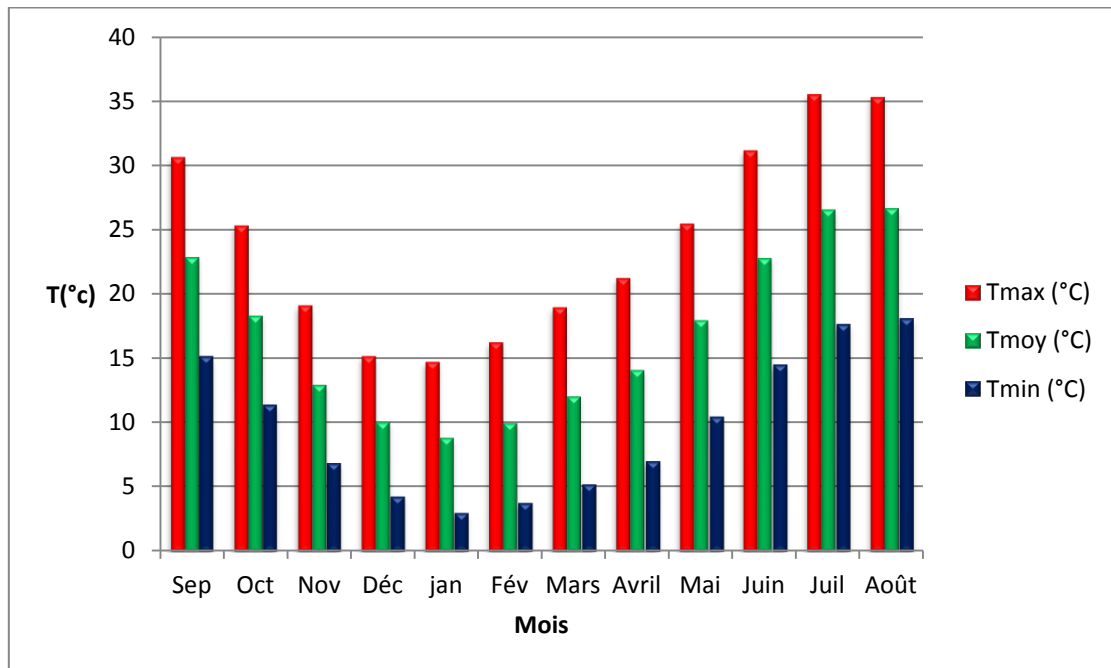


Figure II.6 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Matmore (Mascara)

L'analyse de la figure II.6 montre que la température moyenne minimale à la station de Matmore s'abaisse jusqu'à 3°C au mois le plus froid (Janvier), alors que la température moyenne maximale augmente jusqu'à 35,6 °C pendant les mois les plus chauds (Juillet, Aout).

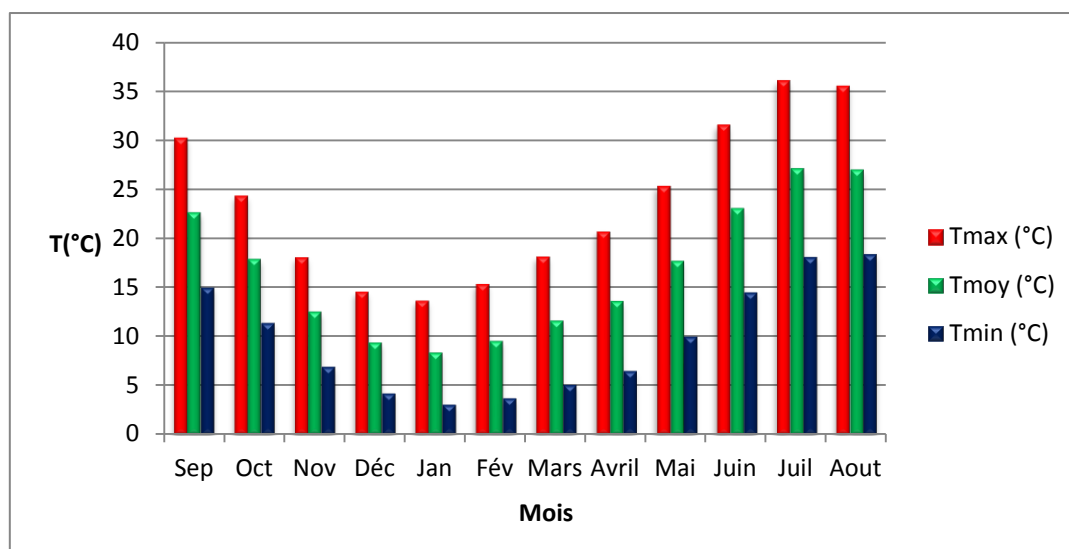


Figure II.7 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Saida.

Selon la figure II.7, la température moyenne minimale à la station de Saida s'abaisse jusqu'à 3,1°C au mois le plus froid (Janvier), alors que la température moyenne maximale augmente jusqu'à 36,1 °C pendant les mois les plus chauds (Juillet, Aout).

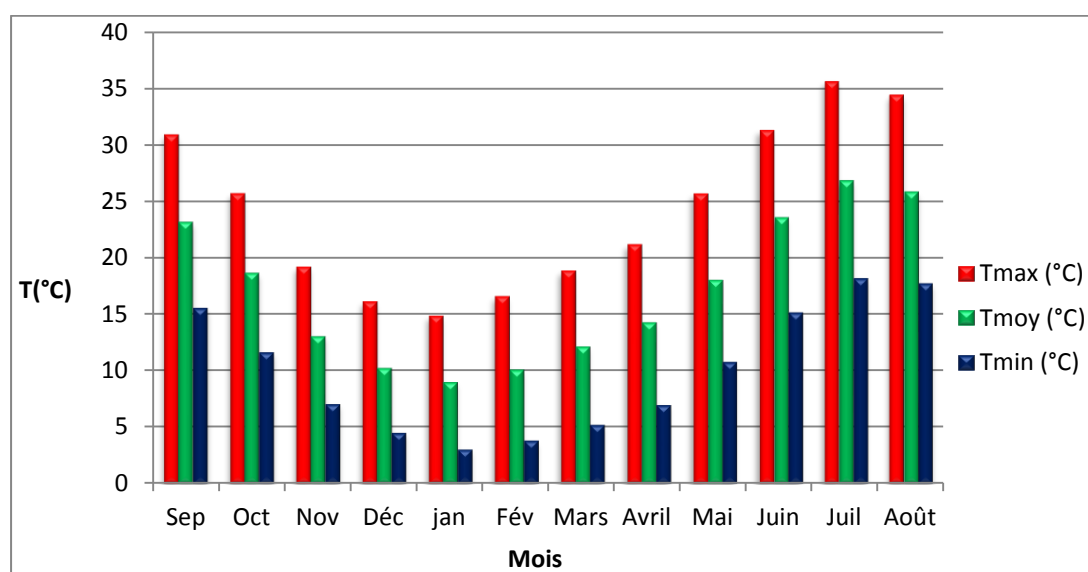


Figure II.8 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Sidi Belabbes

La figure II.8 montre que la température moyenne minimale du mois le plus froids (Janvier) à la station de Sidi Belabbes s'abaisse jusqu'à 3°C. Mais pendant les mois les plus chauds (Juillet, Aout), la température maximale peut atteindre 35,6 °C.

En conclusion, le bassin versant de la Macta est caractérisé par un hiver froid et un été sec et chaud dont la température s'abaisse jusqu'à 3°C pendant les mois les plus froids (Janvier) et augmente jusqu'à 35 à 36°C pendant les mois les plus secs (Juillet, Aout). ce qui caractérise un climat semi-aride.

II.4.3 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls indique l'importance des saisons sèches en durée et en intensité en tenant compte de l'emplacement de la courbe des températures moyennes par rapport à celle des précipitations (Hadj-Said, 2008).

Un mois est sec lorsque les précipitations moyennes exprimées en (mm), sont inférieures ou égales au double des températures enregistrées durant la même période ($P \leq 2T$) (Hadj-Said, 2008).

Les diagrammes ombrothermiques aux trois (03) stations climatologiques sont illustrés dans les figures II.9, II.10 et II.11.

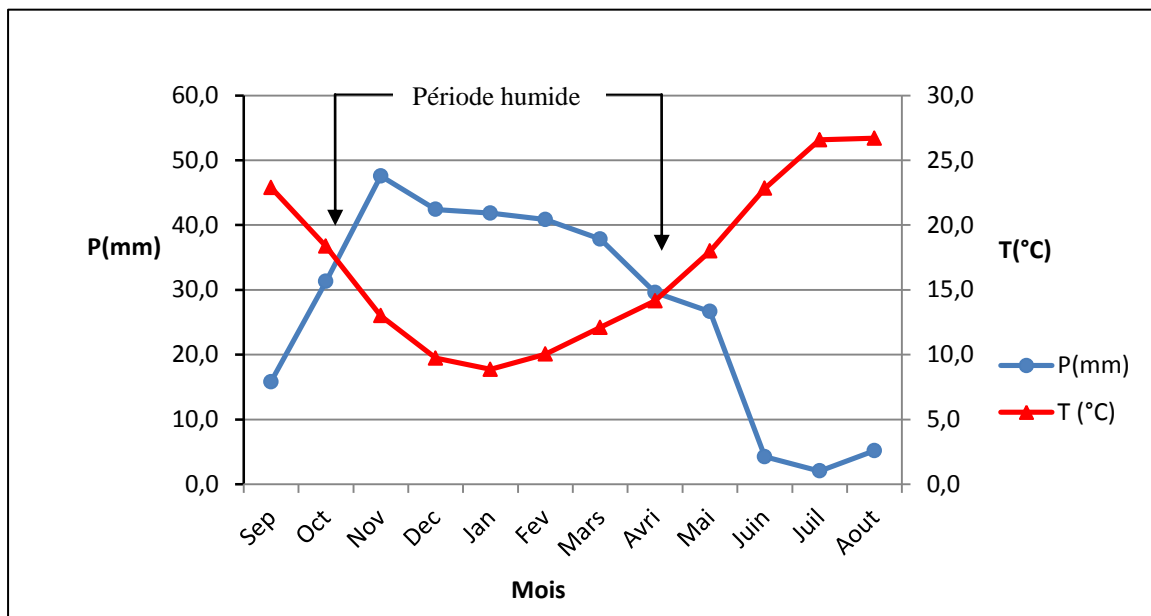


Figure II.9 : Diagramme ombrothermique à la station de Matmore (Mascara)

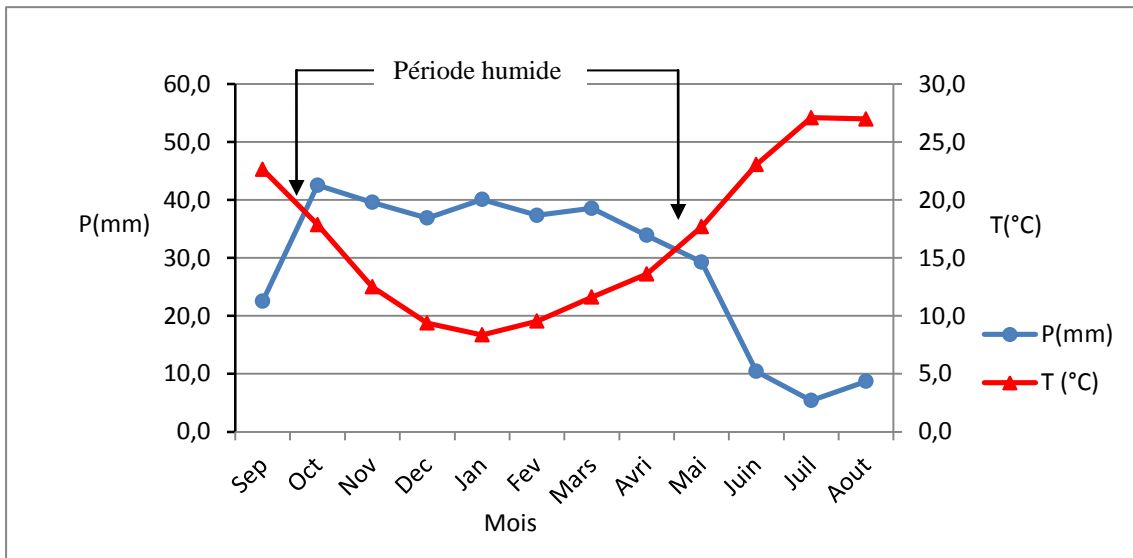


Figure II.10 : Diagramme ombrothermique à la station de Saïda

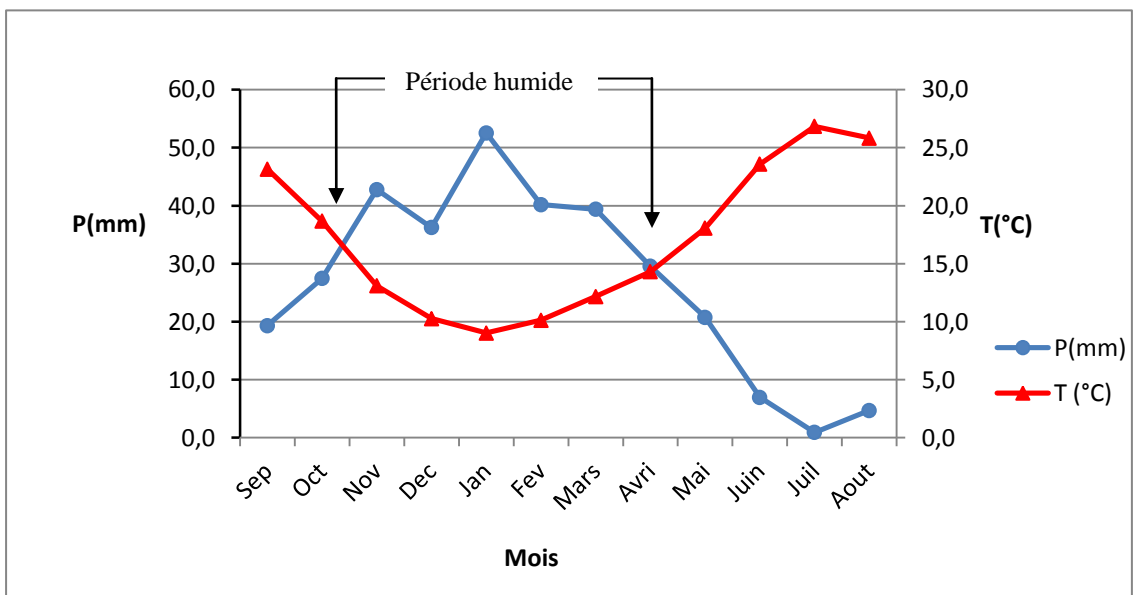


Figure II.11 : Diagramme ombrothermique à la station de Sidi Belabbes

L'analyse des figures II.9, II.10 et II.11 montre :

- L'existence de deux périodes au cours de l'année, une période déficitaire caractérisée par des températures élevées et des précipitations minimales et une autre période humide traduite par l'abondance des précipitations.

- La période humide s'étale sur six (06) mois (du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril) aux stations de Mascara et Sidi Belabbes. Mais à la station de Saida, la période humide est de sept (07) mois (du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril).

II.4.4 Climatogramme d'EMMBERGER (Q_2)

Le quotient pluviothermique " Q_2 " d'EMMBERGER est une expression synthétique du climat méditerranéen en tenant compte de la moyenne annuelle des précipitations et des températures (maximale et minimale) (Gouaidia, 2008).

Q_2 est calculé par la relation suivante :

$$Q_2 = 2000 \left[\frac{P}{(M^2 - m^2)} \right] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en ° Kelvin (°K).

m : Moyenne des minima du mois le plus froid en ° Kelvin (°K).

Les résultats de calcul du quotient pluviométrique Q_2 des trois (03) stations climatologiques sont donnés au tableau II.7.

Tableau II.7 : Valeurs du quotient pluviométrique Q_2 des trois stations climatologiques

Nom de la station	P (mm)	M (°K)	m (°K)	m (°C)	Q_2
Matmore	325,3	308,6	276,1	3,0	34,1
Saida	345,4	309,2	276,2	3,1	35,8
Sidi Belabbes	320,7	308,7	276,1	3,0	33,6

Les valeurs de Q_2 et la moyenne des minima **m** du mois le plus froids ainsi obtenus sont en suite portées sur le climatogramme d'EMMBERGER (Figure II.12).

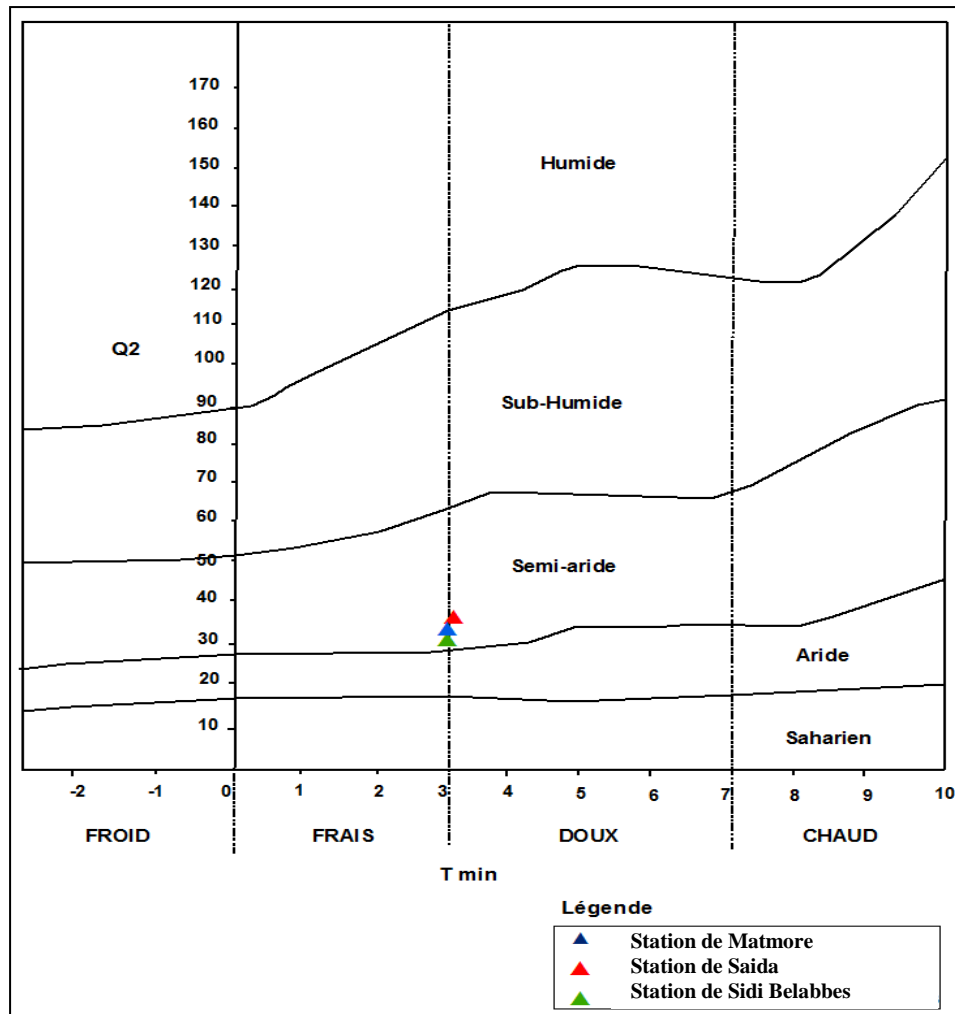


Figure II.12 : Quotient pluviométrique des stations climatologiques utilisées sur le climatogramme d'EMBERGER

D'après la figure II.12, les trois stations climatologiques sont situées dans l'étage bioclimatique semi-aride à la limite frais et doux.

II.4.5 Indice d'aridité annuelle de DE MARTONE (I)

L'indice d'aridité annuelle "I" de DE MARTONE prend en considération les facteurs précipitations et températures. Il est calculé par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{(T + 10)} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

P : Précipitations annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

Tableau II.8: Classification du climat selon l'indice (I) d'aridité de DE MARTONNE

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper-aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 35$	Humide

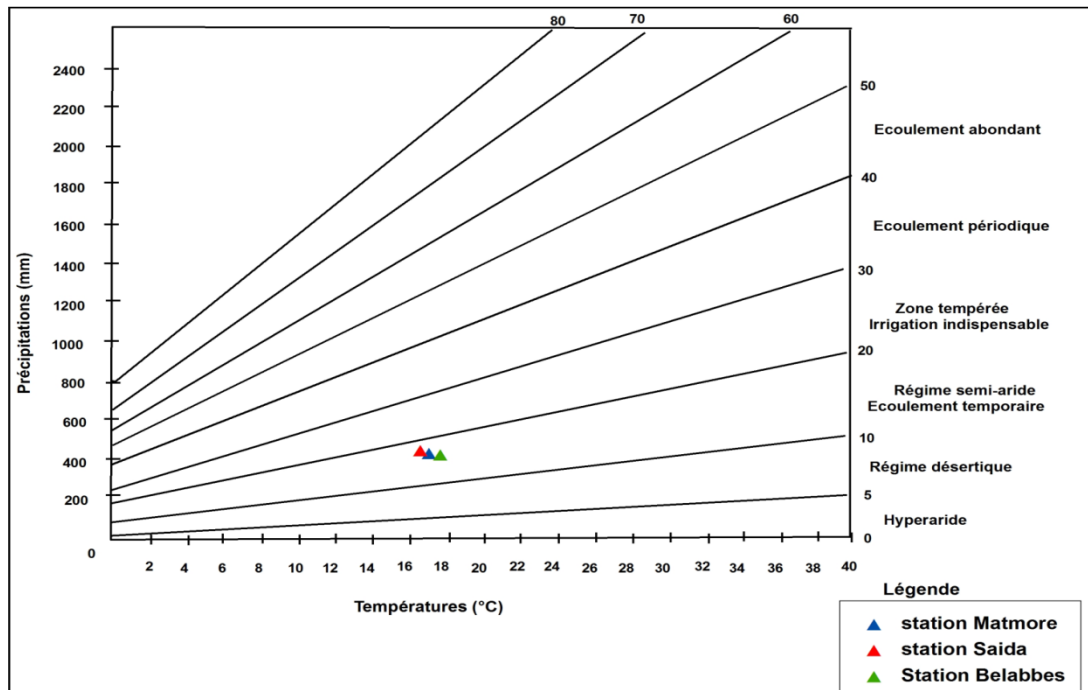
Source : (Debbakh, 2012)

Les résultats de calcul de l'indice d'aridité (I) des trois stations climatologiques sont récapitulés dans le tableau II.9.

Tableau II.9 : Indice d'aridité (I) annuelle de DE MARTONE des trois (03) stations climatologiques

Nom de la station	P (mm)	T(°C)	I
Matmore	325,3	17,0	12,09
Saida	345,4	16,7	12,94
Sidi Belabbes	320,7	17,1	11,83

Pour savoir le régime climatique des trois stations climatologiques, les valeurs de précipitation et de températures moyennes annuelles sont portées sur le diagramme de DEMARTONE (Figure II.13).

**Figure II.13 :** Diagramme de DE MARTONE des trois stations climatologiques

Les résultats du tableau II.9 et la figure II.13 montre que l'indice d'aridité (**I**) est compris entre 10 et 20 pour les trois (03) stations climatologiques où le régime est semi-aride avec des écoulements temporaires.

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

II.5 Bilan hydrologique

Selon la disponibilité des données climatiques (Précipitations (P), Température (T)), le bilan hydrologique a été établi suivant la méthode classique de THORNTHWAITTE.

Les principaux paramètres à calculer sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (EXC).

II.5.1 L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est une des composantes fondamentales du bilan hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. Cependant, on distingue :

- ✓ L'évapotranspiration potentielle **ETP**, qui correspond à la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre, par un couvert végétal ([Hadj-Said, 2008](#)).
- ✓ L'évapotranspiration réelle **ETR**, qui correspond à la quantité d'eau effectivement (réellement) évaporée par le sol et transpirée par la végétation ([Debbakh, 2012](#)).

II.5.1.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle "ETP"

Selon les données disponibles, le modèle empirique de Thornthwaite a été opté pour calculer l'évapotranspiration potentielle.

L'agronome américain G.W. Thornthwaite proposa en 1948 une expression pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle en tenant compte seulement de la température mensuelle ([Hamel, 2009](#)).

Elle s'écrit sous la formule suivante :

$$ETP = 16 \left(10 \cdot \frac{t}{I} \right)^a \times F(\lambda) \quad (\text{II.7})$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (\text{II.8})$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (\text{II.9})$$

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

Avec :

ETP : L'évapotranspiration potentielle (mm).

t : température moyenne mensuelle (°C).

I : Indice thermique annuel.

i : indice thermique mensuel.

a : Fonction complexe de l'indice I.

$F(\lambda)$: 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.10, II.11 et II.12.

Tableau II.10 : L'ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Matmore

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
Paramètres													
T(°C)	22,9	18,4	13,0	10,1	8,9	10,0	12,1	14,1	18,0	22,8	26,6	26,7	17,0
P(mm)	15,8	31,3	47,6	42,4	41,8	40,8	37,8	29,6	26,6	4,2	2,0	5,2	325,3
i	10,01	7,19	4,25	2,90	2,39	2,86	3,81	4,80	6,95	9,95	12,56	12,63	80,31
a	1,78												
$F(\lambda)$	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	106,4	67,9	32,4	20,5	16,7	20,1	34,2	47,5	81,4	124,0	165,9	157,5	874,5

Tableau II.11 : 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)	22,6	17,9	12,5	9,4	8,4	9,6	11,6	13,6	17,7	23,1	27,1	27,0	
P(mm)	22,5	42,5	39,6	36,9	40,1	37,4	38,6	33,9	29,3	10,4	5,4	8,7	345,4
i	9,81	6,90	4,00	2,60	2,19	2,68	3,58	4,55	6,78	10,15	12,92	12,85	79,01
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	104,8	65,5	30,8	18,5	15,5	19,2	32,4	45,4	79,4	126,9	170,8	161,4	870,4

Tableau II.12 : 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	18,7	13,1	10,3	9	10,1	12,2	14,3	18,1	23,6	26,8	25,8	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	10,21	7,37	4,3	2,99	2,43	2,9	3,86	4,91	7,01	10,48	12,70	11,99	81,16
a	1,80												
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	109,2	69,7	32,6	20,9	16,8	20,2	34,3	48,4	81,4	131,2	167,6	148,9	881,0

Les résultats de calcul de l'ETP par la formule de Thornthwaite aux trois (03) stations climatiques, indiquent des valeurs moyenne annuelles qui se rapprochent entre elles et comprises entre 870,4 mm et 881 mm. L'ETP est maximale en période chaude, traduit par les 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 que l'ETP.

II.5.1.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle "ETR" et l'excédent "EXC"

D'après Soro et al (2011), le calcul de l'ETR et l'excédent 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 100 mm (recommandation de THORNTHWAITE ([Remenieras, 1976](#))).

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.

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).

Le calcul du bilan hydrologique est récapitulé dans les tableaux II.13, II.14 et II.15.

Tableau II.13 : Bilan hydrique à la station de Matmore selon Thornthwaite

	Min	Max													
Mois	/	/	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
ETP (mm)	/	/	106,4	67,9	32,4	20,5	16,7	20,1	34,2	47,5	81,4	124,0	165,9	157,5	874,5
P(mm)	/	/	15,8	31,3	47,6	42,4	41,8	40,8	37,8	29,6	26,6	4,2	2,0	5,2	325,1
ETR(mm)	/	/	15,8	31,3	32,4	20,5	16,7	20,1	34,2	47,5	81,4	31,5	2	5,2	
RFU (mm)	0	100	0,0	0,0	15,2	37,1	100,0	100,0	100,0	82,1	27,3	0,0	0,0	0,0	
D = ETP-ETR (mm)	/	/	90,6	36,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,5	163,9	152,3	535,9
Exc= P-ETP (mm)	/	/	0,0	0,0	0,0	0,0	25,1	20,7	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49,4

Tableau II.14 : Bilan hydrique à la station de Saida selon Thornthwaite

	Min	Max													
Mois	/	/	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
ETP (mm)	/	/	104,8	65,5	30,8	18,5	15,5	19,2	32,4	45,4	79,4	126,9	170,8	161,4	870,4
P(mm)	/	/	22,5	42,5	39,6	36,9	40,1	37,4	38,6	33,9	29,3	10,4	5,4	8,7	345,3
ETR(mm)	/	/	22,5	42,5	30,8	18,5	15,5	19,2	32,4	45,4	79,4	48,8	5,4	8,7	
RFU (mm)	0	100	0,0	0,0	8,8	27,2	100	100	100	88,5	38,4	0,0	0,0	0,0	
D = ETP-ETR (mm)	/	/	82,3	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	78,1	165,4	152,7	501,5
Exc= P-ETP (mm)	/	/	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	18,2	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49,2

Tableau II.15 : Bilan hydrique à la station de Sidi Belabbes selon Thornthwaite

	Min	Max													
Mois	/	/	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
ETP (mm)	/	/	109,2	69,7	32,6	20,9	16,8	20,2	34,3	48,4	81,4	131,2	167,6	148,9	881,0
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	320,8
ETR(mm)	/	/	19,3	27,5	32,6	20,9	16,8	20,2	34,3	48,4	81,4	27,5	0,9	4,7	
RFU (mm)	0	100	0,0	0,0	10,2	25,5	100,0	100,0	100,0	81,2	20,5	0,0	0,0	0,0	
D = ETP-ETR (mm)	/	/	89,9	42,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	103,7	166,7	144,2	546,7
Exc= P-ETP (mm)	/	/	0,0	0,0	0,0	0,0	35,7	20,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,8

Sachant que :

ETP : L'évapotranspiration potentielle (mm).

P : Précipitations (mm).

ETR : L'évapotranspiration réelle (mm).

RFU : Réserve facilement utilisable (mm)

D : Déficit hydrique (mm)

EXC : L'excédent (mm).

Les résultats des tableaux précédents montrent que :

- Pour la station de Matmore, le déficit hydrique atteint la valeur de 535,9 mm/an, représentant ainsi presque 1,65 fois la valeur des précipitations annuelle et qui s'étale du mois de Juin jusqu'au Octobre. La RFU se vide progressivement à partir du mois d'Avril pour être totalement épuisée .A partir du mois de Novembre, la (RFU) commence à se reconstituer pour atteindre son maximum (RFU=100 mm) où l'excès sera affecté aux écoulements ou à la percolation.
- A la station de Saida, le déficit hydrique atteint la valeur de 501,5 mm/an , représentant ainsi presque 1,45 fois la valeur des précipitations annuelle et qui s'étale du mois de juin jusqu'au Octobre. La RFU se vide progressivement jusqu'à son épuisement puis elle commence à se remplir à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum en période hivernale (Janvier, Février, Mars) où l'excès sera affecté aux écoulements ou à la percolation.
- En revanche, la station de Sidi Belabbes présente un déficit hydrique de 546,7 mm/an, représentant 1,70 fois la valeur des précipitations annuelles et qui s'étale sur une période de cinq (05) mois (saison sèche). La RFU se vide progressivement jusqu'à l'épuisement total puis elle se reconstitue pour atteindre son maximum (RFU=100 mm) durant l'hiver où l'excès sera affecté aux écoulements ou à la percolation.

En faisant comparaison entre les trois (03) stations climatologiques, il a été remarqué que la durée des périodes déficitaires (07 mois) et excédentaires (05 mois) est la même pour l'ensemble des stations avec des fréquences qui se rapprochent.

II.5 Cadre géologique

Le bassin versant de la Macta occupe la partie occidentale de l'Atlas Tellien. La géologie des terrains est très variés allant de l'âge primaire au Quaternaire, parmi les quelles dominant les faciès marneux et calcaires (Froget, 1979).

D'après la géologie du bassin versant de la Macta (Figure II.14), on distingue :

- Des terrains quaternaires et plio-quaternaires occupent les dépressions au Nord, Nord-Est et les creux des vallées. Ils reposent sur de grés Calabriens, grés argileux du Pliocène supérieur, des gypses et des argiles gypseuses du Miocène supérieur .
- Les terrains du Pliocène affleurent en grande quantité à l'Ouest du bassin versant.
- Les formations du jurassique supérieur (marnes gris-vert) et du crétacé inférieur (grès) affleurent au centre, au Sud et au Sud-Est.
- Des formations géologiques de l'âge primaire apparaissent dans la région Sud-Est constituées essentiellement de schistes et de quartzites qui affleurent dans la vallée de l'Oued Tiffrit, Oued Sidi Mimoun et Oued Hasna avec la présence d'intrusion granitique et de coulées de laves basaltiques (Pitaud, 1973 in Touaibia, 2002).

La présence des failles est répandue dans le bassin versant de la Macta (Figure II.13). Cependant, on trouve :

- Dans la région Sud-Est (Plateau de Saida), les failles sont dus à la tectonique cassante des terrains carbonatés avec constitution de blocs dolomitiques de dimensions et de forme extrêmement variées qui détermine les caractéristiques hydrogéologiques très particulières des régions karstiques (Pitaud, 1973 in Touaibia, 2002).
- A l'Est, les failles d'effondrement du substratum jurassique sont l'origine des sources d'Aiounes Fekan (Sourisseau, 1974 in Touaibia, 2002).
- A Sud-Ouest, les monts de Tlemcen ont été affectés par une tectonique cassante qui est le reflet des déformations du socle.

La carte lithologique a été digitalisée à partir de la géologie de l'Algérie, Edition (1951-1952) en utilisant le logiciel Arc Gis 9.3.

La stratigraphie des terrains du bassin versant de la Macta est donnée en détail au tableau II.16.

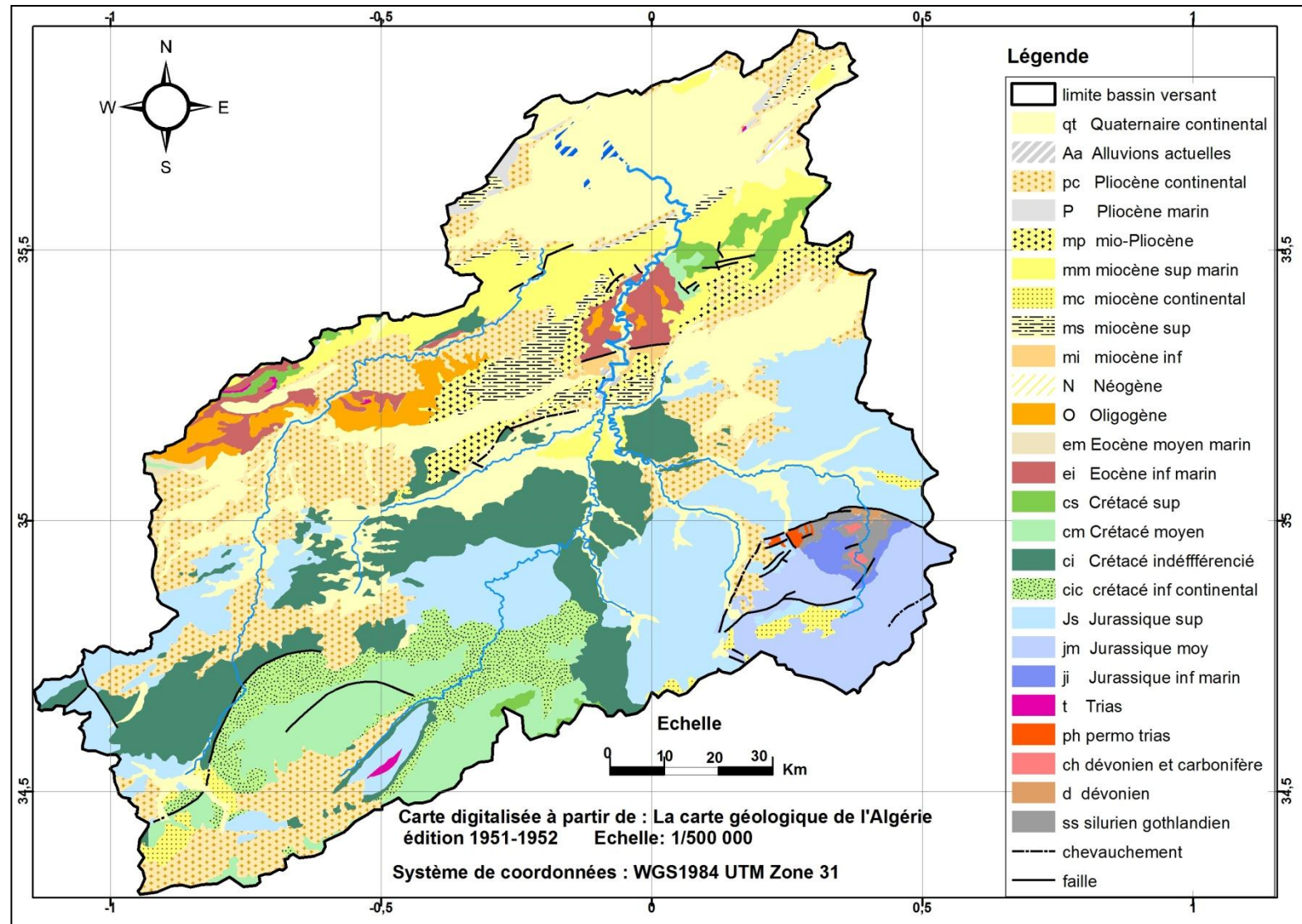


Figure II.14 : Carte géologique du bassin versant de la Macta

Tableau II.16: 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.6 Occupation du sol

La carte d'occupation des sols a été établie par télédétection en utilisant le logiciel « ENVI 4.7 », selon les étapes suivantes :

- Acquisition de quatre (04) images satellitaires des régions de Mascara, Saida, Sidi Belabbes et Oran par le capteur LANDSAT et avec une résolution de 30 m, année 2011.
- Extraction de la zone de la Macta.
- Une classification non supervisée est établie.

Les résultats obtenus (Figure II.15) permettent de distinguer six (06) classes, à savoir : Couvert végétal permanent (forêts, maquis, arboriculture...), Couvert végétal temporaire (agriculture), Couvert végétal clairsemé (steppes, parcours), Sol nu, Eau libre (barrage, lac) et Agglomération.

La surface occupée par chaque classe est donnée au tableau II.17

Tableau II.17: 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	14389	100

La carte d'occupation du sol et le tableau de superficie de chaque classe indiquent la dominance du couvert végétal temporaire (58 % de la surface total) concentré dans les plaines intérieures de Sidi Belabbes, Ghriss et les grands périmètres irrigués (Habra ,Sig). La couverture végétale clairsemée est dominée au Sud-Ouest (l'Alfa, parcours, maquis clairs) (Bouasria *et al.*, 2010). Alors que le couvert végétal permanent occupe 20% de la surface totale qui est caractérisé par des forêts couvertes de pins d'Alep (Louza, Belarbi, Tenira et Tiffrit) , de maquis et de l'arboriculture (olivier, vignobles,...) (Baahmed, 2004).

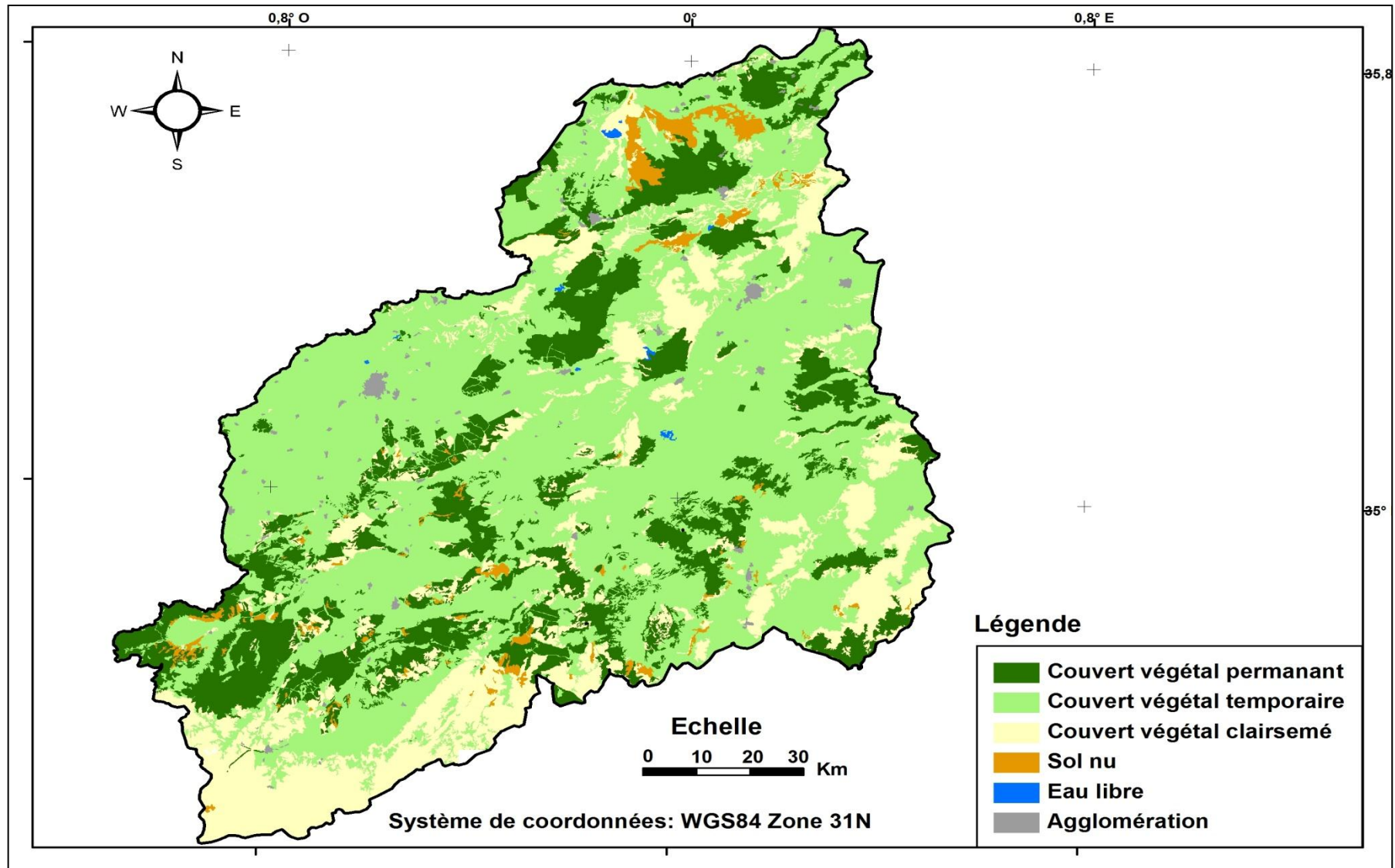


Figure II.15 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Macta

II.7 Ressources en eau

II.7.1 Ressources en eau souterraines

Les nappes aquifères se concentrent dans la partie centrale et au nord du bassin versant de la Macta (Figure II.16) dont leur capacité mobilisée est de **76,74 Hm³** (A.B.H, 2013) (Tableau II.18).

Tableau II.18 : Ressources en eau dans le bassin versant de la Macta

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

(Source : A.B.H O.C.C, 2013)

II.7.2 Ressources en eau superficielles

Les ressources en eau superficielles dans le bassin versant de la Macta sont estimées à **227,41 Hm³** (tableau II.18) mobilisée par cinq (05) barrages dont leurs caractéristiques sont indiquées au tableau II.19 et figure II.19.

Tableau II.19 : 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 Sfisseg 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

(Source A.N.B.T, 2013)

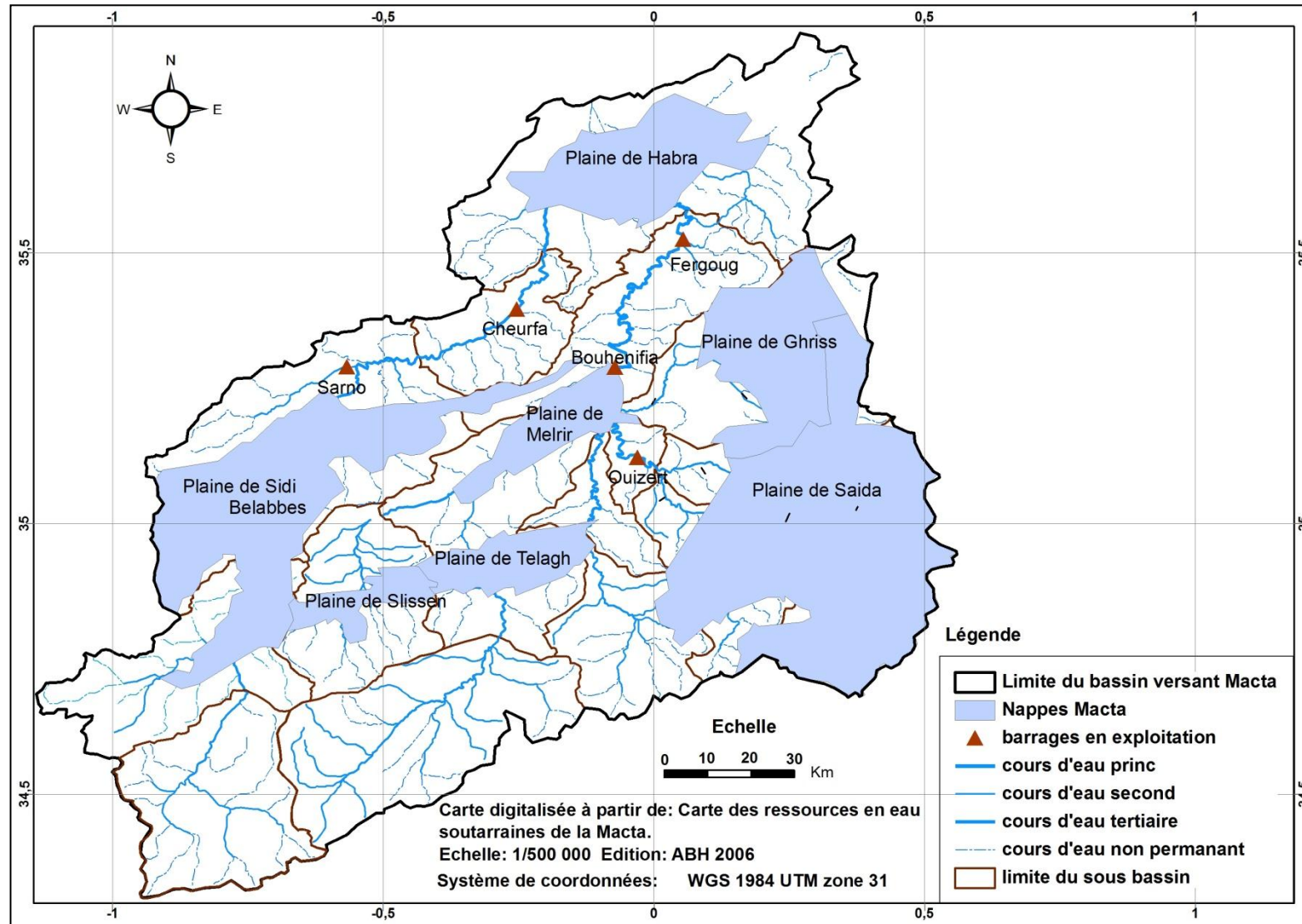


Figure II.16 : Ressources en eau superficielles et souterraines dans le bassin versant de la Macta

II.8 L'agriculture comme activité principale

L'agriculture constitue l'activité économique principale de la région. Le bassin versant de la Macta enferme plusieurs périmètres d'irrigation dont leurs caractéristiques sont mentionnées au tableau II.20.

Tableau II.20 : 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		
	Sig	4 500	4 146		
Petite et moyenne hydraulique (PMH)	-	129 856	45 142		
Total		140 856	55 074	3%	97%

(Source : A.B.H O.C.C, 2013)

Conclusion

Le bassin versant de la Macta est situé au Nord-Ouest de l'Algérie Septentrionale, couvrant une superficie de l'ordre de **14 389 Km²**. Ces principaux Oueds sont Oued Mekerra , Oued El Mabtouh à l'Ouest et Oued El Hammam à l'Est. Cependant, Le relief du bassin versant est très varié allant des basses plaines du littoral aux hautes altitudes où le caractère montagnard est très répandu.

Le bassin versant de la Macta est composé de seize (16) sous bassins, mais un autre découpage à été effectué selon notre objectif en considérant que chaque station hydrométrique représente l'exutoire d'un nouveau sous bassin versant. Donc, seize (16) nouvelles surfaces ont été obtenues.

Les différents indices climatiques montrent que le bassin versant de la Macta appartient à l'étage bioclimatique semi-aride (**321mm<P<345mm**) 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 offrent un cadre pour la préparation aux différentes analyses hydrologiques et statistiques.

CHAPITRE III :

COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Chapitre III

Collecte et traitement des données

Introduction

L'acquisition des données et leur traitement est la phase primordiale de toute hydrologie. Ce chapitre présente les différentes données hydrométriques et pluviométriques utilisées, qui sont des variables hydrologiques aléatoires mesurées à l'endroit des stations bien étudiées. Ensuite un soin particulier est donné au traitement des données afin de les préparer aux différents calculs.

III.1 Présentation des données

III.1.1 Données hydrométriques

III.1.1.1 Caractéristiques et localisation

Le bassin versant de la Macta comporte vingt deux (22) stations hydrométriques implantées à différents endroits, dont seize (16) stations ont été retenues.

Ces stations hydrométriques retenues ont été choisies selon :

- ☞ 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 transformé en apport moyen mensuel. Ces données ont été fournies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Oran et d'Alger.

Les données hydrométriques seront utilisées pour :

- ✓ Connaitre le régime des oueds de la Macta à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle à différents endroits.
- ✓ Connaitre l'ampleur des changements climatiques sur la ressource en eau.
- ✓ Voir la performance des modèles empiriques de calcul des apports liquides en les comparants avec l'apport mesuré au droit des stations hydrométriques.
- ✓ Savoir les paramètres qui influencent la génération des apports liquides par une analyse multivariée.

La localisation et les caractéristiques des stations hydrométriques (le code, les coordonnées et période d'observation) sont mentionnés au tableau III.1 et figure III.1.

Tableau III.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques retenues dans le bassin versant de la Macta

N°	N° du sous bassin versant	Nom de la station	Code de la station	Oued	Coordonnées		Année de mise en service
					Lat. (°)	Long. (°)	
1	1	El Hacaiba	11 01 01	Mekerra	34°69N	0°76W	1961
2	2	Sidi Ali Ben Youb	11 02 01	Mekerra	34°97N	0°74W	1949
3	3	Sidi Bel Abbes	11 03 01	Mekerra	35°22N	0°61W	1942
4		Sarno amont	11 03 02	Mekerra	35°18N	0°66W	1961
5		Lamtar aval	11 03 31	Tissaf	35°08N	0°76W	1973
6	5	Tenira	11 05 06	Melrir	35°01N	0°53W	1973
7	10	Laabana	11 10 03	Hounet	35°20N	0°09W	1974
8	11	Kilomètre 50	11 11 06	Saida	34°99N	0°16E	1971
9		Saida PN03	11 11 27	Saida	34°78N	0°13E	1973
10		Sidi Boubekeur	11 11 29	Saida	35°05N	0°03E	1989
11	12	Oued Taria	11 12 01	Taria	35°10N	0°09E	1972
12		Sidi Mimoun	11 12 08	Mimoun	35°04N	0°38E	1971
13		Dne,Bouchikhi	11 12 20	Hasna	35°02N	0°25E	1971
14	14	Ain Fekan	11 14 03	Fekane	35°22N	0°00	1969
15		Ghriss	11 14 12	Froha	35°24N	0°17E	1970
16		Khalouia	11 14 25	Maoussa	35°42N	0°27E	1974

Avec :

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

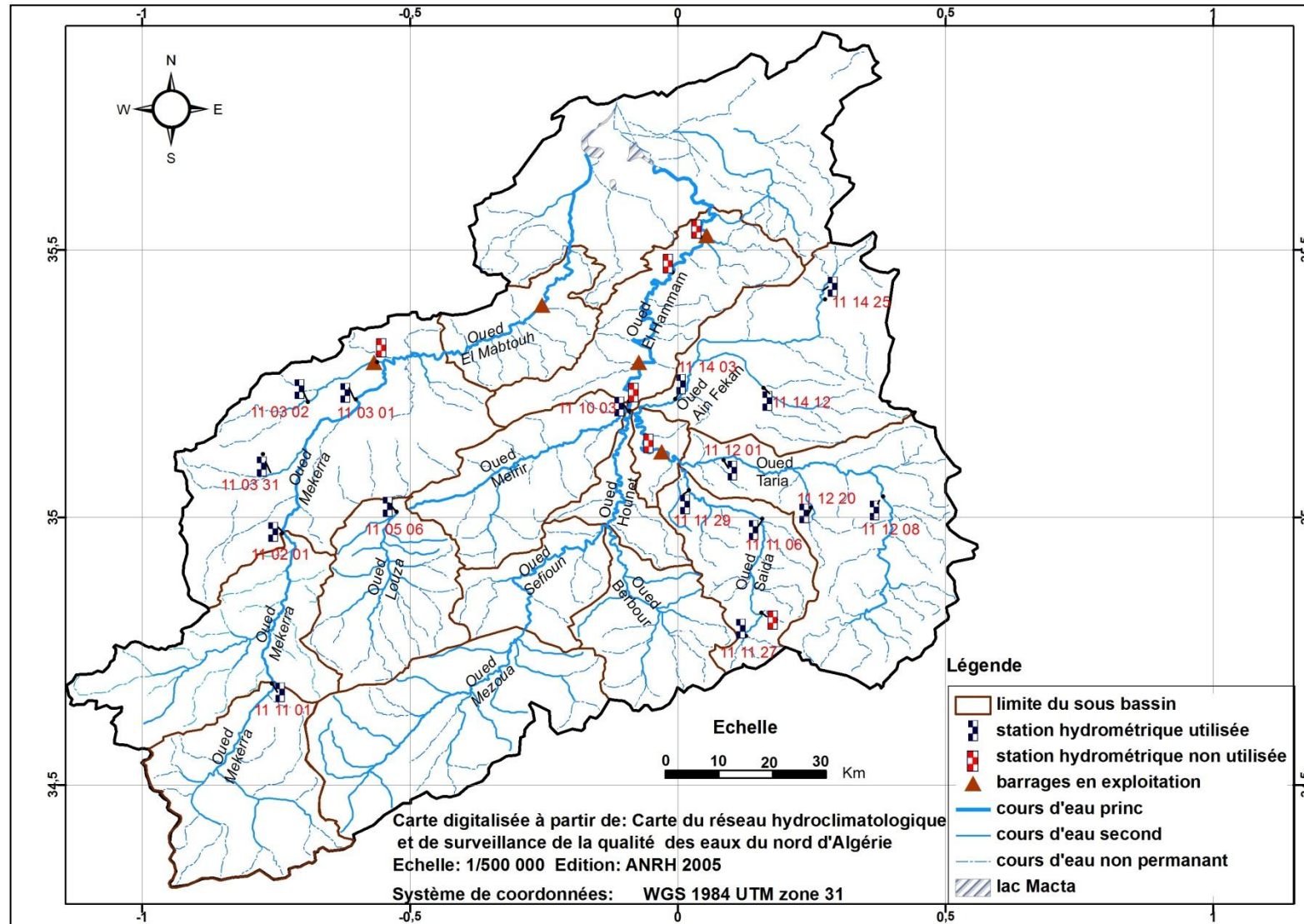


Figure III.1 : Localisation des stations hydrométriques dans le bassin versant de la Macta

III.1.2 Données pluviométriques

III.1.2.1 Caractéristiques et localisation

Cent vingt (120) stations pluviométriques sont implantées et réparties sur l'ensemble du bassin versant de la Macta. Quatre vingt (80) stations sont opérationnelles, parmi les quelles vingt (20) stations ont été utilisées (Figure III.2).

Les stations pluviométriques ont été choisies selon le nouveau découpage des sous bassins versants de la Macta, en tenant compte des critères suivants :

- La position dans le sous bassin ; c'est-à-dire que la station choisie est représentative du sous bassin versant. Malheureusement, dans certains cas cette condition n'a pas été respectée du fait de la présence d'une seule station dans le sous bassin versant.
- La qualité des données ; c'est-à-dire que les séries d'observation doivent 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 collectées sont de nature pluies mensuelles (mm), qui seront utilisées pour :

- ✓ Etudier le régime pluviométrique du bassin versant de la Macta à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle.
- ✓ Calculer l'apport liquide et voir l'influence des précipitations sur l'abondance des oueds de la Macta.
- ✓ Connaitre l'ampleur des changements climatiques sur le bassin versant de la Macta.

Les données pluviométriques ont été fournies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Oran et d'Alger.

La localisation des stations pluviométriques étudiées et leurs caractéristiques sont indiquées au tableau III.2 et figure III.2.

Tableau III.2 : Caractéristiques des stations pluviométriques retenues dans le bassin versant de la Macta

N°	Code	Nom	Lat. (°)	Long. (°)	Z (m)	Date de mise en service
1	11 01 02	Raselma	34°49N	0°81W	1097	1914
2	11 02 03	Hacaiba	34°70N	0°75W	950	1942
3	11 03 05	Sidi Belabbes	35°17N	0°65W	485	1968
4	11 03 10	Lamtar	35°07N	0°79W	576	1942
5	11 03 18	Sidi Lahcene	35°16N	0°69W	470	1973
6	11 05 09	Sidi Ahmed	34°95N	0°54W	653	1975
7	11 06 03	Ain Frass	35°20N	0°18W	424	1958
8	11 07 01	Dahya	34°64N	0°67W	1200	1942
9	11 08 02	Daoud	34°92N	0°21W	660	1926
10	11 09 04	Sidi Boulefred	34°79N	0°08W	885	1973
11	11 10 02	Med Touhami	34°99N	0°09W	600	1973
12	11 11 03	Ain El Hadjar	34°76N	0°15E	1000	1978
13	11 11 13	Djebel Keroua	34°90N	0°12E	950	1971
14	11 11 16	Sidi Amar Shgeo	35°02N	0°11E	590	1970
15	11 12 05	Ain Soltane	34°97N	0°30E	980	1969
16	11 12 08	Sidi Mimoun	35°03N	0°38E	690	1942
17	11 12 17	Beniane	35°10N	0°23E	565	1974
18	11 14 04	Aoufs	35°18N	0°36E	970	1970
19	11 14 13	Tizi	35°32N	0°07E	467	1973
20	11 14 17	Ain Fares	35°47N	0°25E	806	1953

Avec :

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

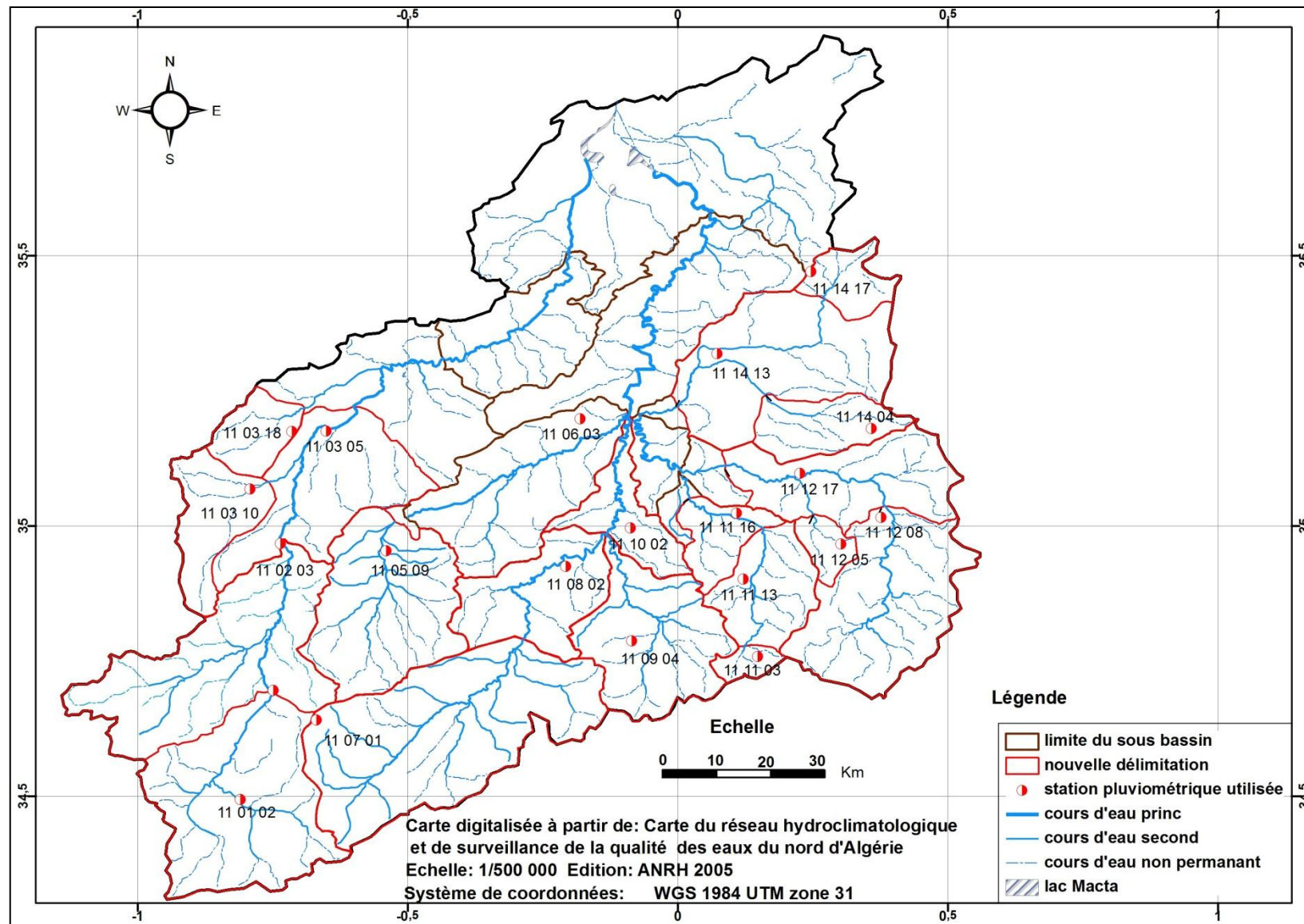


Figure III.2 : Localisation des stations pluviométriques retenues dans le bassin versant de la Macta

III.2 Traitement des données

Les données hydrologiques (pluviométrie, débit liquide) présentent sous forme de séries d'observation consécutives et contiennent souvent des lacunes c'est-à-dire absence de mesure, donc une perte d'information dû soit à des évènements pouvant avoir forcé l'interruption de la prise de mesure, soit à l'absence de l'observateur ou encore à une panne de l'appareil. La présence de plusieurs lacunes et anomalies dans la série des données rend leur traitement long et fastidieux, notamment si les données sont instantanées, journalières ou mensuelles.

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.

III.2.1 Comblement des lacunes

Le comblement des séries hydrologiques mensuelles a été effectué en utilisant la méthode statistique de régression linéaire simple entre deux (02) stations voisines de caractéristiques semblables, avec une probabilité de risque égale à 5%, donc un intervalle de confiance de 95%. Cette méthode statistique est intégrée dans le logiciel « **STATISTICA 6.1** ».

L'équation de la droite de régression linéaire est sous la forme :

$$y = ax + b \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

y : La série des données de la station lacunaire (à combler).

x : La série des données de la station de référence.

a : Coefficient de régression.

b : L'ordonnée à l'origine.

III.2.1.1 Comblement des lacunes dans les séries hydrométriques

La station hydrométrique de référence et la station lacunaire doivent être implantées : soit sur le même oued, soit sur un oued qui alimente un autre oued.

Les résultats de régression linéaire entre la station hydrométrique lacunaire 110101 et celle de référence 110201 sont indiqués au tableau III.3. Les autres stations sont figurées en annexe1.

Tableau III.3: Synthèse de la régression linéaire entre la station hydrométrique 110101 et 110201

Station lacunaire	Station de référence	Période d'observation	Mois	Equation de régression	Paramètres de l'équation			
					N	R ²	P	Pb
110101	110201	1961-2006	Sep	$110101 = 0,59 \times (110201)$	38	0,80	0,000000	
			Oct	$110101 = 0,28 \times (110201)$	38	0,69	0,000000	
			Nov	$110101 = 0,29 \times (110201) - 0,03$	38	0,79	0,000000	0,047
			Déc	$110101 = 0,07 \times (110201)$	39	0,19	0,0061	
			Jan	$110101 = 0,07 \times (110201)$	39	0,12	0,027	
			Fév	$110101 = 0,06 \times (110201)$	39	0,18	0,006	
			Mars	$110101 = 0,38 \times (110201) - 0,11$	39	0,79	0,000000	0,0055
			Avril	$110101 = 0,17 \times (110201)$	37	0,27	0,001	
			Mai	$110101 = 0,28 \times (110201)$	36	0,55	0,000000	
			Juin	$110101 = 0,44 \times (110201)$	37	0,59	0,000000	
			Juillet	$110101 = 0,28 \times (110201)$	37	0,24	0,0019	
			Août	$110101 = 0,21 \times (110201)$	37	0,85	0,000000	

Avec :

N : nombre d'années d'observation ,

R² : Coefficient de corrélation ;

p : Probabilité du risque ;

Pb : probabilité du risque de l'ordonnée à l'origine.

L'analyse des résultats du tableau III.3 permet de constater que :

- Les mois où le coefficient de corrélation est élevé ($R^2 > 0,6$) montrent que la liaison entre ces deux stations est forte avec une faible probabilité du risque ($P \approx 0$) qui est très petite par rapport au seuil de signification 5%.
- Même pour les mois où le coefficient de corrélation est faible ($R^2 < 0,3$), la probabilité du risque (P) reste toujours inférieure à 5%.

Ces résultats montrent que la régression entre la station hydrométrique lacunaire (110101) et la station de référence (110201) est très significative même si le R^2 est faible car la probabilité reste toujours inférieure au seuil 5%.

Ces résultats trouvés sont les mêmes pour les autres stations hydrométriques qui figurent en annexe 1.

III.2.1.2 Comblement des lacunes dans les séries pluviométriques

Le choix de la station pluviométrique de référence et la station lacunaire est basé sur la notion de l'altitude, c'est-à-dire que les deux stations doivent avoir des altitudes proches.

Les résultats de régression linéaire entre la station pluviométrique lacunaire (110102) et la station de référence (110203) sont indiqués au tableau III.4. Les autres stations sont figurées en annexe 2.

Tableau III.4 : Synthèse de la régression linéaire entre la station pluviométrique 110102 et 110203

Station lacunaire	Station de référence	Période d'observation	Mois	Equation de régression	Paramètres de l'équation			
					N	R ²	P	Pb
110102	110203	1942-2010	Sep	$110102 = 0,73 \times (110203) + 8,07$	51	0,48	0,000000	0,03
			Oct	$110102 = 0,78 \times (110203)$	53	0,59	0,000000	
			Nov	$110102 = 0,60 \times (110203)$	50	0,50	0,000000	
			Déc	$110102 = 0,50 \times (110203)$	51	0,39	0,000001	
			Jan	$110102 = 0,51 \times (110203)$	47	0,64	0,000000	
			Fév	$110102 = 0,46 \times (110203)$	50	0,50	0,000000	
			Mars	$110102 = 0,45 \times (110203)$	49	0,36	0,000006	
			Avril	$110102 = 0,69 \times (110203)$	47	0,69	0,000000	
			Mai	$110102 = 0,69 \times (110203)$	48	0,49	0,000000	
			Juin	$110102 = 1,12 \times (110203)$	49	0,43	0,000000	
			Juillet	$110102 = 0,36 \times (110203) + 2,95$	47	0,14	0,0099	0,0007
			Août	$110102 = 0,74 \times (110203) + 4,07$	45	0,50	0,000000	0,016

Avec :

N : nombre d'années d'observation,

R² : Coefficient de corrélation ;

P : Probabilité du risque ;

Pb : Probabilité du risque de l'ordonnée à l'origine ;

L'analyse des résultats du tableau III.4 permet de constater que :

- Le coefficient de corrélation est élevé pour la plupart des mois avec une probabilité de risque P très faible ($P \approx 0$). Ce qui montre que la liaison est forte entre ces deux stations durant ces mois.
- Au mois de Juillet, le coefficient de corrélation entre les deux (02) stations est faible ($R^2=0,14$), mais la probabilité du risque P reste toujours inférieur à 0,05.

Ces résultats montrent que la régression entre la station pluviométrique lacunaire (110102) et la station de référence (110203) est très significative, même si le R^2 est faible car la probabilité du risque (P) est toujours inférieure au seuil de signification 5%.

Ces résultats trouvés sont les mêmes pour les autres stations pluviométriques qui figurent en annexe 2.

III.2.2 Vérification des hypothèses « échantillon Indépendant et Identiquement Distribué » I.I.D

Après le comblement des lacunes, les séries de données doivent vérifier certaines conditions avant de les utiliser dans les différents calculs.

Ces conditions sont : l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité regroupées sous la notion « échantillon **I**ndépendant et **I**dentiquement **D**istribué ».

Pour vérifier ces conditions, les tests utilisés dans ce travail sont :

- ✓ Test de Wald-Wolfowitz pour vérifier l'indépendance.
- ✓ Test de Wilcoxon-Mann-Whitney à l'échelle annuelle pour vérifier l'homogénéité.
- ✓ Test de Kendall pour vérifier la stationnarité.

Ces tests sont intégrés dans le logiciel HYFRAN (**H**ydrological **FR**equency **AN**alysis) version 1.1.

III.2.2.1 Vérification des séries hydrométriques

Les séries hydrométriques avec les lacunes reconstituées, ont été testées en termes d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité à l'aide du logiciel « **HYFRAN 1.1** » au seuil de signification 5% à l'échelle mensuelle, annuelle et saisonnière.

Habituellement en hydrologie, les échantillons où les tests sont réussis au niveau de signification 5% sont seulement retenus ; mais dans notre cas même les échantillons acceptés au niveau de signification 1% sont aussi retenue et ce, pour pouvoir exploiter le maximum de valeurs réellement collectées.

Les résultats de vérification des hypothèses d'Indépendance, d'homogénéité et de stationnarité appliquées à la station 110101 sont donnés au Tableau III.5. Les autres stations hydrométriques sont figurées en annexe 3.

Tableau III.5 : Résultats des tests de vérification des hypothèses I.D.D à la station hydrométrique 110101

Station	Code	Mois	Caractéristiques			Indépendance	Homogénéité	Stationnarité
			\bar{x}	σ	C_v	$\alpha\%$	$\alpha\%$	$\alpha\%$
El Hacaiba	11 01 01	Sep	0,47	0,77	1,64	75,9	73,8	54,4
		Oct	0,42	0,68	1,6	58,7	69,2	77,7
		Nov	0,12	0,15	1,25	34,6	78,3	57,8
		Déc	0,02	0,02	1,36	11,1	7,5	<u>2,9</u>
		Jan	0,02	0,03	1,24	<u>1,2</u>	52,0	37,3
		Fév	0,03	0,08	2,45	32,4	26,3	27,5
		Mars	0,14	0,40	2,96	43,7	23,0	23,3
		Avril	0,12	0,25	2,04	33,6	90,4	67,8
		Mai	0,18	0,31	1,66	25,2	51,6	92,7
		Juin	0,14	0,27	1,92	13,7	<u>2,0</u>	16,3
		Juillet	0,09	0,15	1,72	34,7	40,5	16,6
		Août	0,10	0,23	2,32	86,7	72,4	83,2
		Annuel	0,24	0,13	0,55	12,8	9,7	24,1
		Automne	0,34	0,40	1,19	55,2	55,0	28,4
		Hiver	0,02	0,04	1,41	83,7	59,9	39,0
		Printemps	0,15	0,18	1,24	72,1	36,3	32,2
Été	0,11	0,13	1,2	13,9	34,5	51,7		

Avec :

\bar{x} : Moyenne de la série hydrométrique considérée;

σ : Ecart type de la série hydrométrique considérée ;

C_v : Coefficient de variation.

Les résultats du tableau III.5 montrent que les données de la station hydrométrique 110101 sont généralement indépendantes, homogènes et stationnaires à l'échelle mensuelle, annuelle et saisonnière au niveau de signification 5%. Néanmoins, pour les trois (03) mois soulignés dans le tableau, un test est au moins échoué à ce niveau de signification mais ils sont acceptés au niveau de signification 1%.

Finalement, parmi les seize (16) stations hydrométriques testées, seulement **quinze (15) ont été retenues** qui sont homogènes, indépendantes et stationnaires. La station hydrométrique **110331** est **rejetée** car elle **ne répond pas** aux hypothèses de l'indépendance, de l'homogénéité et de la stationnarité même au **seuil de signification 1%**.

III.2.2.2 Vérification des séries pluviométriques

Comme pour les données hydrométriques, les séries pluviométriques ainsi reconstituées, ont été testées à l'aide du logiciel « **HYFRAN 1.1** » au seuil de signification 5% à l'échelle mensuelle, annuelle et saisonnière.

Les résultats de vérification des hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité à la station pluviométrique 110102 sont donnés au Tableau III.6. Les autres stations pluviométriques sont figurées en annexe 4.

Les résultats du tableau III.6 montrent que les données de la station pluviométrique 110102 sont généralement homogènes, indépendantes et stationnaires à l'échelle annuelle, saisonnière et même mensuelle au seuil de signification 5%. Tandis que pour les mois soulignés dans le tableau, un test est au moins échoué à ce niveau de signification mais ils sont acceptés au niveau de signification de 1%.

Tableau III.6: Résultats des tests de vérification des hypothèses I.D.D à la station pluviométrique 110102

Station	Code	Mois	Caractéristiques			Indépendance	Homogénéité	Stationnarité
			\bar{x}	σ	C_v	$\alpha\%$	$\alpha\%$	$\alpha\%$
Ras El Ma	11 01 02	Sep	20,9	24,5	1,17	7,9	12,9	7,7
		Oct	23,8	25,9	1,06	66,8	70,2	18,8
		Nov	25,0	20,3	0,81	18,3	89,5	68,6
		Déc	21,2	19,4	0,91	49,2	82,0	25,7
		Jan	25,1	21,7	0,86	52,5	65,0	67,8
		Fév	19,9	15,1	0,76	8,3	4,4	8,0
		Mars	22,0	17,2	0,78	62,4	18,9	2,0
		Avril	24,8	20,9	0,84	91,6	63,0	89,5
		Mai	22,5	23,3	1,04	4,6	56,2	53,1
		Juin	12,4	19,1	1,54	83,7	45,1	17,4
		Juillet	3,5	4,7	1,34	55,7	71,8	88,3
		Août	8,8	12,9	1,45	3,8	8,5	3,8
		Annuel	217,0	81,1	0,34	9,15	91,4	52,40
		Automne	69,3	45,6	0,66	52,6	28,3	24,1
		Hiver	66,3	36,1	0,54	25,4	43,8	69,3
		Printemps	69,0	35,7	0,52	71,3	68,5	62,7
Eté	23,7	23,0	0,97	15,8	64,0	84,0		

Avec :

\bar{x} : Moyenne de la série hydrométrique considérée;

σ : Ecart type de la série hydrométrique considérée ;

C_v : Coefficient de variation.

Finalement, l'ensemble des séries pluviométriques collectées vérifient les hypothèses d'homogénéité, d'indépendantes et de stationnarité au seuil de signification 5% et même au seuil 1%. Mais du fait que la station hydrométrique 110331 a été écartée, alors la station pluviométrique correspondante (110310) ne sera pas utilisée dans les analyses postérieures.

III.3 Ajustement des données hydrologiques à une loi de probabilité

L'ajustement des données a été réalisé à l'échelle annuelle. Plusieurs lois de distribution ont été utilisées qui sont intégrées dans le logiciel « **HYFRAN 1.1** »

Pour voir le taux d'adéquation de chaque loi de distribution aux valeurs observées, le test de dispersion de Khi-deux (χ^2) est utilisé.

III.3.1 Ajustement des données hydrométriques

Les lois de distribution aux quelles peuvent s'ajuster les données hydrométriques sont :

- Loi Normale (N),
- Loi racine normale (RN),
- Loi log normale à deux (02) paramètres (LN2),
- Loi log normale à trois (03) paramètres (LN3),
- Loi de Gumbel (G).

Les fonctions de densité de probabilité de ces lois de distributions sont décrites en partie bibliographique.

Les résultats d'ajustement des stations hydrométriques aux différentes lois de distribution sont résumés dans le tableau III.7.

D'après les résultats du tableau III.7, il a été remarqué que :

- ✓ L'ensemble des séries hydrométriques s'ajustent à une loi de probabilité.
- ✓ La loi log normale à deux paramètres (LN2) est adéquate à six (06) séries hydrométriques avec un pourcentage de dominance de 40%.
- ✓ La loi Racine normale (RN) est adéquate à quatre (04) stations hydrométriques avec un pourcentage de dominance de 26,67%.
- ✓ La loi de Gumbel est adéquate à trois (03) séries hydrométriques (111003, 111129 et 111412) avec un pourcentage de dominance de 20%.
- ✓ La station hydrométrique de Sidi Ali Ben Youb (110201) s'ajuste à la loi normale et à la loi racine normale (RN). Alors que la station de sidi Belabbes (110301) s'ajuste bien à la loi log normale à trois paramètres (LN3).

Tableau III.7 : Résultats d'ajustement des stations hydrométriques de la Macta aux lois de distribution

Nom de la station	Code station	Normale		Racine normale		Log normale (2)		Log normale (3)		Gumbel	
		χ^2	α (%)	χ^2	α (%)	χ^2	α (%)	χ^2	α (%)	χ^2	α (%)
El Haçaiba	11 01 01	5,09	53,22	2,23	89,77	9,59	14,30	3,86	56,92	2,23	89,77
Sidi Ali Ben Youb	11 02 01	10,00	12,47	10,00	12,47	21,86	0,13	12,05	3,42	18,18	0,58
Sidi Belabbes	11 03 01	7,14	30,84	7,55	27,33	11,64	7,06	5,50	35,79	25,14	0,03
Sarno amont	11 03 02	16,60	1,10	11,20	8,20	4,30	67,00	6,30	27,70	7,10	30,80
Tenira	11 05 06	4,90	29,74	2,65	61,88	2,19	70,02	2,65	44,96	3,66	47,06
Laabana	11 10 03	12,77	2,56	5,91	31,46	10,03	7,44	3,63	45,86	4,09	53,71
Saida PN 03	11 11 27	12,51	2,84	6,89	22,88	4,30	50,75	6,89	14,17	6,03	30,36
PK 50	11 11 06	7,76	17,02	6,46	26,40	3,00	70,00	2,57	63,26	3,43	63,36
Sidi Boubekeur	11 11 29	4,73	44,97	3,00	70,00	3,00	70,00	2,14	71,09	1,27	93,80
Domaine Bouchikhi	11 12 20	4,10	50,02	2,57	76,63	4,40	48,70	17,80	0,10	16,4	0,60
Sidi Mimoun	11 12 08	8,19	14,61	6,89	22,88	5,16	39,64	4,30	36,73	6,03	30,36
Taria	11 12 01	15,54	0,83	4,37	44,97	17,70	0,33	10,78	2,91	6,46	26,40
Ghriss	11 14 12	21,59	0,06	8,19	14,61	/	/	5,59	23,15	5,59	34,77
Khalouia	11 14 25	19,90	0,10	13,80	1,70	7,30	19,80	16,00	0,31	13,80	1,70
Ain Fekane	11 14 03	6,40	26,92	3,20	66,92	21,60	0,06	6,40	17,12	3,20	66,92

Au regard des résultats trouvés, on peut conclure que les séries hydrométriques des oueds de la Macta s'adaptent mieux à la loi log normale (LN2) (40% de dominance), à la loi racine normale (RN) (26,67% de dominance) ou encore à la loi de Gumbel (20% de dominance).

Le graphe d'ajustement des séries hydrométriques de la station hydrométrique 110101 est présenté en figure III.3. Les autres stations sont figurées en annexe 5.

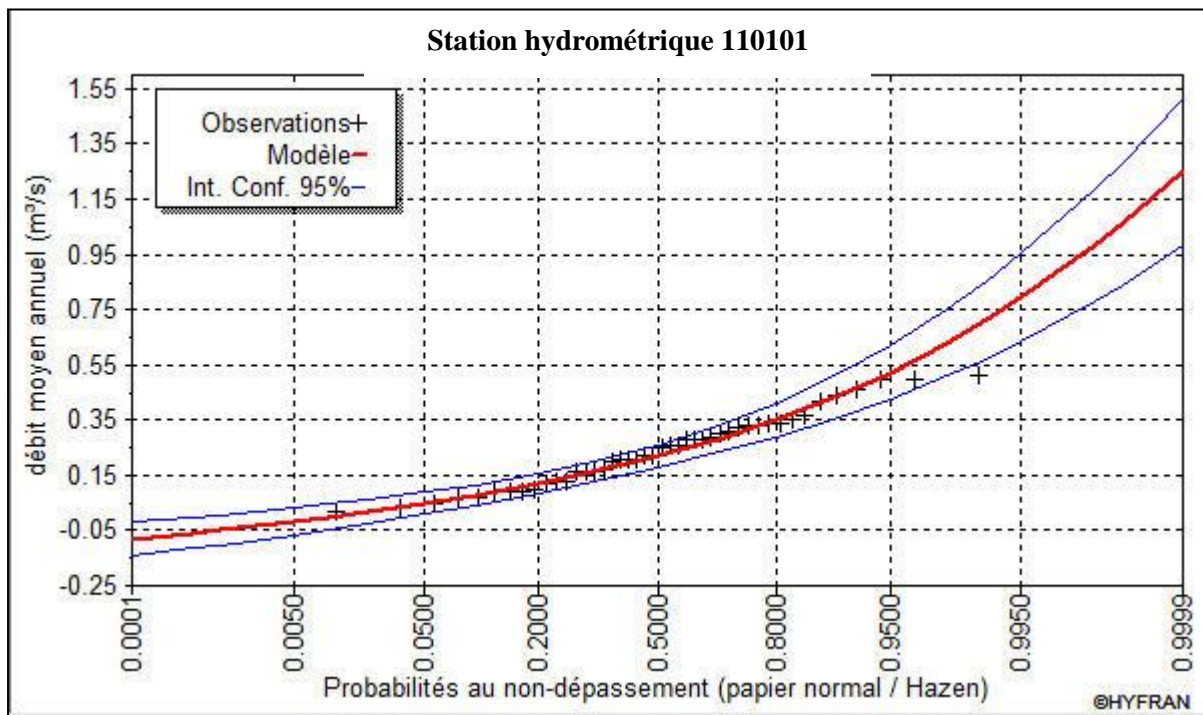


Figure III.3 : Ajustement des apports liquides moyens annuels de la station 110101 à la loi racine normale (RN)

III.3.1.1 Calcul des quantiles

Après avoir choisi la loi d'ajustement la plus adéquate à chaque série hydrométrique, il est facile de calculer les quantiles c'est-à-dire la valeur correspondante à une probabilité donnée en se basant sur l'équation de la droite d'ajustement de loi choisie.

Les droites d'ajustement sont résumées dans le tableau III.8.

Tableau III.8 : Equations des droites d'ajustement des séries hydrométriques

Station	Equation de la droite d'ajustement	Station	Equation de la droite d'ajustement
110101	$x_{p\%} = 0,47 + 0,15u_{p\%}$	111129	$x_{p\%} = 0,57 + 3,45u_{p\%}$
110201	$x_{p\%} = 0,89 + 0,27u_{p\%}$	111208	$\log x_{p\%} = -1,26 + 0,56u_{p\%}$
110301	$\log x_{p\%} = 1,06 + 0,09u_{p\%}$	111220	$x_{p\%} = 0,21 + 0,15u_{p\%}$
110302	$\log x_{p\%} = 0,14 + 0,15u_{p\%}$	111201	$x_{p\%} = 0,73 + 0,34u_{p\%}$
110506	$\log x_{p\%} = -2,26 + 0,88u_{p\%}$	111412	$x_{p\%} = 0,04 + 20u_{p\%}$
111003	$x_{p\%} = 0,36 + 3,70u_{p\%}$	111425	$\log x_{p\%} = -2,23 + 0,55u_{p\%}$
111127	$\log x_{p\%} = -1,81 + 0,49u_{p\%}$	111403	$x_{p\%} = 0,61 + 0,18u_{p\%}$
111106	$\log x_{p\%} = -1,17 + 0,40u_{p\%}$		

Les quantiles ont été calculés par le logiciel **HYFRAN** version **1.1** dont les résultats sont regroupés dans le tableau III.9 :

Tableau III.9 : Apports liquide (Hm^3) des oueds de la Macta pour différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	2	3	5	10	20	50	100
110101	0,47	0,53	0,59	0,66	0,71	0,77	0,81
110201	0,89	1,01	1,12	1,24	1,34	1,45	1,52
110301	1,50	1,61	1,72	1,85	1,96	2,08	2,17
110302	0,23	0,28	0,30	0,36	0,39	0,41	0,46
110506	0,10	0,15	0,22	0,32	0,44	0,64	0,81
111003	0,47	0,61	0,77	0,97	1,16	1,41	1,6
111127	0,16	0,20	0,25	0,31	0,37	0,45	0,51
111106	0,31	0,37	0,44	0,52	0,60	0,71	0,79
111129	0,68	0,80	1,01	1,23	1,44	1,71	1,91
111220	0,21	0,28	0,34	,41	0,47	0,53	0,57
111208	0,28	0,36	0,45	0,58	0,71	0,89	1,3
111201	0,73	0,88	1,02	1,17	1,30	1,44	1,53
111412	0,06	0,9	0,11	0,15	0,18	0,23	0,26
111425	0,05	0,08	0,12	0,16	0,21	0,28	0,33
111403	0,61	0,68	0,75	0,83	0,89	0,97	1,02

D'après les résultats du tableau III.9, il a été remarqué que la série hydrométrique de la station 110301 présente toujours les plus grands quantiles que les autres par rapport aux autres.

III.3.2 Ajustement des données pluviométriques

Les lois de distribution aux quelles peuvent s'ajuster les données pluviométriques sont : Loi Normale (N), loi racine normale (RN), loi log normale à deux (02) paramètres (LN2) et loi log normale à trois (03) paramètres (LN3).

Les résultats d'ajustement des stations pluviométriques de la Macta aux lois de distribution sont résumés au tableau III.10.

Tableau III.10 : Résultats d'ajustement des stations pluviométriques de la Macta aux lois de distribution

Nom de la station	Code station	Période d'observation	Normale		Racine normale		Log normale (2)		Log normale (3)	
			χ^2	α (%)	χ^2	α (%)	χ^2	α (%)	χ^2	α (%)
Ras El Ma	11 01 02	1966-2009	10,82	9,42	6,73	34,68	9,59	14,30	5,09	40,49
Haçaiba	11 02 03	1966-2009	3,05	80,31	3,05	80,31	6,73	34,68	2,23	81,69
Sidi Belabbes	11 03 05	1966-2009	3,05	80,31	3,05	80,31	4,68	58,52	5,91	31,52
Sidi lahcene	11 03 18	1966-2009	4,68	58,52	5,91	43,35	2,64	85,29	2,23	81,69
Sidi Ahmed	11 05 09	1966-2009	5,09	53,22	4,27	63,98	3,45	75,00	3,45	63,03
Ain Frass	11 06 03	1966-2009	4,68	58,52	4,27	63,98	5,09	53,22	5,50	35,79
Dahya	11 07 01	1966-2009	6,32	38,85	1,82	93,56	3,86	69,51	1,82	87,37
Daoud	11 08 02	1966-2009	12,86	4,53	3,86	69,51	16,55	1,11	10,41	6,44
Sidi Boulefred	11 09 04	1975-2009	8,74	12,00	6,21	28,63	5,37	37,26	5,79	21,54
Med Touhami	11 10 02	1966-2009	11,23	8,16	6,73	34,68	3,45	75,00	4,27	51,09
Ain El Hadjar	11 11 03	1969-2009	4,07	53,89	1,73	88,49	0,95	96,64	2,51	64,25
Djebel Keroua	11 11 13	1969-2009	3,29	65,50	2,90	71,50	6,41	26,79	9,54	4,90
Sidi Amer Sgeo	11 11 16	1970-2009	11,23	8,16	10,82	9,42	12,05	6,10	5,02	39,72
Ain Soltane	11 12 05	1969-2009	3,68	59,6	2,90	71,50	4,07	53,90	1,73	78,50
Sidi Mimoun	11 12 08	1969-2009	2,51	77,47	2,51	77,47	4,46	48,50	6,41	17,02
Beniane	11 12 17	1974-2009	4,00	54,94	4,00	54,94	4,00	54,94	4,89	29,80
Aoufs	11 14 04	1970-2009	4,80	44,08	5,60	34,71	8,40	13,55	4,40	35,46
Tizi	11 14 13	1966-2009	7,14	30,84	8,36	21,27	10,41	10,84	7,14	21,07
Ain fares	11 14 17	1970-2010	0,80	97,70	0,80	97,70	4,00	54,94	0,80	93,84

D'après les résultats du tableau III.10, il a été remarqué que :

- ✓ L'ensemble des séries pluviométriques s'ajustent à une loi de probabilité.
- ✓ La loi racine normale (RN) est adéquate à Huit (08) stations pluviométriques avec une dominance de 42%.
- ✓ La loi normale (N) est adéquate à six (06) séries pluviométriques avec une dominance de 31,6%.
- ✓ La loi log normale (LN2) est adéquate à cinq (05) séries pluviométriques avec une dominance de 26%.
- ✓ La loi log normale (LN3) est adéquate à quatre (04) stations pluviométriques avec une dominance de 21%.

Au vu des résultats trouvés par d'autres chercheurs comme Assaba (2003), qui a trouvé que les séries pluviométriques annuelles du nord de l'Algérie s'adaptent mieux à la loi racine normale. La loi RN est retenue comme dominante dans le bassin versant de la Macta.

Le graphe d'ajustement des précipitations annuelles à la station pluviométrique 110102 est présenté en figure III.4. Les autres stations sont figurées en annexe 6.

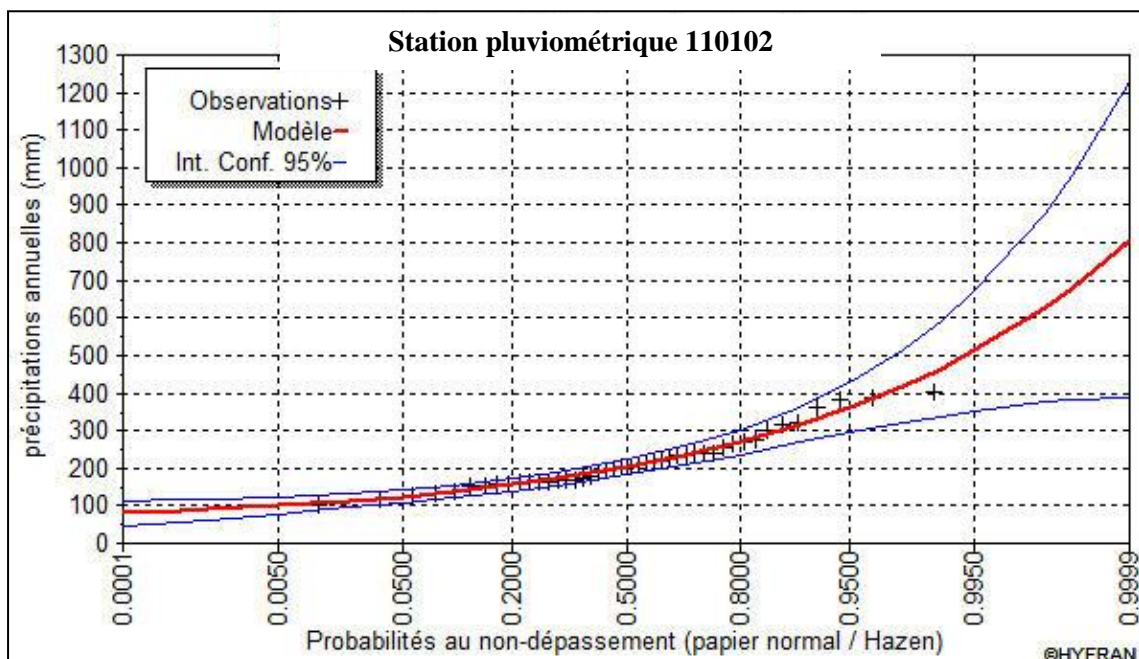


Figure III.4 : Ajustement des précipitations annuelles de la station 110102 à la loi log normale (LN3)

III.3.2.1 Calcul des quantiles

Après avoir choisi la loi d'ajustement la plus adéquate à chaque série pluviométrique, il est facile de calculer les quantiles c'est-à-dire la valeur des précipitations relatives à des récurrences données en se basant sur l'équation de la droite d'ajustement de la loi choisie.

Les droites d'ajustement des lois de distributions choisies sont résumées dans le tableau III.11.

Tableau III.11 : Equations des droites d'ajustement des séries pluviométriques

Station	Equation de la droite d'ajustement
110102	$\log x_{p\%} = 5,28 + 0,18u_{p\%}$
110203	$\log x_{p\%} = 5,71 + 0,10u_{p\%}$
110305	$x_{p\%} = 340,2 + 87,15u_{p\%}$
110318	$\log x_{p\%} = 5,63 + 0,27u_{p\%}$
110509	$\log x_{p\%} = 5,74 + 0,24u_{p\%}$
110603	$x_{p\%} = 16,1 + 1,99u_{p\%}$
110701	$x_{p\%} = 17,2 + 4,20u_{p\%}$
110802	$x_{p\%} = 14,7 + 2,90u_{p\%}$
110904	$\log x_{p\%} = 5,57 + 0,42u_{p\%}$
111002	$\log x_{p\%} = 5,29 + 0,34u_{p\%}$
111103	$\log x_{p\%} = 5,71 + 0,40u_{p\%}$
111113	$x_{p\%} = 15,9 + 2,36u_{p\%}$
111116	$\log x_{p\%} = 5,64 + 0,19u_{p\%}$
111205	$\log x_{p\%} = 5,81 + 0,22u_{p\%}$
111208	$x_{p\%} = 358,9 + 107,19u_{p\%}$
111217	$x_{p\%} = 295,6 + 108,6u_{p\%}$
111404	$x_{p\%} = 449,6 + 116,76u_{p\%}$
111413	$x_{p\%} = 354,3 + 86,96u_{p\%}$
111417	$x_{p\%} = 376,3 + 94,78u_{p\%}$

Les quantiles ont été calculés par le logiciel **HYFRAN 1.1** dont les résultats sont regroupés dans le tableau III.12 :

Tableau III.12 : Hauteur pluviométrique (mm) pour différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	2	3	5	10	20	50	100
Station							
110102	197,3	232,5	268,9	310,9	348,3	393,5	425,6
110203	302,3	343,4	384,3	430,0	469,2	515,1	546,7
110305	340,2	377,7	413,6	451,9	483,6	519,2	543,0
110318	278,2	313,1	350,5	395,6	437,1	489,1	527,2
110509	311,1	345,3	381,5	424,4	463,5	511,7	546,7
110603	259,2	285,6	316,8	349,7	376,4	408,0	432,6
110701	295,8	364,8	432,6	510,8	580,8	670,8	729,0
110802	216,1	252,8	292,4	338,6	376,4	424,4	458,0
110904	261,9	313,9	373,1	449,0	523,1	621,3	696,7
111002	197,9	229,0	263,1	305,4	345,4	396,6	435,0
111103	301,0	357,5	421,3	502,3	580,8	683,9	762,5
111113	252,8	285,6	320,4	357,2	392,0	432,6	458,0
111116	280,5	316,4	353,5	396,7	435,2	481,8	514,9
111205	334,9	385,5	438,6	501,0	557,4	626,5	676,1
111208	359,0	405,1	449,2	496,4	535,3	579,2	608,4
111217	295,6	342,4	387,1	435,0	474,5	519,0	548,6
111404	449,6	499,9	547,9	599,3	641,7	689,5	721,3
111413	354,3	391,7	427,5	465,8	497,4	532,9	556,6
111417	376,3	417,1	456,0	497,8	532,2	571,0	596,8

Les résultats du tableau III.12 montrent que la série pluviométrique de la station 111404 présente les plus grands quantiles que les autres stations ; la hauteur pluviométrique peut atteindre 721,3 mm pour une période de retour de 100 ans.

Conclusion

Les données pluviométriques et hydrométriques constituent le noyau de base de ce travail dont leur acquisition a été une tâche très lourde.

Dans l'ensemble, la qualité des données n'était pas très bonne, notamment les données hydrométriques dont plusieurs anomalies ont été apparues au cours de la phase de comblement des lacunes. Après traitement et critique des données, Quinze (15) stations hydrométriques et dix neuf (19) stations pluviométriques ont été retenues et qui peuvent être utilisés dans les calculs postérieurs. Les stations pluviométriques retenues suivent généralement la loi racine normale (RN).

CHAPITRE IV :

ETUDE DU RÉGIME HYDRO- PLUVIOMÉTRIQUE

Chapitre IV

Etude du régime hydro-pluviométrique

Introduction

Les facteurs géographiques et climatiques d'un bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement d'un phénomène hydrologique. L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'évolution du régime pluviométrique et hydrométrique à l'échelle temporelle et leurs distributions spatiales ainsi que d'évaluer l'impact de la variabilité des précipitations sur les apports liquides des oueds de la Macta.

IV.1 Etude du régime pluviométrique

IV.1.1 Choix des séries pluviométriques et leurs périodes d'étude

Les dix neuf (19) stations pluviométriques retenues au chapitre précédent ont été utilisées dans l'étude du régime pluviométrique dont leurs périodes d'observation diffèrent d'une station à une autre.

Afin de dégager une étude hydro-pluviométrique. Chaque station pluviométrique a une période d'observation commune avec la station hydrométrique correspondante dans chaque nouveau sous bassin versant.

IV.1.2 Distribution annuelle des précipitations

La figure IV.1 indique les moyennes pluviométriques interannuelles des stations pluviométriques utilisées dans le bassin versant de la Macta.

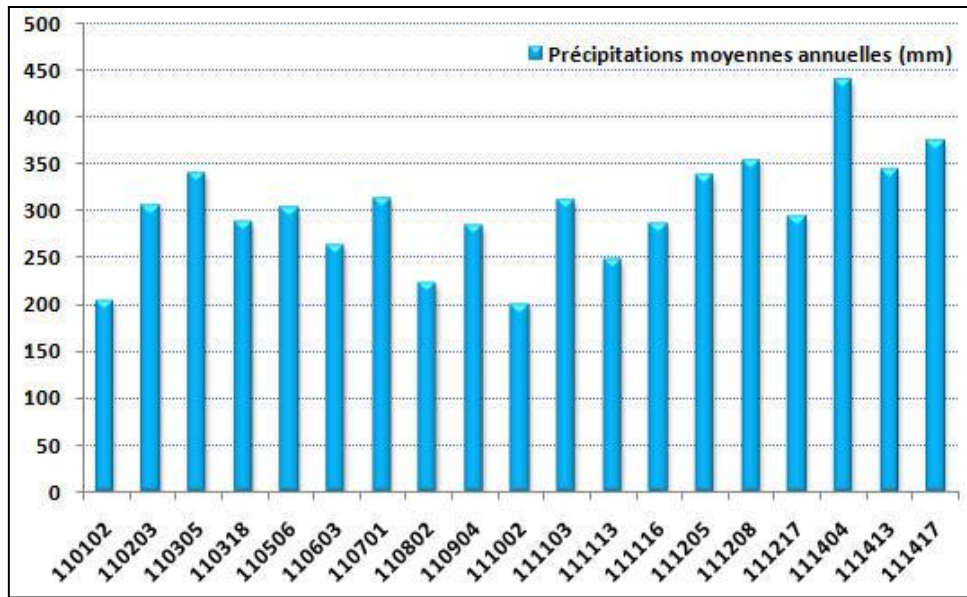


Figure IV.1 : Précipitation moyenne interannuelle enregistrées aux stations pluviométriques

D'après la figure IV.1, il a été constaté que :

- Les moyennes pluviométriques interannuelles enregistrées dans le bassin versant sont de l'ordre de 201 mm à 440 mm ; ce qui reflète le climat semi-aride de la région.
- Les plus faibles moyenne pluviométriques (200 mm environ) sont enregistrées aux stations 110102, 111002 situées au sud du bassin versant.
- Le maximum de précipitation est enregistré à la station pluviométrique 110404 (440 mm environ) située à l'extrême Est du bassin versant qui est du aux masses d'air humides venues du nord.

Ces résultats permettent de conclure que la hauteur pluviométrique annuelle dans le bassin versant de la Macta subit à l'influence de la mer, elle augmente du sud au nord.

Les paramètres statistiques des séries pluviométriques sont illustrés au tableau IV.1.

Après avoir calculé les paramètres statistiques des pluies annuelles pour chaque station (tableau IV.1), il ressort que :

- ☞ Le coefficient de variation des précipitations annuelles varie entre 20% et 42%. La plus faible valeur est observée à la station 111413 situées à l'Est du bassin versant, alors que les plus élevées sont observées aux stations 110102 (34%), 111217 (38%) et 110904 (42%), situées au sud du bassin versant.
- ☞ Le coefficient d'irrégularité du régime pluviométrique est traduit par l'écart entre la pluie maximale et minimale. Il varie entre 2,85 (110509) et 6,44 (1110904)

Tableau IV.1 : Caractéristiques des séries pluviométrique annuelles dans le bassin versant de la Macta

Code	Z(m)	Période d'étude	\bar{x}	σ	Cv	P _{Max} (mm)	année	P _{Min} (mm)	année	P _{Max} /P _{Min}
11 01 02	1097	1966-2009	217,0	73,1	0,34	400,3	2008	103,7	1987	3,86
11 02 03	950		307,0	99,2	0,32	530,8	2008	110,8	1987	4,79
11 03 05	485		340,2	85,1	0,25	605,5	2008	168,6	1996	3,59
11 03 18	470		288,4	75,0	0,26	453,7	2008	141,6	1996	3,20
11 05 09	653	1978-2009	304,1	85,1	0,28	495,5	1995	173,7	1983	2,85
11 06 03	424	1966-2009	264,1	68,7	0,26	447,5	1973	128,9	1996	3,47
11 07 01	1200		314,4	103,8	0,33	476,4	2002	100,7	1983	4,73
11 08 02	660		223,3	67,0	0,30	382,6	2008	114,1	1973	3,35
11 09 04	885	1972-2009	284,6	119,5	0,42	643,5	2008	100,0	1989	6,44
11 10 02	600	1975-2009	201,1	68,4	0,34	353,8	2008	108,4	1988	3,26
11 11 03	1000	1973-2009	312,2	103,0	0,33	567,8	1995	104,7	1983	5,42
11 11 13	950		248,0	69,4	0,28	439,0	1995	146,7	1999	2,99
11 11 16	590		287,6	97,8	0,34	572,5	2008	129,9	1988	4,41
11 12 05	980		337,9	101,4	0,30	557,2	1995	113,2	1983	4,92
11 12 08	690		355,1	88,8	0,25	615,1	2002	193,7	1998	3,18
11 12 17	565		295,6	113,5	0,38	521,3	1995	136,8	1984	3,81
11 14 04	970		440,3	130,8	0,30	671,0	2007	199,2	1999	3,37
11 14 13	467	1970-2009	344,9	69,0	0,20	544,7	1971	180,4	1981	3,02
11 14 17	806	1973-2009	375,4	93,9	0,25	598,7	2008	171,0	1981	3,50

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.

Ces résultats montrent que parmi les stations pluviométriques utilisées dans le bassin versant de la Macta, Huit (08) stations pluviométriques situées au sud connaissent une irrégularité remarquable des précipitations (Cv élevé, grand écart entre P_{max} et P_{min}).

Le coefficient de variation et celui d'irrégularité des pluies annuelles croissent généralement du nord au sud du bassin versant.

IV.1.3 Analyse en composantes principales des précipitations annuelles

En vue d'étudier la structure spatiale des précipitations dans le bassin versant de la Macta, une analyse en composante principale (ACP) a été appliquée au cumul annuel de dix neuf (19) stations pluviométriques, durant la période (1978-2009).

Le fichier de données est composé de dix neuf (19) colonnes (stations pluviométriques) qui sont des variables et trente deux (32) lignes (année d'observation) qui sont des individus. Donc est une matrice de 608 valeurs.

IV.1.3.1 Résultats de l'ACP

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

- a. Les valeurs propres, pourcentage de variance expliquée, pourcentage cumulé de la variance (tableau IV.2).

Tableau IV.2 : Valeurs propres et variances expliquées

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

N.B : Seules quatre (04) valeurs propres ont été présentées dans le tableau IV.2 car le pouvoir explicatif des autres composantes est faibles (moins de 5%).

Les résultats obtenus du tableau IV.2 montre 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%**). Et à partir de la troisième composante, l'information expliquée devient faible (moins de 8%).

- b. Choix des composantes principales

Les résultats du tableau IV.2 montre que les deux (02) premières composantes permettent de reconstituer 2/3 de la variance totale. Alors ces deux (02) composantes seront retenues.

- c. Matrice de corrélation : Le degré de liaison entre les différentes variables (stations pluviométriques) est illustré au tableau IV.3.

Tableau VI.3 : Matrice de corrélation entre les variables

	110102	110203	110318	110305	110509	110603	110701	110802	110904	111002	111103	111113	111116	111205	111208	111217	111404	111413	111417
110102	1,00																		
110203	0,83	1,00																	
110318	0,43	0,65	1,00																
110305	0,49	0,61	0,88	1,00															
110310	0,07	0,31	0,75	0,61															
110509	0,75	0,81	0,67	0,63	1,00														
110603	0,25	0,53	0,76	0,60	0,58	1,00													
110701	0,44	0,56	0,28	0,15	0,51	0,43	1,00												
110802	0,65	0,69	0,63	0,63	0,69	0,42	0,45	1,00											
110904	0,58	0,74	0,56	0,50	0,65	0,50	0,45	0,49	1,00										
111002	0,63	0,74	0,58	0,58	0,63	0,39	0,25	0,74	0,48	1,00									
111103	0,75	0,71	0,34	0,34	0,72	0,38	0,50	0,64	0,42	0,57	1,00								
111113	0,59	0,67	0,51	0,38	0,64	0,38	0,43	0,57	0,53	0,56	0,54	1,00							
111116	0,65	0,70	0,60	0,62	0,66	0,41	0,37	0,79	0,64	0,68	0,52	0,58	1,00						
111205	0,70	0,73	0,50	0,41	0,73	0,42	0,44	0,63	0,68	0,57	0,70	0,80	0,61	1,00					
111208	0,52	0,66	0,56	0,48	0,62	0,49	0,44	0,59	0,73	0,51	0,34	0,71	0,74	0,69	1,00				
111217	0,66	0,71	0,48	0,56	0,64	0,31	0,32	0,71	0,63	0,74	0,52	0,55	0,76	0,58	0,56	1,00			
111404	0,30	0,49	0,59	0,51	0,48	0,56	0,46	0,41	0,62	0,23	0,31	0,43	0,53	0,39	0,59	0,36	1,00		
111413	0,43	0,57	0,75	0,70	0,60	0,61	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	0,30	0,35	0,50	0,40	0,60	0,46	0,35	0,58	0,45	0,38	0,62	0,39	0,47	1,00

Les résultats de la matrice de corrélation (Tableau IV.3) montrent 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).

d. 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 IV.4.

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

Variable	Station pluviométrique correspondante	CP1	CP2
S1	110101	-0,79	-0,41
S2	110203	-0,91	-0,16
S3	110318	-0,80	0,51
S4	110305	-0,76	0,46
S5	110509	-0,88	-0,07
S6	110603	-0,66	0,50
S7	110701	-0,53	-0,17
S8	110802	-0,82	-0,11
S9	110904	-0,77	0,03
S10	111002	-0,77	-0,15
S11	111103	-0,71	-0,44
S12	111113	-0,75	-0,20
S13	111116	-0,84	-0,04
S14	111205	-0,80	-0,32
S15	111208	-0,78	0,07
S16	111217	-0,80	-0,18
S17	111404	-0,63	0,41
S18	111413	-0,71	0,45
S19	111417	-0,65	0,02

- Projection des variables sur la première composante CP1

La projection des variables sur la première composante principale donne des coefficients de corrélation très significatifs qui varient entre **0,53** et **0,91**. Le minimum de **0,53** est enregistré à la station S7 (110701). Ce premier axe factoriel explique la structure moyenne du phénomène étudié et peut être considéré comme une distribution temporelle des précipitations.

- 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. Les stations pluviométriques situées au Nord (plaine de Mascara, Sidi Belabbes) se corrént positivement avec cette composante. Tandis que celles situées au Sud, Sud-Est et Sud -Ouest se corrént négativement avec cette composante (figure IV.3).

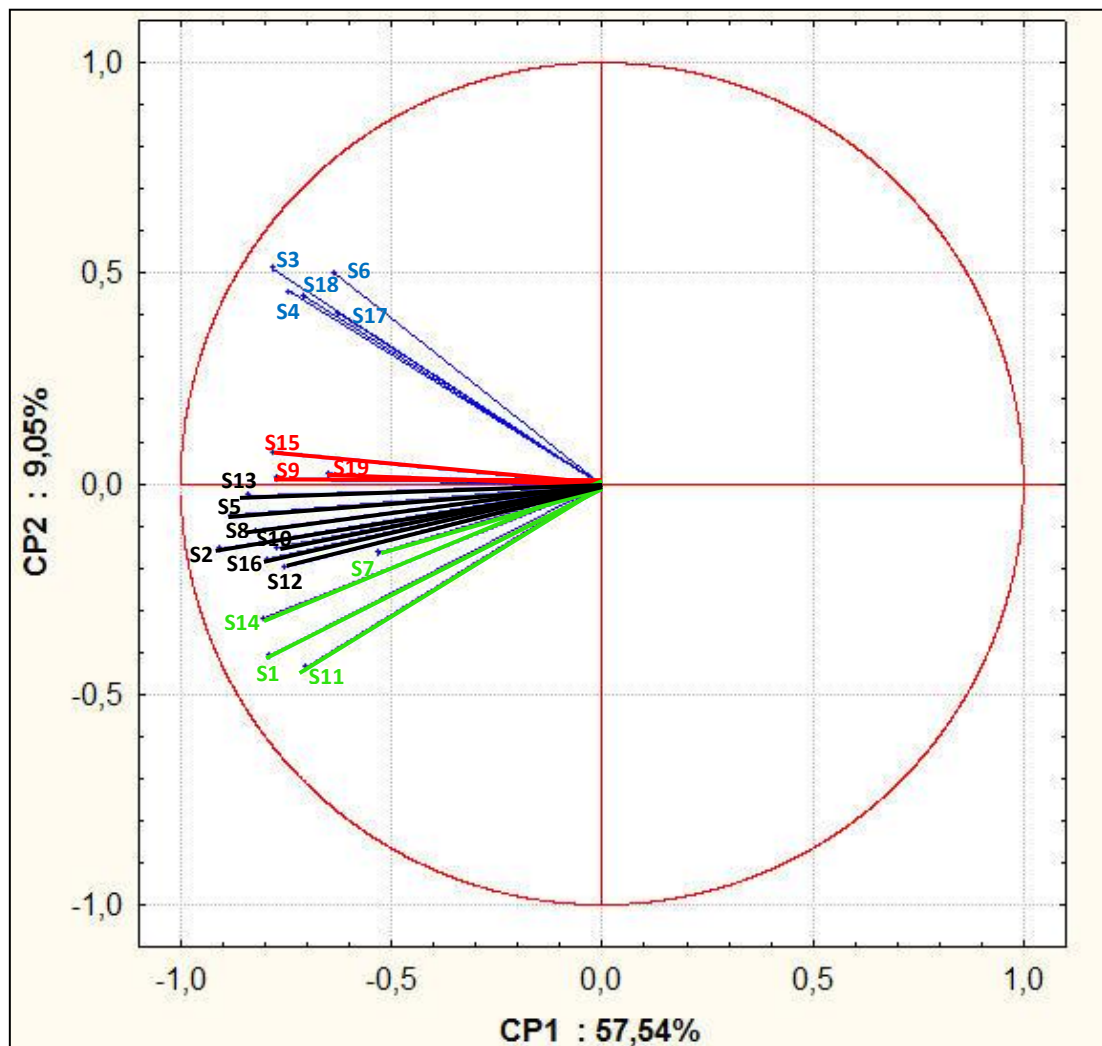


Figure IV.2 : Projection des variables pluviométriques sur les plans (CP1xCP2)

Le cercle de corrélation (figure IV.3) met en évidence quatre (04) groupes distincts dans le bassin versant de la Macta :

- ☞ *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 (S1, S7, S11 et S14) où les précipitations moyennes annuelles sont faibles (230 mm environ).
- ☞ *2^{ème} groupe* : représenté par les stations situées dans la partie centrale du bassin versant, sur les monts de Saida et de Telagh (S2, S5, S8, S10, S12, S13 et S16). avec des précipitations moyennes annuelles d'environ 250 mm.
- ☞ *3^{ème} groupe* : représenté par les stations situées à l'Est et sud Est du bassin versant (S9, S15 et S19) avec des précipitations moyennes annuelles d'environ 300 mm.
- ☞ *4^{ème} groupe* : représenté par les stations situées dans les plaines de Sidi Belabbes et Ghriss-Mascara (S3, S4, S6, S17 et S18) avec un cumul annuel moyen de précipitations d'environ 320 mm.

Cette distinction de groupes peut être aussi illustrée dans la figure IV.4.

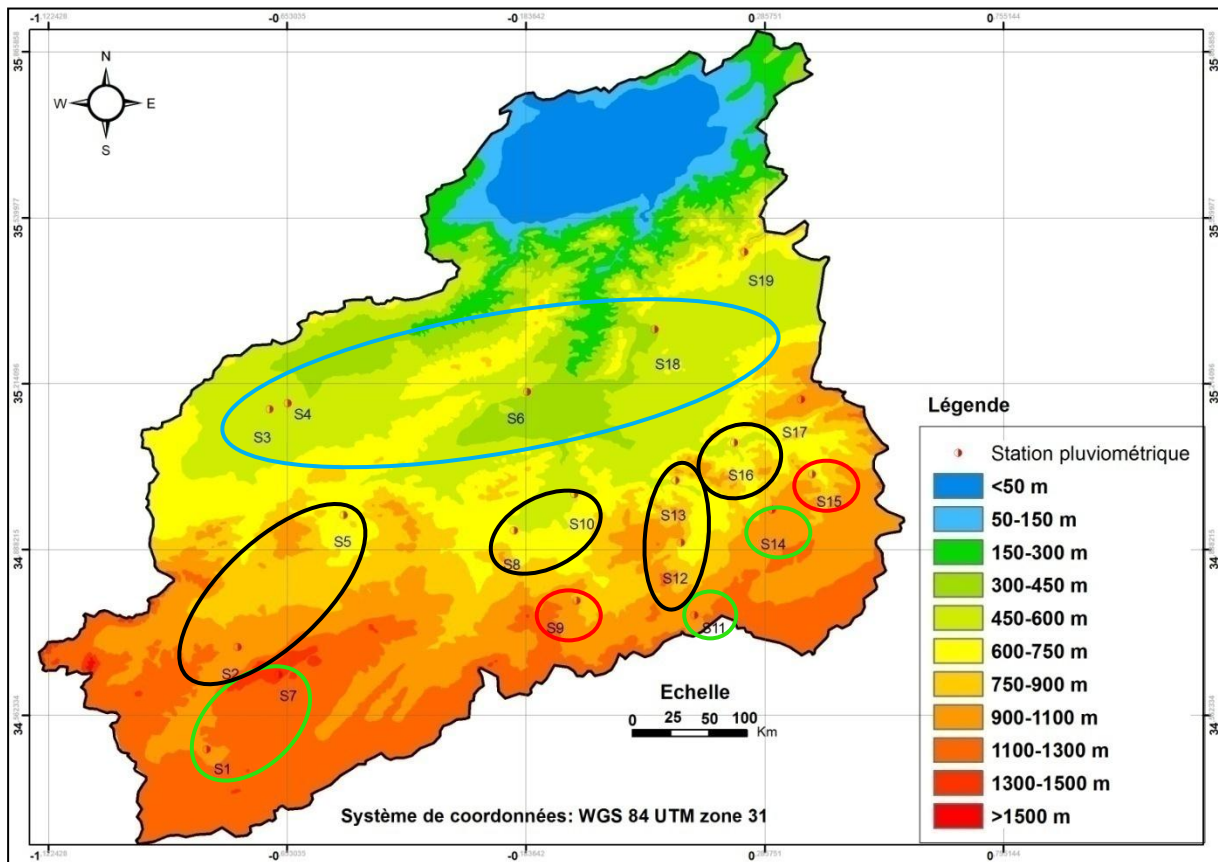


Figure IV.3 : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)

La projection des variables sur les deux premiers axes factoriels (CP1XCP2) a donné des résultats très clairs, très significatifs qui sont représentatifs la zone d'étude. Donc il semble préférable de retenir ces deux composantes.

Au regard de ces résultats, il a été conclure que le bassin versant de la Macta est caractérisée par une variation topographique très marquée 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 les particularités.

IV.1.4 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.

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

Tableau IV.5 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières enregistrées au niveau des stations pluviométriques

Code	Caractéristiques	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Automne	Hiver	Printemps	Été
11 01 02	\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
11 02 03	\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
11 03 05	\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
11 03 18	\bar{x}	18,9	28,7	36,2	33,8	36,0	36,3	31,2	26,7	24,0	7,5	2,6	6,5	83,8	106,1	81,9	16,6
	σ	27,4	29,6	30,0	28,1	31,0	30,1	26,8	17,6	24,2	14,8	8,7	7,9	52,0	45,6	37,7	17,9
	Cv	1,45	1,03	0,83	0,83	0,86	0,83	0,86	0,66	1,01	1,97	3,35	1,22	0,62	0,43	0,46	1,08
11 05 09	\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
11 06 03	\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
11 07 01	\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

Suite du Tableau IV.5 : Précipitations moyennes mensuelles enregistrées au niveau des stations pluviométriques

Code	Caractéristiques	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Automne	Hiver	Printemps	Été
11 08 02	\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
11 09 04	\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
11 10 02	\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
11 11 03	\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
11 11 13	\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
11 11 16	\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
11 12 05	\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

11 12 08	\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
11 12 17	\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
11 14 04	\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
11 14 13	\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
11 14 17	\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 IV.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 dix sept (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 IV.5), un "Indicatif saisonnier" est établi par un classement de dominance pluviométrique saisonnier d'ordre décroissant année par année. L'indicatif saisonnier le plus élevé (qui se répète) est considéré comme dominant dans la région.

Le régime saisonnier des précipitations enregistrées est indiqué dans le tableau IV.6.

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

N°	Code station	Régime saisonnier	Pourcentage de dominance
1	110102	HPAE	22,0
2	110203	APHE	19,0
3	110305	HAPÉ	25,0
4	110318	HPAE	25,0
5	110509	HAPÉ	22,0
6	110603	HPAE	36,0
7	110701	PHAE	22,0
8	110802	HPAE	30,0
9	110904	HPAE	22,0
10	111002	HPAE	36,0
11	111103	HAPÉ	30,5
12	111113	AHPE	19,0
13	111116	HPAE	36,0
14	111205	HAPÉ	36,0
15	111208	HPAE	25,0
16	111217	HPAE	44,0
17	111404	HPAE	22,0
18	111413	HPAE	22,0
19	111417	PHAE	30,5

Avec :

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

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

- ☞ Quinze (15) stations enregistrent des moyennes pluviométriques importantes en Hiver, qui donne lieu à un régime saisonnier de type HPAE ou HAPE.
- ☞ Deux (02) stations enregistrent un maximum de pluviométrie en saison d'Automne, qui donne lieu à un régime saisonnier de type AHPE ou APHE.
- ☞ Deux (02) stations (110701, 111417) enregistrent un maximum de pluviométrie en saison de Printemps, qui donne lieu à un régime saisonnier de type PHAE.

Ces résultats permettent de conclure que :

- ✓ La moyenne mensuelle des précipitations traduit clairement les variations mensuelles et saisonnières de distribution des précipitations en fonction du coefficient de variation.
- ✓ 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.
- ✓ La saison qui enregistre un maximum de pluviométrie est celle d'Hiver.
- ✓ Le régime saisonnier le plus dominant dans le bassin versant de la Macta et de type HPAE enregistré par Onze (11) stations pluviométriques.

IV.1.5 Détection de ruptures dans les séries pluviométriques

Les séries chronologiques, avec les années lacunaires reconstituées, ont été analysées à l'aide du logiciel Khronostat, en vue de déceler une éventuelle rupture.

Différents tests d'homogénéité ont été appliqués, dont les résultats sont synthétisés au tableau IV.7.

Pour l'ensemble de ces tests, l'hypothèse nulle H_0 correspond à l'absence de rupture.

Tableau IV.7 : Résultats des tests d'homogénéité et années de ruptures dans les séries pluviométriques annuelles étudiées

Station	P_{moy} (mm)	Buishand	Pettit	Lee§ Heghinian	X_i (mm)	X_j (mm)	Var (%)	Hubert	X_i (mm)	X_j (mm)	Var (%)
11 01 02	217,0	Rejetée	Rejetée (1992)	2000	185,4	279,4	-50,7	1972	264,2	193,3	26,8
11 02 03	307,0	Acceptée	Acceptée	2007	298,6	482,6	-61,6	1975	377,2	286,3	24,1
11 03 18	288,4	Rejetée	Rejetée (1980)	1975	370,2	264,4	28,6	1975	370,2	264,4	28,6
11 03 05	340,2	Rejetée	Acceptée	1974	421,3	319,4	24,2	1974	421,3	319,4	24,2
11 05 09	304,1	Acceptée	Acceptée	2007	313,6	416,5	-32,8	/	/	/	/
11 06 03	264,1	Rejetée	Rejetée (1980)	1980	305,7	242,6	20,6	1980	305,7	242,6	20,6
11 07 01	314,4	Acceptée	Acceptée	2001	284,2	450,6	-58,6	2001	284,2	450,6	-58,6
11 08 02	223,3	Rejetée	Rejetée (2000)	2000	201,0	310,2	-54,3	2000	201,0	310,2	-54,3
11 09 04	284,6	Acceptée	Acceptée	2007	269,3	420,3	-56,1	1980	364,5	259,8	28,7
11 10 02	201,1	Rejetée	Rejetée (1999)	2001	180,9	290,2	-60,4	2001	180,9	290,2	-60,4
11 11 03	312,2	Acceptée	Acceptée	1976	394,6	304	22,9	/	/	/	/
11 11 13	248,0	Acceptée	Acceptée	1976	326,3	238,5	26,9	/	/	/	/
11 11 16	287,6	Rejetée	Rejetée (1999)	2000	257,9	380,1	-47,4	2000	257,9	380,1	-47,4
11 12 05	337,9	Acceptée	Acceptée	2007	328,0	511,8	-56,0	/	/	/	/
11 12 08	355,1	Acceptée	Acceptée	2001	339,1	447,5	-31,9	2001	339,1	447,5	-31,9
11 12 17	295,6	Rejetée	Rejetée (1999)	2001	258,9	424,1	-63,8	2001	258,9	424,1	-63,8
11 14 04	440,3	Acceptée	Acceptée	2006	437,8	595,2	-36,0	1980	532,9	414,8	22,2
11 14 13	344,9	Acceptée	Acceptée	1974	436,2	331,8	23,9	1985	372,6	326,4	12,4
11 14 17	375,4	Acceptée	Rejetée (1993)	1994	324,8	449,8	-38,5	1989	316,6	425,5	-34,4

Avec : X_i : Moyenne avant la date de rupture (mm) , X_j : Moyenne après la rupture (mm) , **Var** : Taux de variation (%)

L'analyse des résultats du tableau IV.7 montre que :

- ☞ L'ensemble des stations pluviométriques analysées présentent une rupture, signalée au moins par un test.
- ✓ Le test de Buishand et celui de Pettit ont marqué une stabilité de moyenne (stationnarité des données) au niveau de dix (10) stations pluviométriques.
- ☞ La segmentation d'Hubert n'a signalé aucune rupture au niveau de quatre (04) stations pluviométriques.
- ☞ Dix (10) stations pluviométriques connaissent une diminution du régime pluviométrique jusqu'à 29% durant la période (1972 et 1985).
- ☞ Les stations signalant des ruptures à partir de l'année 2000, provoquent toutes une augmentation de moyenne pluviométriques.

Ces résultats permettent de conclure que le bassin versant de la Macta a connu une variabilité climatique durant les années (1972-1985) provoquant une diminution du régime pluviométrique jusqu'à 29 %. Et à partir des années 2000, une augmentation du régime pluviométrique a été observée.

IV.2 Etude du régime hydrométrique

Selon Hebal (2011), les cours d'eau du nord de l'Algérie septentrionale appartiennent au domaine hydro-climatique à caractère méditerranéen mais il n'existe aucune étude globale permettant de caractériser leurs régimes.

IV.2.1 Choix des séries hydrométriques et leurs périodes d'étude

Les Quinze (15) stations hydrométriques retenues au chapitre précédent ont été utilisées dont la période d'observation diffère d'une station à une autre. Comme pour les précipitations, chaque station hydrométrique a une période d'observation identique à la station pluviométrique correspondante.

IV.2.2 Variation des apports moyens annuels et interannuels

La distribution des apports moyens annuels et interannuels ainsi que leurs répartitions statistiques sont indiquées au tableau IV.8.

Tableau IV.8: Caractéristiques hydrologiques des stations hydrométriques du bassin versant de la Macta

N°	Station	Oued	Période d'étude	A _{moy} (Hm ³)	Cv	A _{max} (Hm ³)		A _{min} (Hm ³)		Nbre d'année >A _{moy}	R
						Valeur	Année	Valeur	Année		
01	110101	Mekerra	1966-2009	7,61	0,55	16,08	1995	0,69	1983	21/44	23,3
02	110201			28,15	0,30	43,19	1976	3,78	2004	20/44	11,4
03	110301			47,53	0,75	60,93	1975	2,90	2001	18/44	21,0
04	110302	Sarno amont		4,54	1,09	19,32	1971	0,00	1992,1993	17/44	/
05	110506	Melrir	1978-2009	4,47	0,71	11,49	1978	0,20	1993	15/32	57,4
06	111003	Hounet	1975-2009	16,78	0,72	57,26	1994	0,32	1998	16/35	178,9
07	111127	Saida	1973-2009	5,70	0,46	15,61	1973	0,84	1983	12/37	18,6
08	111106			10,62	0,44	25,96	1973	4,60	1983	14/37	5,64
09	111129			23,59	0,52	70,06	1973	5,78	1992	13/37	12,1
10	111208	Sidi Mimoun		10,28	0,51	23,70	1984	2,65	1992	19/37	8,94
11	111220	Dne Bouchikhi		2,20	1,21	10,23	1990	0,00	1992,2007	14/37	/
12	111201	Taria		20,55	0,79	54,35	1987	1,58	2006,2007	17/37	34,4
13	111425	Khalouia		2,28	1,02	10,61	2005	0,11	1993	14/37	96,4
14	111412	Ghriss		2,28	0,95	9,09	1980	0,00	1992	16/37	/
15	111403	Ain Fekane	1970-2009	12,68	0,51	23,10	1972	0,63	1998	17/40	36,7

Avec :

A_{moy} : l'Apport moyen interannuel (Hm³) ; Cv : Coefficient de variation ; A_{max} : l'Apport maximum annuel (Hm³)A_{min} : l'Apport minimum annuel (Hm³) ; R : Coefficient d'immodération

Les résultats du tableau IV.8 montrent que :

- ☞ Parmi les Oueds étudiés de la Macta, l'oued Mekerra au droit de la station hydrométrique 110301 est le plus important avec un apport liquide moyen interannuel de l'ordre de $47,5 \text{ Hm}^3$.
- ☞ Les oueds de Bouchikhi au droit de la station hydrométrique 111220, oued Ghriss au droit de la station 111412 et oued Khalouia au droit de la station 111425 produisent les plus faibles apports liquides ($2,20 \text{ Hm}^3$ à $2,28 \text{ Hm}^3$).
- ☞ L'ensemble des Oueds de la Macta au droit des stations hydrométriques étudiées sont irréguliers ($C_v > 0,5$), à l'exception de l'Oued Mekerra au droit de la station hydrométrique 110201 qui est régulier ($C_v = 0,3$).

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.

IV.2.3 Analyse en composantes principales des apports liquides

Afin d'étudier la structure spatiale des apports liquides des oueds de la Macta, une analyse en composantes principales a été effectuée sur une matrice de quinze (15) variables (stations hydrométriques) et trente deux (32) observations (année d'observation), durant la période (1978-2009). Donc est une matrice de 480 valeurs.

IV.2.3.1 Résultats de l'ACP

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

- a. Les valeurs propres, pourcentage de variance expliquée, pourcentage cumulé de la variance (IV.9).

Tableau IV.9 : 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

N.B : Seules cinq (05) valeurs propres ont été présentées dans le tableau IV.9 car le pouvoir explicatif des autres composantes est faibles (moins de 5%).

Les résultats obtenus du tableau IV.9 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%).

b. Choix des composantes principales

D'après le tableau IV.9, les trois (03) premières composantes expliquent presque 2/3 de l'information (**62%**). Donc ces trois (03) composantes seront retenues.

c. Matrice de corrélation entre les variables

Le degré de liaison entre les différentes variables (stations pluviométriques) est illustré au tableau IV.10.

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 de l'apport liquide).

Tableau IV.10 : Matrice de corrélation entre les variables

	110101	110201	110301	110302	110506	111003	111127	111106	111129	111220	111208	111201	111412	111425	111403
110101	1,00														
110201	0,51	1,00													
110301	0,35	0,15	1,00												
110302	0,18	0,04	0,23	1,00											
110506	0,11	-0,03	0,24	0,56	1,00										
111003	0,53	0,39	0,08	0,04	0,06	1,00									
111127	0,21	0,23	0,03	0,16	0,05	0,32	1,00								
111106	0,44	0,34	0,19	0,24	0,23	0,58	0,52	1,00							
111129	0,56	0,33	0,27	0,24	0,48	0,51	0,23	0,52	1,00						
111220	0,26	0,31	0,04	0,11	0,15	0,47	0,63	0,59	0,29	1,00					
111208	0,32	0,24	0,14	0,36	0,42	0,43	0,25	0,68	0,49	0,54	1,00				
111201	0,08	0,06	-0,08	0,26	0,08	0,39	0,50	0,43	0,17	0,44	0,59	1,00			
111412	0,27	0,16	0,23	0,56	0,40	0,22	0,35	0,42	0,55	0,50	0,52	0,24	1,00		
111425	-0,11	0,11	-0,28	0,28	0,05	-0,10	-0,09	0,07	-0,04	0,12	0,14	0,08	0,21	1,00	
111403	0,28	0,15	0,20	0,56	0,53	0,23	0,28	0,51	0,58	0,55	0,55	0,19	0,72	0,51	1,00

d. Projection des variables sur les axes factoriels

La projection des variables sur les axes factoriels choisis représentés par les composantes principales CP1, CP2, CP3 est donnée au tableau IV.11.

Tableau IV.11 : Projection des variables sur les principaux axes

Variable	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	110302	-0,52	0,60	0,05
S5	110506	-0,49	0,55	0,26
S6	111003	-0,61	-0,53	0,04
S7	111127	-0,55	0,33	-0,35
S8	111106	-0,80	-0,24	-0,09
S9	111129	-0,73	-0,01	0,39
S10	111220	-0,71	-0,22	-0,37
S11	111208	-0,79	0,04	-0,14
S12	111201	-0,52	-0,18	-0,53
S13	111412	-0,74	0,35	0,01
S14	111425	-0,17	0,49	-0,44
S15	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 IV.11), montre des coefficients de corrélation qui varient entre **0,17** et **0,80**. La plus faible valeur de **0,17** est enregistrée à la station S14 (111425) tandis que celle la plus forte (**0,80**) est affectée à la station 111106 (S8).

Ce premier axe factoriel explique la structure moyenne du phénomène étudié et peut être considéré comme une distribution temporelle des apports 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 (corrélations positive et négative). 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 (figure IV.6).

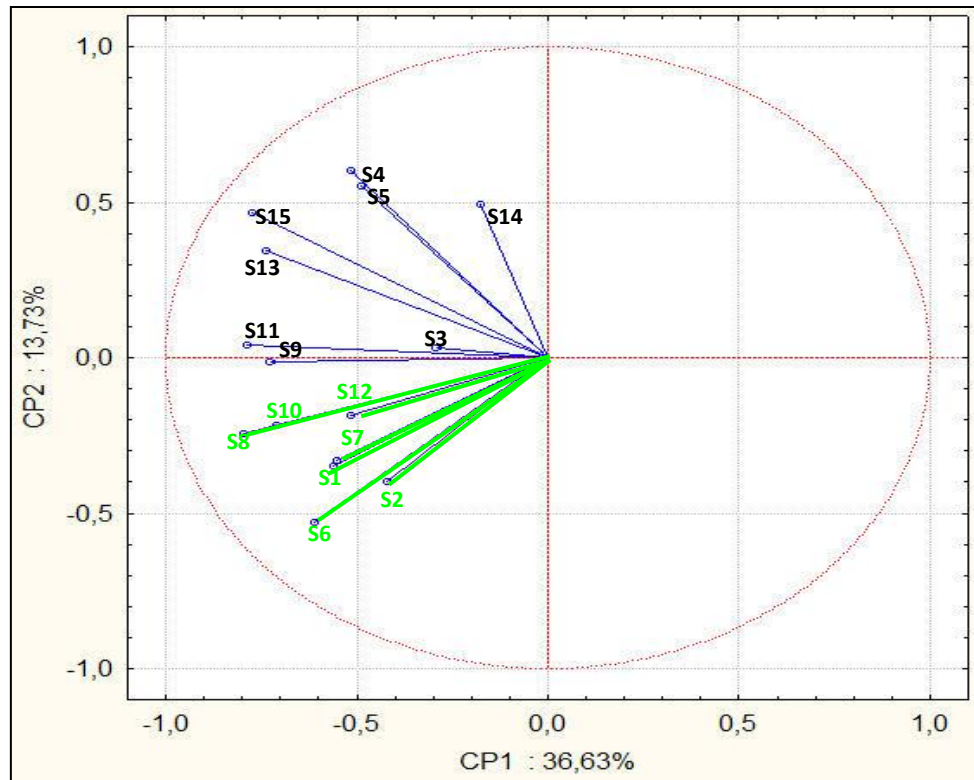


Figure IV.4 : Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP2)

Cette distinction de groupes peut être aussi illustrée dans la figure IV.7.

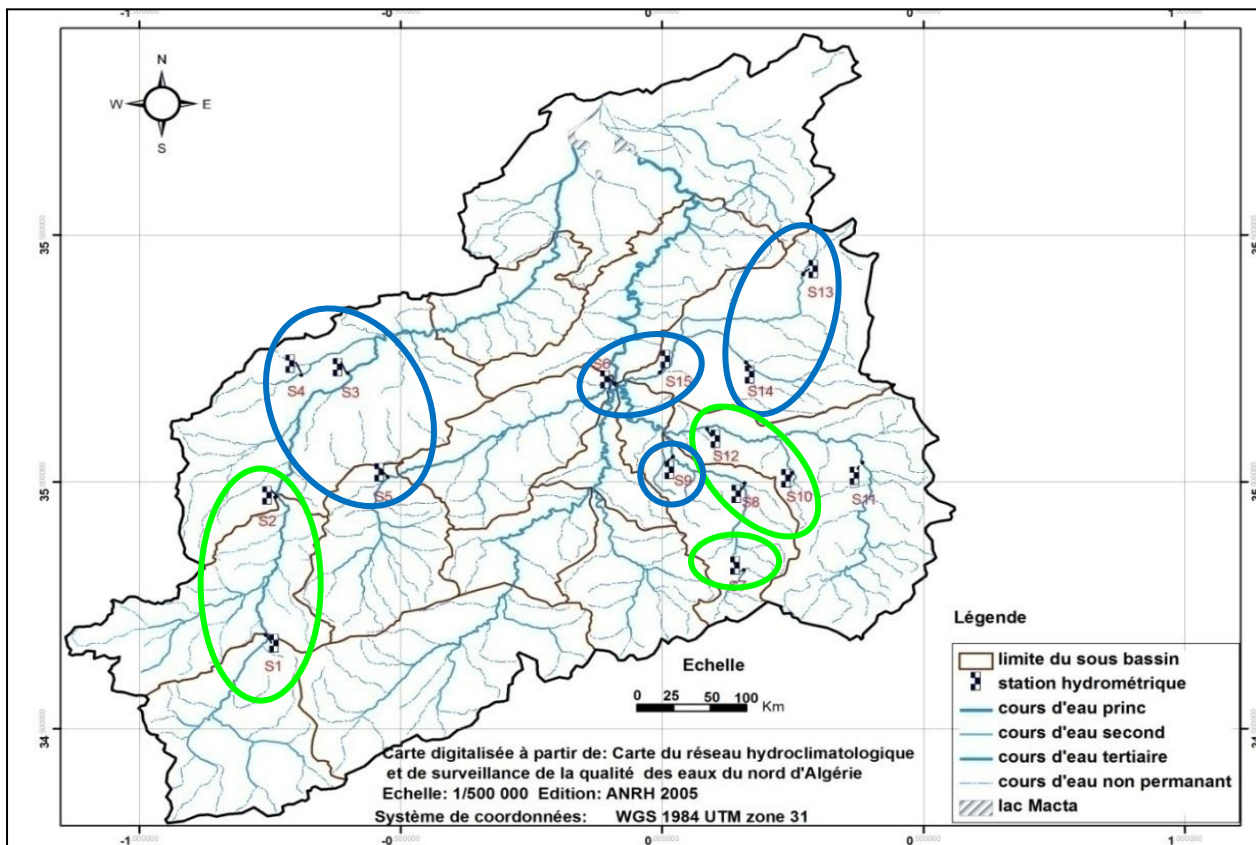


Figure IV.5 : Présentation physique du cercle de corrélation (CP1xCP2)

- Projection des variables sur la troisième composante CP3

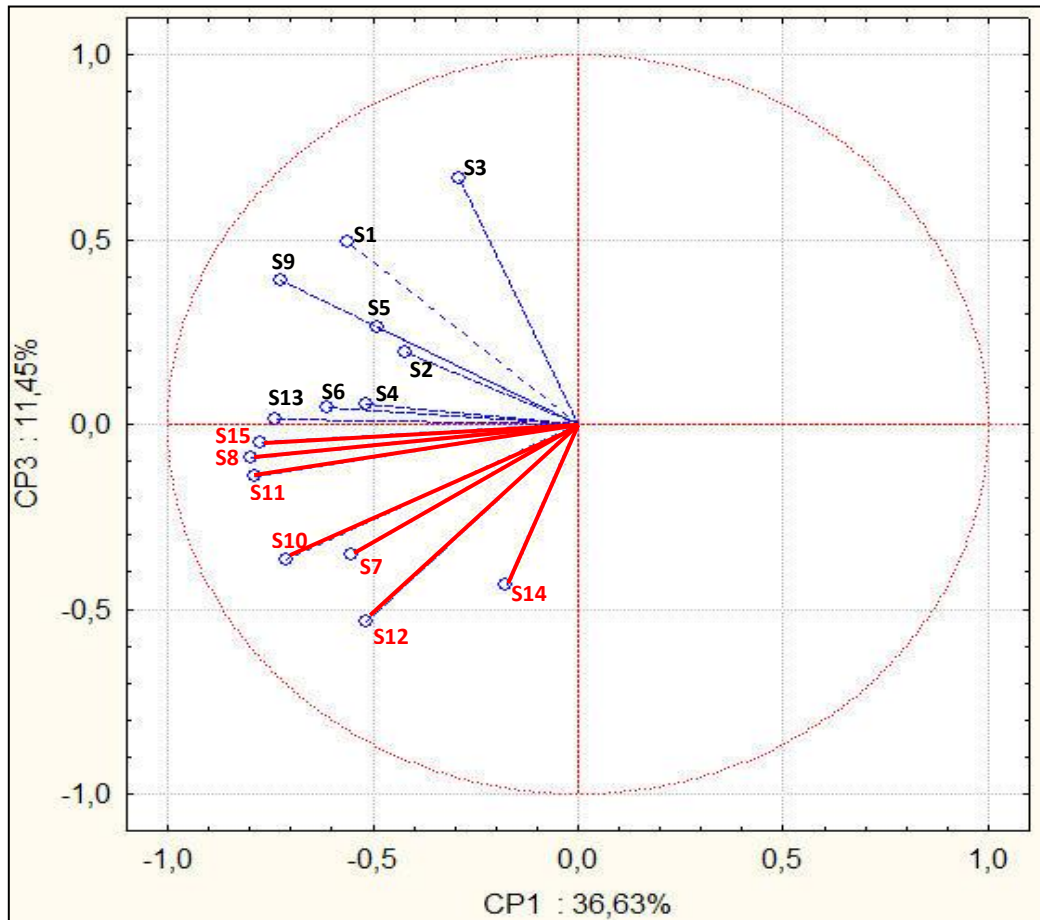


Figure IV.6 : Projection des variables hydrométriques sur les plans (CP1xCP3)

Sur la troisième composante, la structure spatiale s'interrompt. Les projections changent notablement sans explication claire.

Du fait de la complexité des apports liquides dans l'espace, la projection des variables sur les plans CP1xCP2 sera retenue avec un taux explicatif de **50,4%**.

IV.2.4 Distribution des apports moyens mensuels et leurs caractéristiques statistiques

L'analyse des apports moyens mensuels permet de mettre en évidence les régimes des cours d'eau et leurs variations interannuels ou inter-saisonnières (Hebal, 2011).

IV.2.4 .1 Coefficient mensuel de débits (CMD)

La variation saisonnière du régime des cours d'eau peut être traduite par le coefficient mensuel de débits (CMD).

La répartition mensuelle des débits moyens mensuels est récapitulée dans le tableau IV.12.

Tableau IV.12 : Répartition des débits moyens mensuels (m³/s) 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 110302													
Moy	0,13	0,25	0,19	0,41	0,74	0,49	1,03	0,6	0,94	0,31	0,31	0,33	0,14
CMD	0,27	0,53	0,4	0,87	1,54	1,02	2,15	1,25	1,97	0,64	0,64	0,7	/
Max	0,74	1,91	0,69	1,11	1,22	1,89	2,62	2,1	1,91	1,37	0,73	1,21	0,61
Min	0,00	0,01	0,03	0,11	0,14	0,11	0,15	0,18	0,11	0,10	0,05	0,00	0,00
σ	0,17	0,38	0,17	0,15	0,14	0,28	2,04	1,04	0,89	0,25	0,32	0,8	0,20
CV	1,27	1,53	0,87	0,37	0,19	0,57	1,99	1,74	0,94	0,81	1,05	2,38	1,09
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

	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 111127													
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 111106													
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 111129													
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 111425													
Moy	0,07	0,21	0,10	0,18	0,22	0,17	0,29	0,23	0,09	0,04	0,04	0,05	0,07
CMD	0,51	1,51	0,68	1,28	1,56	1,22	2,07	1,63	0,62	0,29	0,27	0,36	/
Max	0,60	2,76	0,68	1,28	3,00	0,90	3,00	2,90	0,34	0,16	0,21	0,46	0,34
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
σ	0,12	0,50	0,12	0,30	0,49	0,22	0,85	0,75	0,09	0,04	0,08	0,09	0,07
CV	1,69	2,34	1,29	1,67	2,22	1,30	2,91	3,27	1,01	0,98	2,01	1,75	1,02
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

D'après les résultats du tableau IV.12, il ressort que :

- ☞ Le maximum mensuel diffère d'un oued à un autre ; Huit (08) 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).
- ☞ L'année hydrologique pour l'ensemble des sous bassins versants comporte une période humide de hautes eaux et une période de basses eaux.
- ☞ Le coefficient mensuel des débits fluctue entre des mois de hautes eaux et ceux de basses eaux.
- ☞ La période de hautes eaux comporte des mois humides ($CMD > 1$) et des mois relativement secs ($CMD < 1$).

Ces résultats permettent de conclure que :

- ✓ Le maximum des débits liquides des différents Oueds étudiés de la Macta est observé en saison de printemps (enregistré par Huit (08) stations hydrométriques en Mars ou en Avril).
- ✓ Le maximum pluviométrique enregistré en saison d'Hiver engendre un maximum de débits liquides en saison de printemps ce qui est logique.

IV.2.5 Détection de ruptures dans les séries hydrométriques

Comme pour la pluviométrie, les séries hydrométriques avec les années lacunaires reconstituées, ont été analysées à l'aide du logiciel Khronostat, en vue de détecter une éventuelle rupture.

Les résultats des différents tests sont récapitulés dans le tableau IV.13.

Pour l'ensemble de ces tests, l'hypothèse nulle de H_0 correspond à l'absence de rupture.

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

Station	A_{moy} (Hm ³)	Buishand	Petit	Leeş Heghinian	X_i (Hm ³)	X_j (Hm ³)	Var (%)	Hubert	X_i (Hm ³)	X_j (Hm ³)	Var (%)
11 01 01	7,61	/	Acceptée	1977	10,35	6,59	36,4	1977	10,35	6,59	36,4
11 02 01	28,15	acceptée	Acceptée	1977	33,44	26,17	21,8	1977	33,44	26,17	21,8
11 03 01	47,53	rejetée	Rejetée (1983)	/	/	/	/	1976	45,9	45,1	17,9
11 03 02	4,54	rejetée	Rejetée (1982)	1982	9,38	5,30	43,5	1970	7,42	5,17	30,3
11 05 06	4,47	rejetée	Rejetée (1986)	1986	7,56	3,21	57,5	1981	10,12	3,64	64,1
11 10 03	16,78	acceptée	Acceptée	1986	19,2	12,7	30,0	/	/	/	/
11 11 27	5,70	rejetée	Rejetée (1997)	1973	15,61	5,42	65,3	1973	15,61	5,42	65,3
11 11 06	10,62	rejetée	Acceptée	1974	23,98	9,86	59,0	1974	23,98	9,86	59,0
11 11 29	23,59	rejetée	Rejetée (1982)	1976	46,43	20,82	55,0	1974	57,58	21,65	62,0
11 12 08	10,28	rejetée	Rejetée (1987)	1987	13,22	8,28	37,3	1987	13,22	8,28	37,3
11 12 20	2,20	rejetée	acceptée	1987	3,16	2,05	35,1	/	/	/	/
11 12 01	20,55	/	Rejetée (2000)	/	/	/	/	1984	22,12	19,79	11,0
11 14 12	2,28	rejetée	Rejetée (1985)	1985	3,93	1,39	64,7	1980	4,70	1,62	65,6
11 14 25	2,28	rejetée	Rejetée (1987)	1987	3,38	1,52	54,9	/	/	/	/
11 14 03	12,68	rejetée	rejetée (1986)	1986	17,85	8,85	50,4	1986	17,85	8,85	50,4

Avec : A_{moy} : Apport moyen interannuel (Hm³) , X_i : Moyenne avant la date de rupture (mm) , X_j : Moyenne après la rupture (mm) ,

Var : Taux de variation (%)

D'après les résultats du tableau IV.13, il a été constaté que :

- ☞ Toutes les stations hydrométriques ont décelé une rupture signalée au moins par un test.
- ☞ Le test de Buishand et celui de Pettit ont décelé des ruptures au niveau de neuf (09) stations hydrométriques.
- ☞ La méthode bayésienne de Lee & Heghinian a signalé une rupture durant la période (1973-1987) au niveau de treize (13) séries hydrométriques qui provoquent une diminution des apports liquides jusqu'à 65,3% (station 111127). Alors que les deux stations hydrométriques (110301, 111201) n'ont connu aucune rupture par cette méthode.
- ☞ La segmentation d'Hubert a signalé des ruptures au niveau de douze (12) stations hydrométriques dont les dates de rupture de six (06) séries hydrométriques sont semblables à celles données par la méthode bayésienne.

Ces résultats permettent de conclure que :

- Tous les oueds de la Macta ont connu une rupture entre les années 70 et les années 80 produisant une diminution des apports liquides jusqu'à 65,6%, ce qui confirme l'hypothèse formulée quant à la variabilité climatique « Déficit ».

IV.3 Impact de la variabilité du régime pluviométrique sur le régime hydrométrique

Pour visualiser et valoriser la répercussion du changement du régime pluviométrique sur l'apport liquide des Oueds de la Macta, une comparaison du taux de variabilité du régime pluviométrique sur les apports des oueds correspondants de chaque sous bassin a été effectuée (Tableau IV.14).

Tableau IV.14 : Synthèse du taux de variation du régime pluviométrique sur le régime hydrométrique des oueds de la Macta

Code	SBV	Période d'observation	Station pluviométrique	Année de rupture	Var (%)	Station hydrométrique	Année de rupture	Var (%)
01	Mekerra amont	1966-2009	110102	1972	26,8	110101	1977	36,4
02	Mekerra moyen		110203	1975	24,1	110201	1977	21,8
03B	Mekerra aval à Sarno		110318	1975	28,6	110302	1970	30,2
03C	Mekerra aval à Sidi Belabbes		110305	1974	24,2	110301	1976	17,9
05A	Melrir	1978-2007	110509	2007	-32,8	110506	1981	64,1
10	Hounet	1975-2009	111002	2001	-60,4	111003	1986	30,0
11A	Saida amont	1973-2009	111103	1976	22,9	111127	1973	65,3
11B	Saida moyen		111113	1976	26,9	111106	1974	59,0
11C	Saida aval		111116	2000	-47,4	111129	1974	62,0
12A	Mimoun		111208	2001	-31,9	111208	1987	37,3
12B	Hasna		111205	2007	-56	111220	1987	35,2
12C	Taria		111217	2001	-63,8	111201	1984	11,0
14A	Maoussa		111417	1989	34,4	111425	1987	54,9
14B	Froha		111404	1980	22,2	111412	1980	65,6
14C	Fekane	1970-2009	111413	1985	12,4	111403	1986	50,4

Avec :

Var : Taux de variation (%)

D'après les résultats du tableau IV.14, il ressort clairement que :

- ☞ Les dates de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrométriques se concordent au niveau de cinq (05) sous bassins versant de la Macta traduisant par une diminution de pluviométrie et des apports liquides.
- ☞ Les dates de ruptures ne se concordent pas au reste des sous bassins versants. Cela est dû principalement à la complexité des variables hydrologiques, notamment les apports liquides des cours d'eau.

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. Les valeurs du coefficient de variation ne suivent pas en général la grandeur de la hauteur pluviométrique. 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 des différents Oueds de la Macta montre qu'ils sont irréguliers ($C_v > 0,5$). Cette variabilité est due à l'alimentation pluviale irrégulière des Oueds. 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 hydrologiques montrent que L'hypothèse formulée quant à la variabilité climatique est vraie, elle a frappé le bassin versant de la Macta depuis les années 70 où le régime pluviométrique a diminué de 29%. Les conséquences de cette variabilité a été remarquée sur les apports liquides des Oueds de la Macta en diminuant jusqu'à 67%.

CHAPITRE V :

PERFORMANCE DES MODÈLES

EMPIRIQUES DE CALCUL DES

APPORTS LIQUIDES

Chapitre V

Etude de performance des modèles empiriques

Introduction

Les apports liquides peuvent être quantifiés par les formules empiriques sans revenir aux données d'observation hydrométriques. L'objectif de ce chapitre est de calculer l'apport liquide des Oueds de la Macta par les formules empiriques les plus utilisées en Algérie et de comparer les résultats trouvés avec les valeurs observées.

V.1 Objectif d'utilisation des formules empiriques

Les formules empiriques sont utilisées pour tester leur adéquation au sous bassins versants de la Macta. Même si le calcul sort des bornes imposées par l'auteur (surface et précipitations), afin de :

- ☞ En cas d'absence de mesure in situ pour les bassins versants jaugés, pouvoir substituer la valeur manquante par la valeur calculée.
- ☞ Pour les bassins versant non jaugés (non contrôlé par une station hydrométrique), application directe du modèle empirique qui a prouvé son efficacité dans un bassin versant analogue.

V.2 Application des modèles empiriques aux sous bassins versants de la Macta

Les douze (12) modèles empiriques décrits en partie bibliographique, ont été appliqués aux quinze (15) sous bassins versants jaugés de la Macta.

Après calcul, trois (03) modèles empiriques ont été éliminés :

- Modèle de MEDINGER, qui a donné des résultats exagérés.
- Les modèles de TURC, COORDONA qui ont donné des résultats négatifs.

Les résultats d'application des différents modèles empiriques sont présentés dans les figures suivantes (figure V.1 jusqu'à la figure V.15).

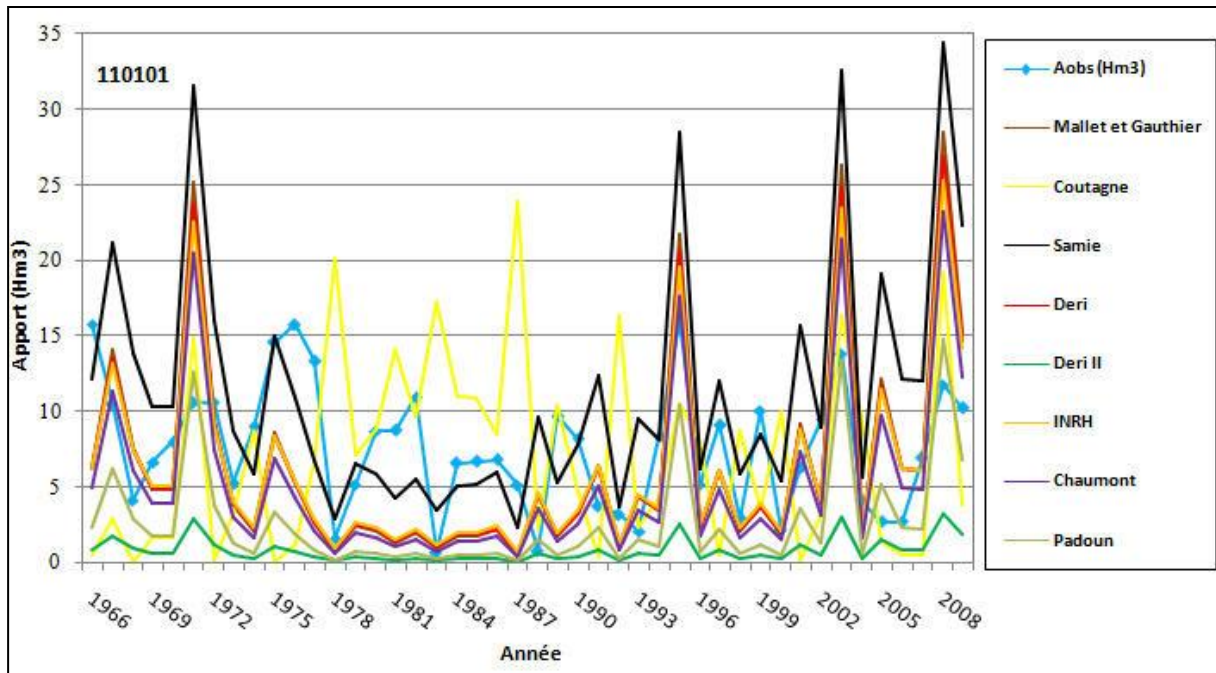


Figure V.1 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Mekerra amont

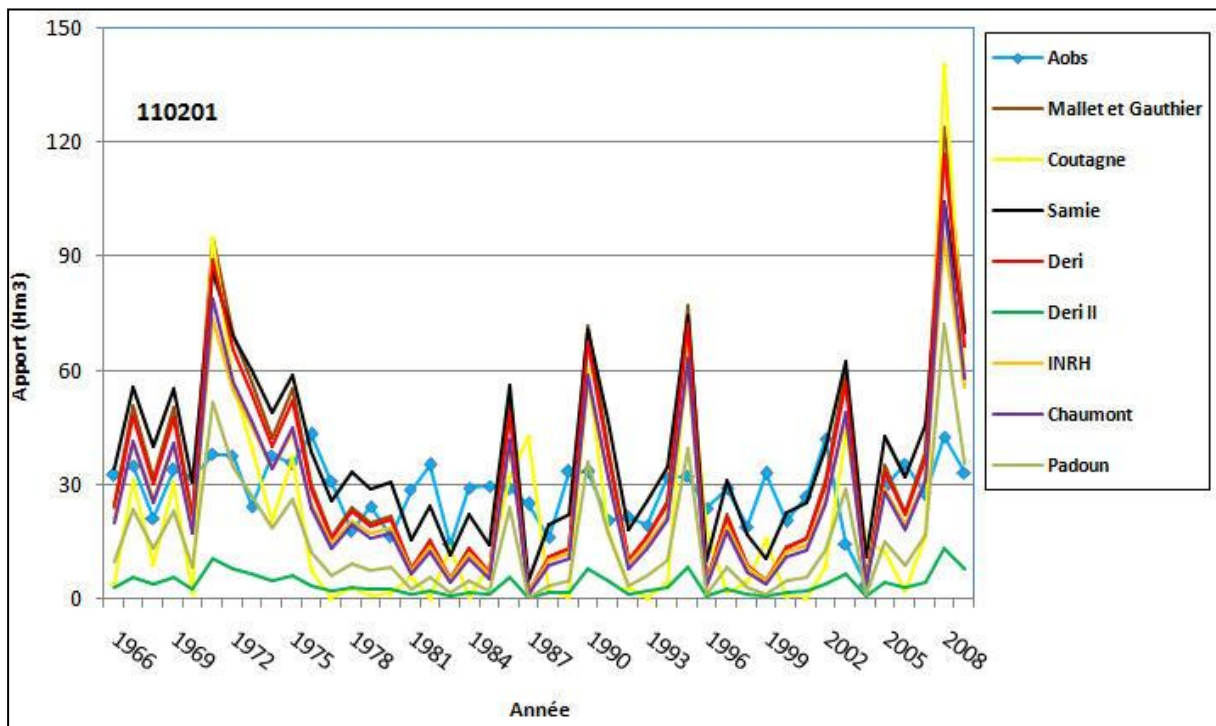


Figure V.2 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Mekerra moyen

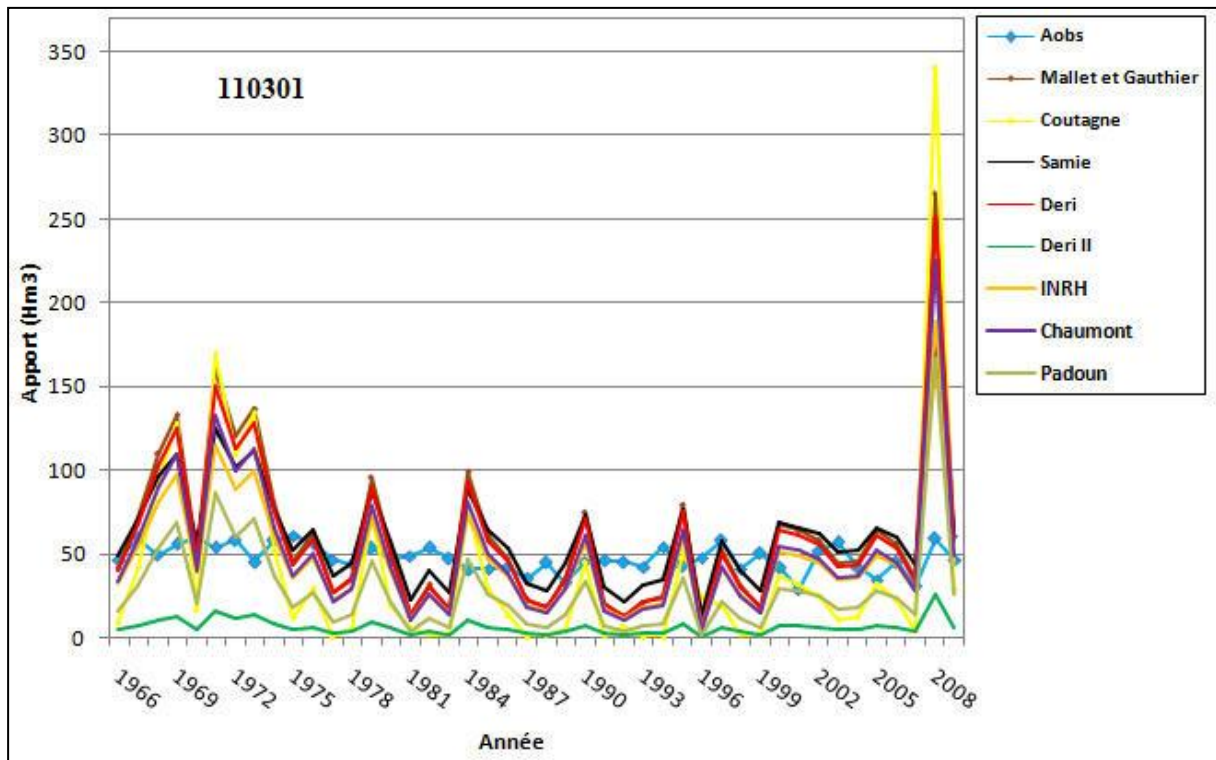


Figure V.3 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Mekerra aval

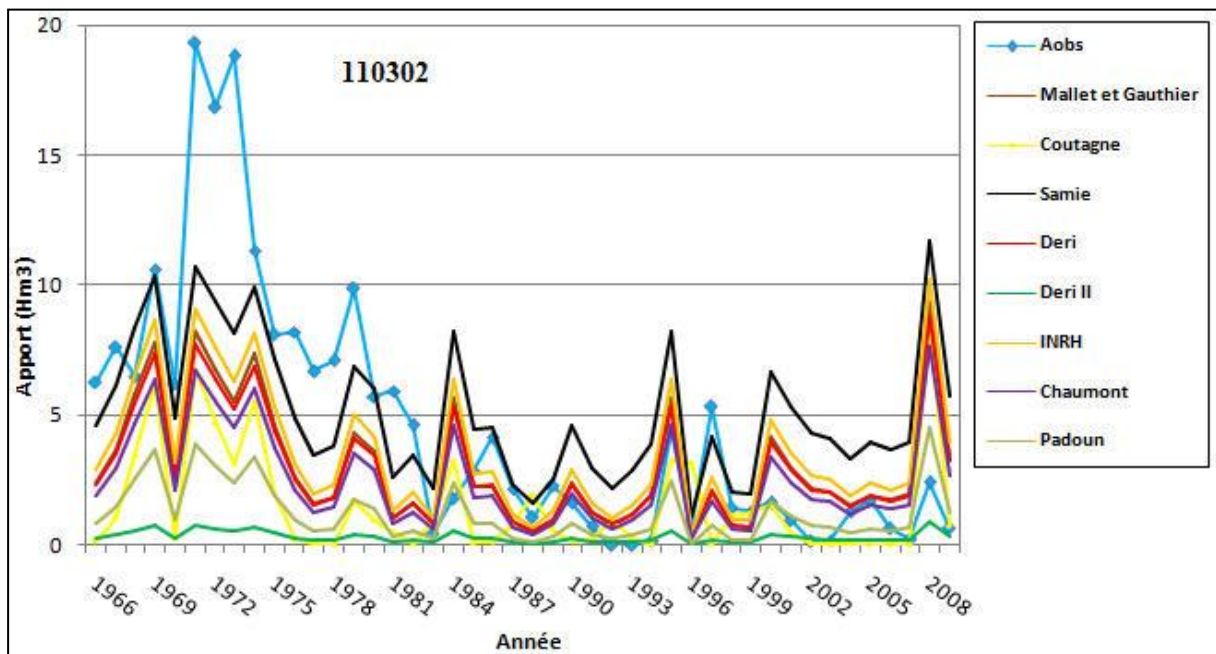


Figure V.4 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Sarno amont

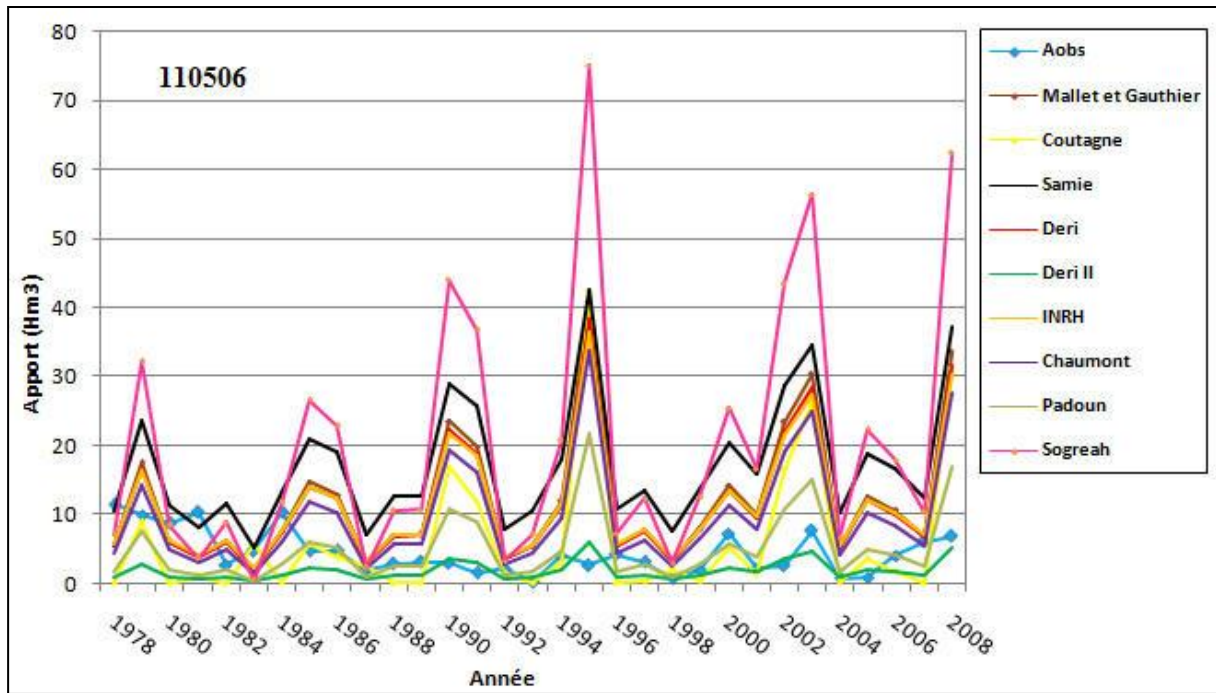


Figure V.5 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Louza

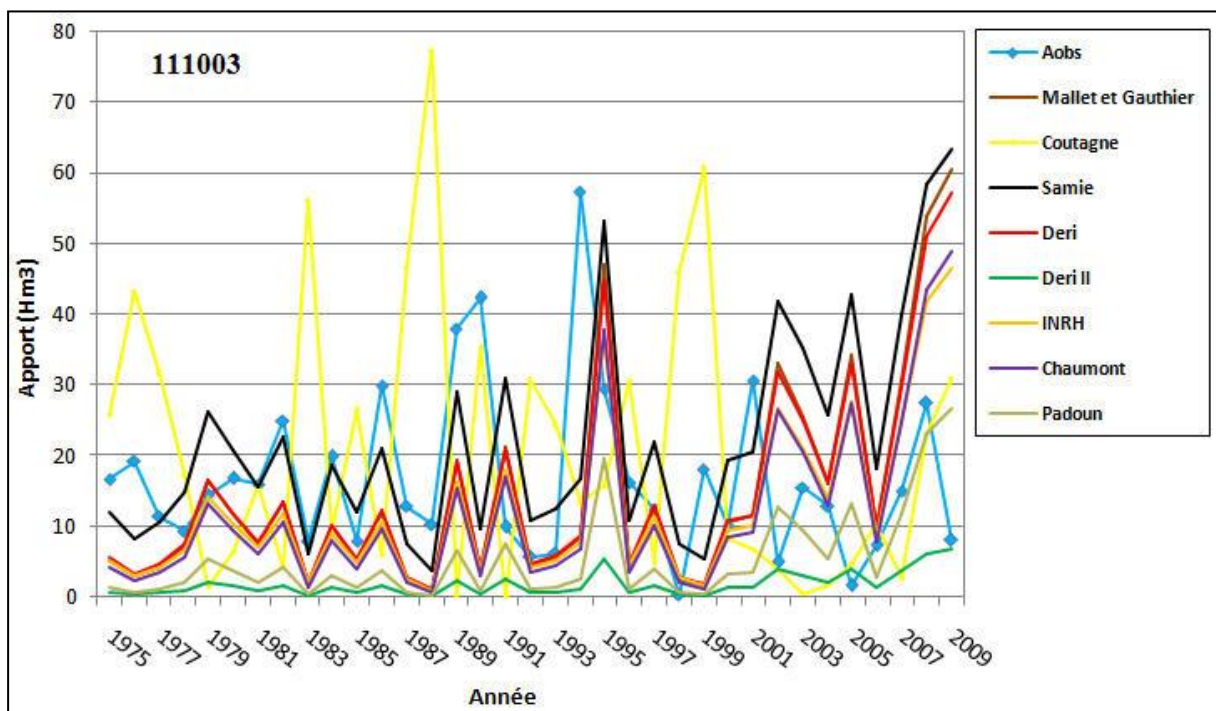


Figure V.6 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Hounet

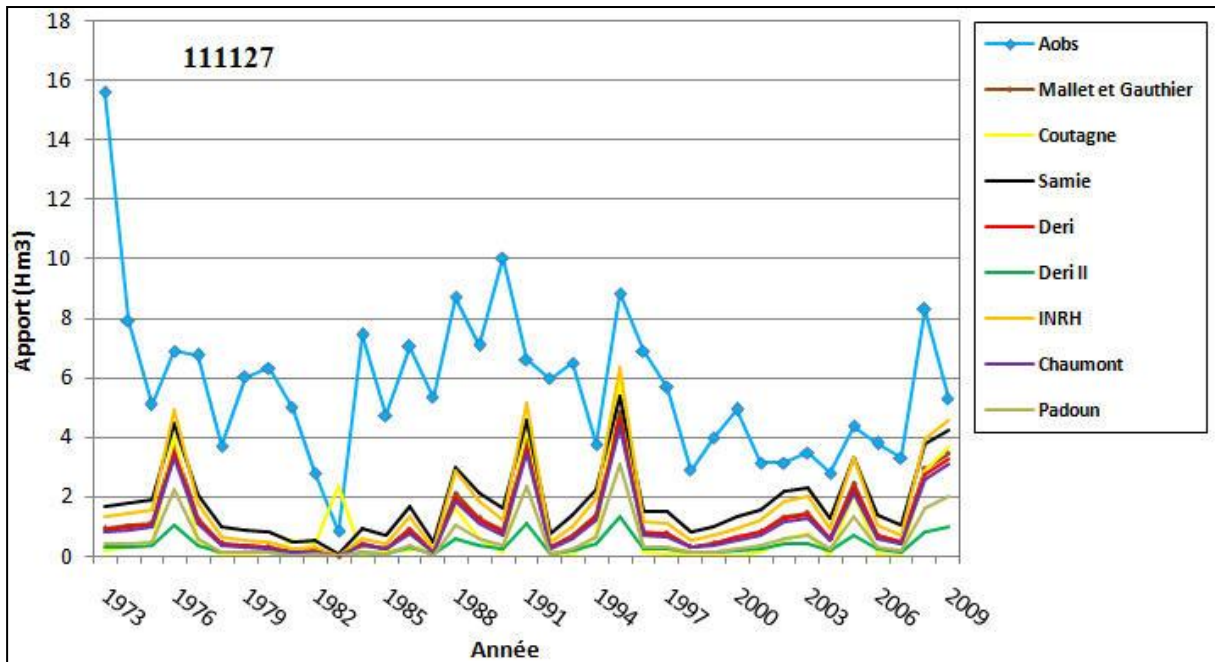


Figure V.7 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Saida (PN03)

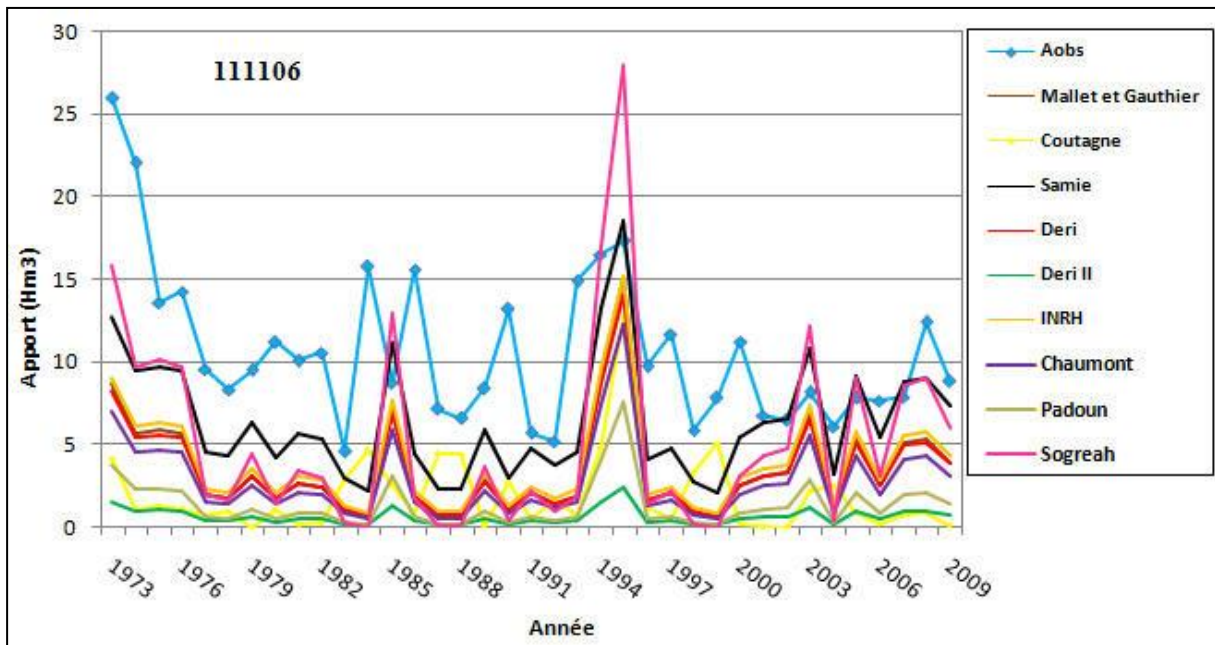


Figure V.8 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Saida (PK50)

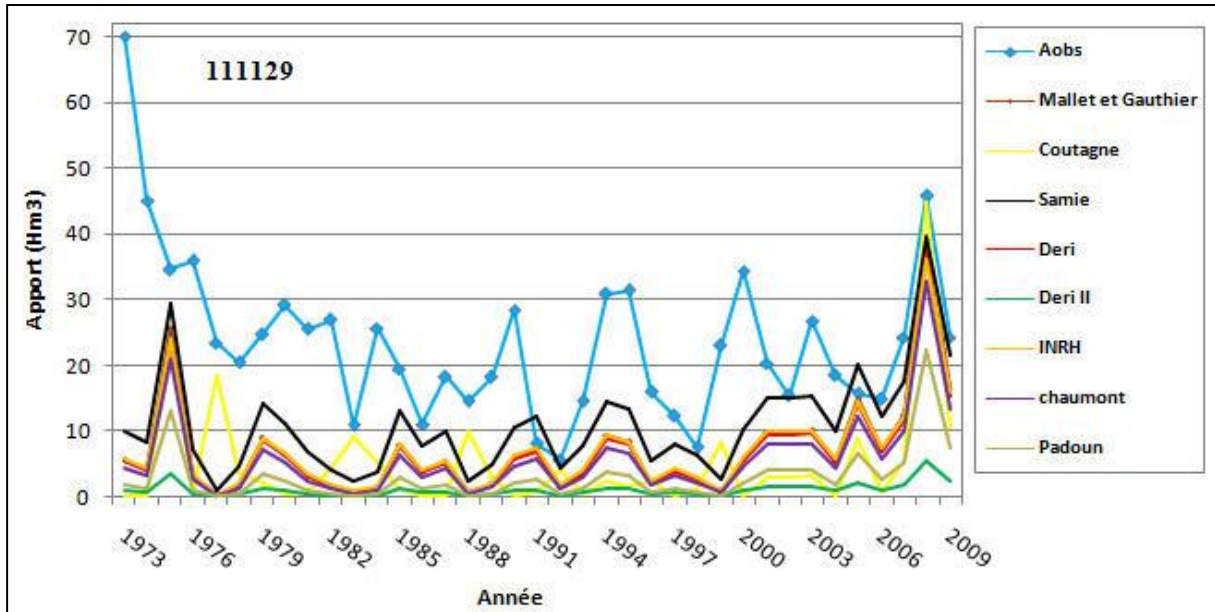


Figure V.9 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Saïda

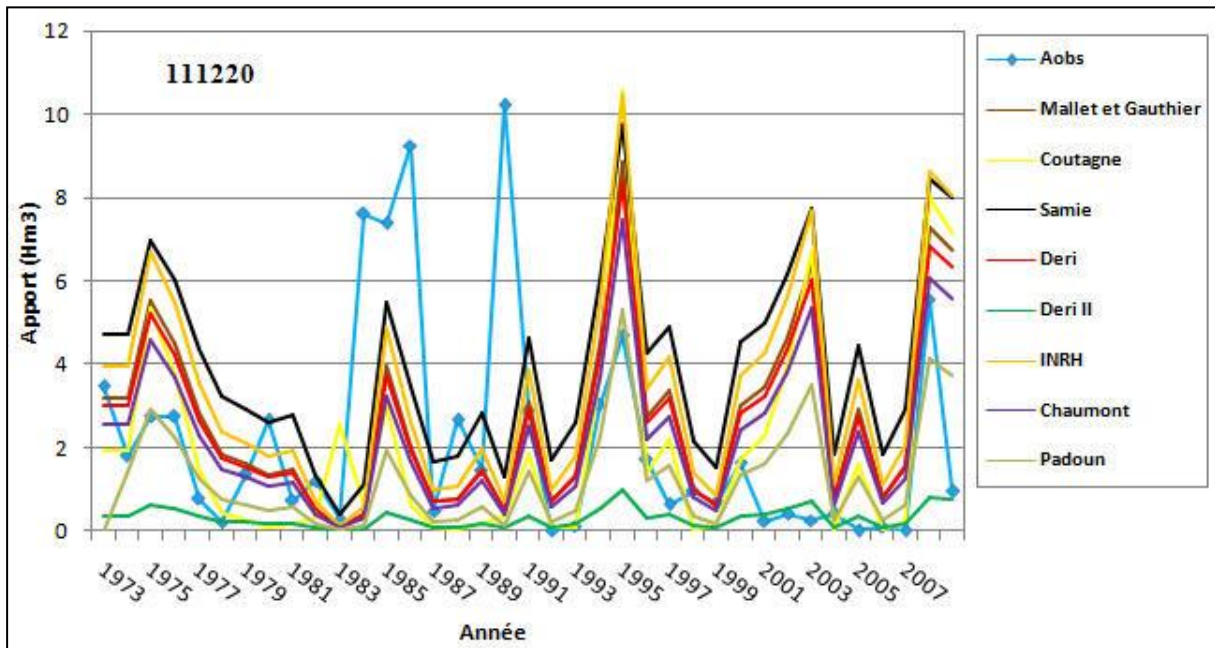


Figure V.10 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Bouchikhi

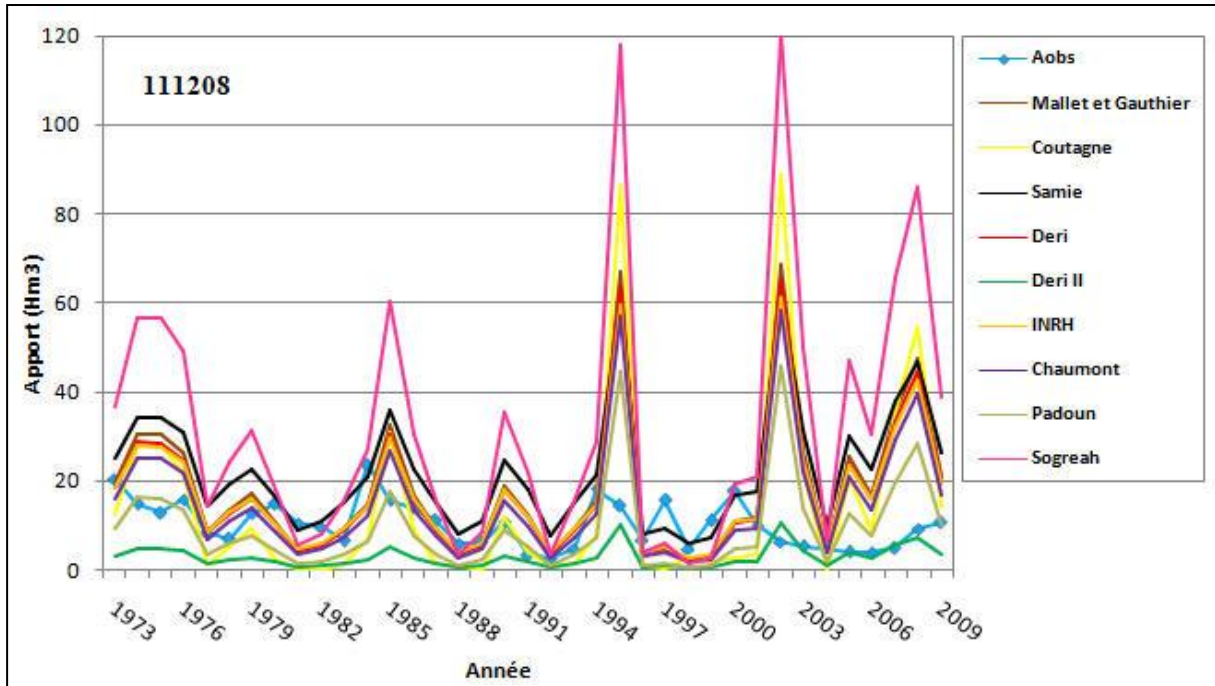


Figure V.11 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Sidi Mimoun

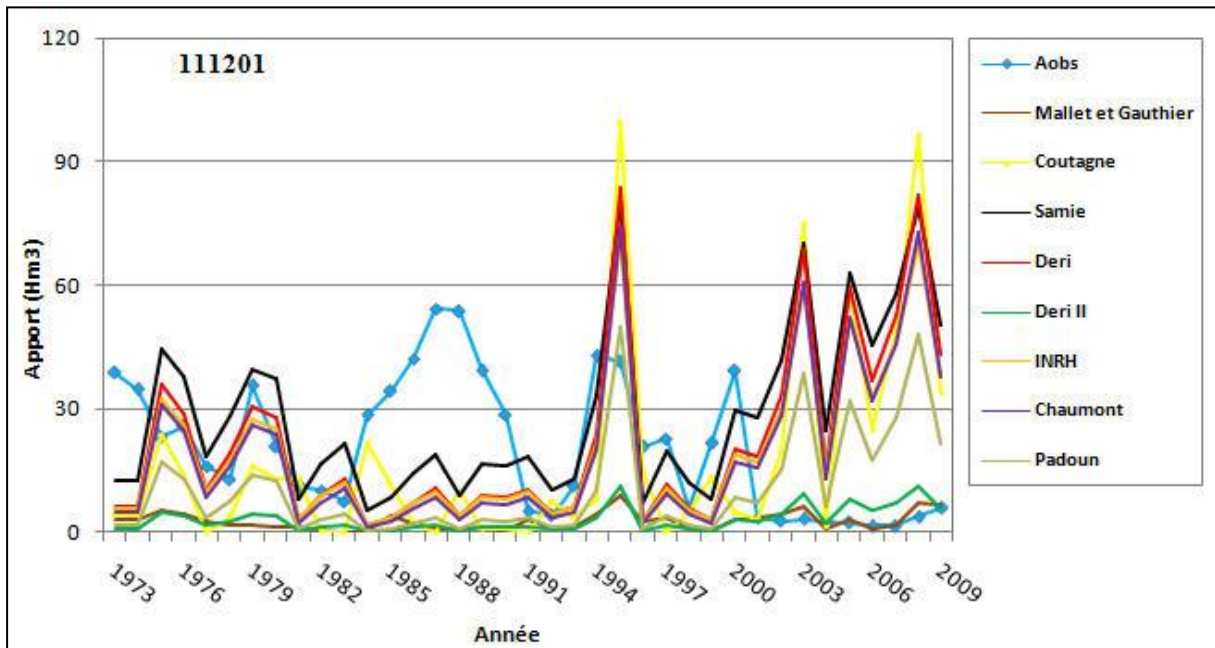


Figure V.12 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Taria

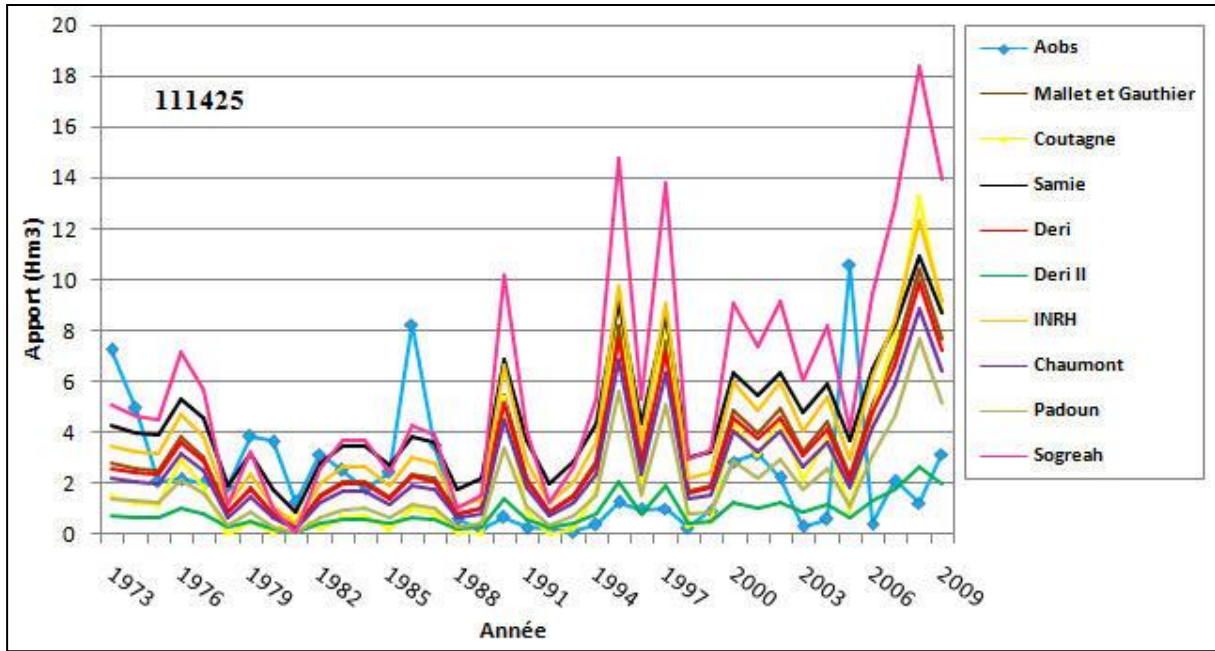


Figure V.13 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Khalouia

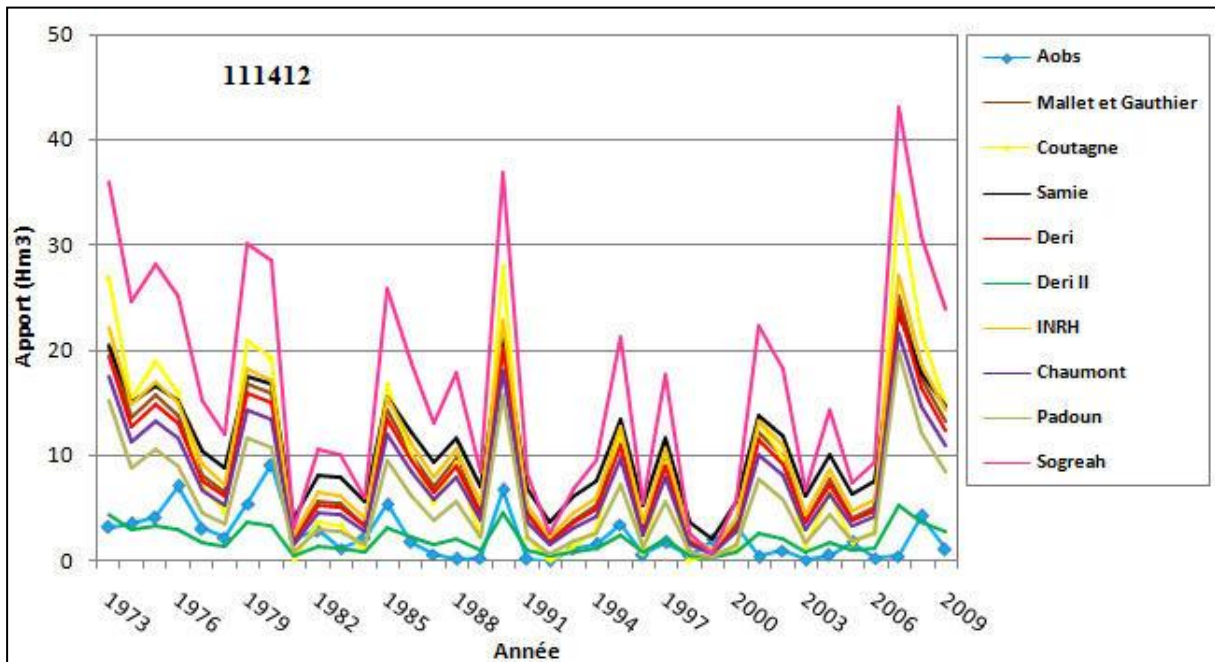


Figure V.14 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Ghriiss

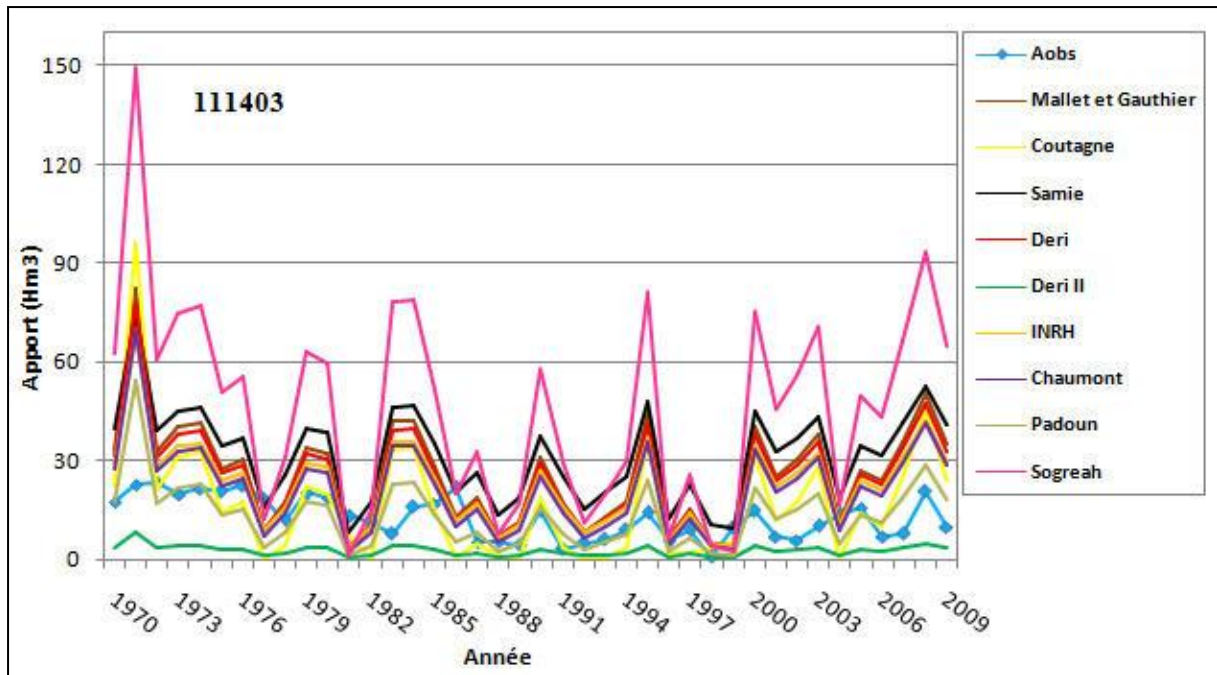


Figure V.15 : Application des modèles empiriques au sous bassin versant de Fekane

La comparaison des résultats d'application des formules empiriques au regard des valeurs observées, laisse apparaître une certaine dispersion, Cependant :

- Beaucoup de formules empiriques appliquées aux sous bassins versants de Fekane (111403), de Ghriss (111412), de Sidi Mimoun (111208) et de Louza (110506) surestiment l'apport annuel observé au droit de ces stations hydrométriques.
- D'autres formules empirique appliquées aux sous bassins versants de Saida, sous-estiment l'apport annuel observé au droit des stations hydrométrique (111127, 111106, 111129).
- Pour l'ensemble des sous bassins versants étudiés, la formule empirique de DERI II sous-estime l'apport annuel observé.

Les résultats de calcul de l'apport moyen interannuel par chaque modèle empirique sont détaillés au tableau V.1.

Tableau V.1 : Résultats de calcul de l'apport moyen interannuel par les modèles empiriques

SBV	Station hydrométrique	A _{moy} (Hm ³)	A _{moy} Calculé (Hm ³)									Nbre de modèle >A _{moy} obs	Nbre de modèle <A _{moy} obs
			MALLET & GAUTHIER	COUTAGNE	SAMIE	DERI	DERI II	INRH	CHAUMONT	PADOUN	SOGREAH		
Mekerra amont	110101	7,61	6,4	7,0	11,3	6,3	0,8	6,2	5,2	2,7	/	1	7
Mekerra moyen	110201	28,15	32,5	21,1	38,1	31,0	3,7	26,5	26,4	14,9	/	3	5
Mekerra aval	110301	47,53	60,7	39,1	60,4	57,7	6,2	46,0	49,6	27,9	107,3	5	4
Sarno amont	110302	4,54	3,0	1,5	5,1	2,9	0,3	3,5	2,4	1,2	/	1	7
Louza	110506	4,47	11,9	6,2	17,1	11,4	1,9	11,4	9,7	5,1	20,3	8	1
Hounet	111003	16,78	14,8	20,7	22,1	14,6	1,8	12,5	11,9	5,4	/	2	6
Saida PN03	111127	5,70	1,2	0,9	1,8	1,1	0,3	1,6	1,0	0,6	/	/	8
Saida PK50	111106	10,62	3,5	1,9	6,4	3,4	0,6	3,9	2,8	1,4	/	/	8
Saida	111129	23,59	7,0	5,0	10,9	6,7	1,1	7,0	5,7	3,0	/	/	8
Sidi Mimoun	111208	10,28	18,1	14,3	22,3	17,2	2,9	16,9	14,9	9,4	32,0	7	2
Bouchikhi	111220	2,20	2,7	2,0	4,0	2,6	0,3	3,3	2,2	1,3	/	3	5
Taria	111201	20,55	23,2	17,8	28,5	22,1	3,1	19,8	18,9	10,5	/	3	5
Ghriss	111412	2,28	9,1	9,3	10,8	8,6	2,0	10,1	7,6	5,8	16,4	8	1
Khalouia	111425	2,28	3,3	2,6	4,6	3,1	0,9	4,1	2,7	1,9	5,9	7	2
Fekane	111403	12,68	25,8	16,5	31,7	24,5	2,6	22,5	21,0	13,3	46,2	8	1

Avec : **SBV** : Sous bassin versant , **A_{moy}** : Apport moyen interannuel observé (Hm³).

Les résultats du tableau V.1 montre que :

- Le modèle empirique de DERI II sous-estime l'apport liquide de l'ensemble des oueds de la Macta.
- Le modèle de SOGREAH n'est pas appliqué au neuf (09) sous bassins versants, cela est dû à des valeurs de précipitations annuelles parfois inférieures à 150 mm (limite donnée par la formule). En revanche, ce modèle est appliqué à six (06) sous bassins versants mais il surestime énormément l'apport observé (exemple : au oued Mekerra aval, l'apport calculé est plus de 2,25 fois la valeur observé).
- Tous les modèles empiriques appliquées aux sous bassins versants de Saida (111127,111106 et 111129) sous-estiment l'apport observé.
- Les modèles empiriques appliquées aux sous bassins versant de Ghriss (111412), Khalouia (111425) et Fekane (111403) surestiment l'apport liquide interannuel observé.

Cette fluctuation peut être due aux :

- a) Paramètres intervenants ; la plupart des formules empiriques utilisent seulement les précipitations comme facteur estimatif des apports liquides; alors qu'il existe d'autres facteurs comme la perméabilité du terrain, couverture végétale, l'hydrogéologie...etc, qui influencent la génération des apports liquides des Oueds.
- b) Dans la majorité des cas, les formules empiriques sont établies sur un nombre limité de bassins versants de caractéristiques particulières (Précipitations, surface), ce qui confirme le caractère étroitement régional.
- c) La qualité des données hydrologiques : la banque de données hydro-climatologiques comporte effectivement des lacunes voir des erreurs, ce qui influence leur qualité.

V.3 Choix du modèle empirique

Pour choisir le modèle empirique le plus adéquat, proche de la valeur réelle observée à la station hydrométrique, une comparaison de graphiques hydrologiques a été effectuée en utilisant les critères suivants : Coefficient de détermination R^2 , Critère de **Nash**, Critère de **RMSE**.

Ces critères ont été appliqués à l'ensemble des sous bassins versants jaugés, modèle par modèle, et seuls les résultats significatifs ont été retenus (tableau V.2).

Tableau V.2 : Résultats des critères de Nash, R^2 et RMSE appliqués aux sous bassins versants étudiés de la Macta

N°	SBV	Station hydrométrique	Critères d'efficacité					
			R^2	Modèle	Nash	Modèle	RMSE	Modèle
1	Mekerra amont	110101	0,47	SAMIE	-0,91	INRH	5,74	INRH
2	Mekerra moyen	110201	0,48	SAMIE	-3,65	INRH	329,51	INRH
3	Mekerra aval	110301	0,32	COUTAGNE	-14,32	INRH	31,78	INRH
4	Sarno amont	110302	0,52	SAMIE	-0,39	SAMIE	3,94	INRH
5	Louza	110506	0,16	SAMIE	1,00	SOGREAH	4,21	Deri II
6	Hounet	111003	0,25	SAMIE	-0,99	INRH	16,7	INRH
7	Saida PN03	111127	0,33	SAMIE	-2,12	SAMIE	4,60	SAMIE
8	Saida PK50	111106	0,52	MALLET & GAUTHIER , CHAUMONT	-0,63	SAMIE	5,94	SAMIE
9	Saida	111129	0,34	PADOUN	-1,05	SAMIE	17,47	SAMIE
10	Sidi Mimoun	111208	0,16	SAMIE	-2,09	DERI II	9,15	DERI II
11	Bouchikhi	111220	0,16	COUTAGNE	-0,25	PADOUN	2,93	PADOUN
12	Taria	111201	*	/	-1,32	DERI II	24,93	DERI II
13	Ghriss	111425	*	/	-0,95	CHAUMONT	3,21	CHAUMONT
14	Khalouia	111412	0,54	DERI II	-0,26	DERI II	5,37	PADOUN
15	Fekane	111403	0,53	PADOUN	-0,85	PADOUN	8,68	PADOUN

(*) : Valeur négative.

Avec : **SBV** : sous bassin versant , **R^2** : coefficient de détermination , **RMSE** : Root mean square error.

Au vue des résultats du tableau V.2, il apparait que :

- Le coefficient de détermination pour l'ensemble des modèles empiriques retenues n'est pas significatif ($R^2 < 0,80$).
- Les apports liquides des sous bassins versants de Taria et de Ghriss ne se rapprochent à aucun modèle empirique par le critère de R^2 . donc il n'y a pas de liaison entre les données observées et celles données par les modèles empiriques.
- Le critère de Nash est négatif pour la majorité des sous bassins, donc les modèles empiriques retenus par ce critère ne sont pas significatifs. A l'exception de oued Hounet où Nash=1, mais la valeur de R^2 correspondante est très faible ($\approx 0,05$). Ce résultat n'est pas satisfaisant.

Ces résultats obtenus montrent que les formules empiriques appliquées ne sont pas adaptées aux sous bassin versants de la Macta.

Ces résultats confirment les constatations trouvés par Kabouya (1990) dans sa thèse de doctorat. Cet auteur a calculé les débits moyens interannuels de 70 stations hydrométriques de l'Algérie du nord en utilisant les formules empiriques suivantes : MEDINGER, PADOUN, DERI, COUTAGNE, ADJEL et ISMAIL. Les résultats trouvés ont montré que les formules empiriques ne s'adaptent pas aux valeurs observées quelque soit la valeur de précipitation ($250 \leq P \leq 1250$ mm).

Conclusion

Les formules empiriques utilisées précédemment ne sont pas adaptées aux calculs hydrologiques des sous bassins versants jaugés de la Macta. Pourtant ces formules sont encore très utilisées par tous les hydrologues effectuant des études en Algérie, en particulier les hydrologues du bureau d'études intervenant en mobilisation des ressources en eau superficielles (petits barrages et retenues collinaires). Généralement ces hommes de l'art préfèrent appliquer ces formules que revenir aux données d'observation du réseau hydrométrique.

L'utilisation de ces formules peut entraîner une surestimation de l'apport liquide ou une sous-estimation, donc une mauvaise évaluation de la ressource en eau. C'est pourquoi, il faut développer un modèle pluie-débit spécifique à chaque surface jaugée en tenant compte de tous les paramètres climatiques, morphométriques de la zone d'étude qui influencent sur les apports liquides d'un cours d'eau.

CHAPITRE VI :

ANALYSE MULTIDIMENSIONNELLE DES APPORTS LIQUIDES

Chapitre VI

Analyse multidimensionnelle des apports liquides du bassin versant de la Macta

Introduction

Les précipitations sont sans doute le facteur principal agissant d'une manière directe sur les apports liquides des cours d'eau. Mais d'autres facteurs peuvent intervenir et avoir une influence notable sur la genèse de l'apport liquide en l'accéléralant ou en le retardant.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'affinité entre les sous bassins versants jaugés de la Macta et de tirer les paramètres caractéristiques qui influencent les apports liquides dans le but de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions où les mesures sont rares ou inexistantes.

VI.1 Choix des variables

A priori, la recherche des variables explicatives n'est plus aisée, car beaucoup d'entre elles interviennent et qui peuvent être classées en trois (03) groupes :

VI.1.1 Caractéristiques climatiques

- **La pluie (P)**: Elle constitue le paramètre principal dans la génération de l'écoulement de l'année en cours.

VI.1.2 Caractéristiques morphométriques

Ce sont des caractéristiques physiques liées au bassin versant, à savoir :

- **La surface (S)**, qui est un paramètre important, permet de contrôler le volume des apports liquides (Touaibia, 2004).
- **La forme (Kc)** : qui influence fortement l'écoulement global et le temps de réponse du bassin versant (Touaibia, 2004). Un bassin ramassé ($Kc < 1$) a un temps de réponse plus court qu'un bassin allongé ($Kc > 1$).

- **Densité de drainage** (Dd) : la densité des chevelus hydrographiques agit considérablement sur la quantité des apports liquides. Plus le bassin versant est dense, plus la quantité des apports liquides est importante.
- **La topographie** : la notion essentielle à considérer est la pente, qui agit sur l'intensité des apports liquides et sur le temps de réponse d'un bassin versant.

VI.1.3 Caractéristiques physio-lithologiques

- **Couvert végétal** : Est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de végétation joue un rôle régulateur dans le régime d'écoulement. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.
- **La géologie** : son influence se fait sentir sur le régime des Oueds. Les terrains imperméables (granite, argile, limon, marne) contribuent au ruissellement d'autant plus lorsque le couvert végétal est absent (Touaibia, 2004). Par contre, les terrains perméables (sables, graviers, alluvions, calcaires) jouent un rôle prépondérant dans l'infiltration.

Les variables retenues dans cette étude sont comme suit :

P_{moy} : Précipitation moyenne interannuelle (mm) ;

S : Surface du bassin versant (Km²) ;

Kc : coefficient de compacité ;

Dd : densité de drainage (Km/Km²) ;

Im : Indice de pente moyenne (%) ;

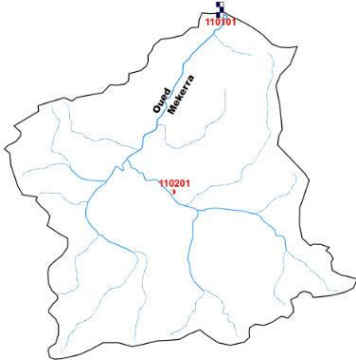

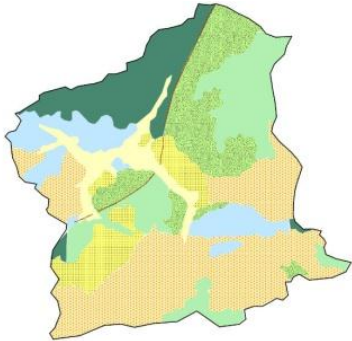
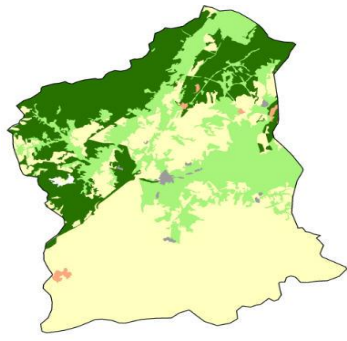
I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

Ic : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement (%).

VI.2 Caractéristiques des sous bassins versant de la Macta selon les variables retenues

Les caractéristiques de chaque sous bassin selon les variables retenues sont indiquées dans les tableaux de VI.1 au VI.15.

Tableau VI.1 : Synthèse des paramètres caractéristiques du sous bassin versant Mekerra amont (SBV1)

Paramètres Nom SBV	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Mekerra amont											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L_i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I_l (%)	I_c (%)
	217	7,61	2576	2,70	955	1,35	1116	50	5,95	32,80	54,48

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).



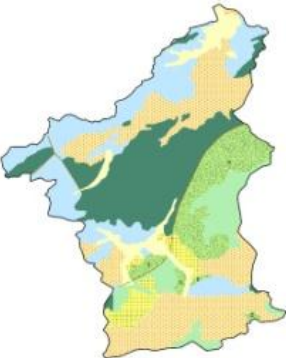

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

I_c : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.2 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Mekerra moyen (SBV2)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Mekerra moyen											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	307	28,15	5372	2,87	1871,2	1,66	3107	50	8,30	41,90	37,72

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ; **A** : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

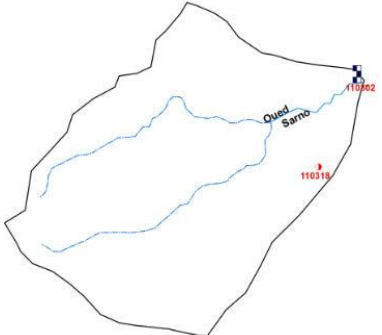

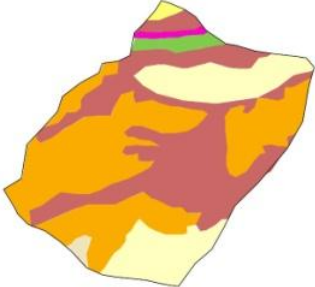

L_i : Longueur des affluents (Km) ; **Dd** : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.3 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Sarno amont (SBV3A)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Sarno amont											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	288,4	4,54	546,2	2,50	218,5	1,22	276,1	50	6,32	32,07	0,78

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;


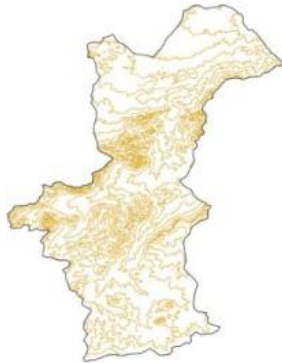
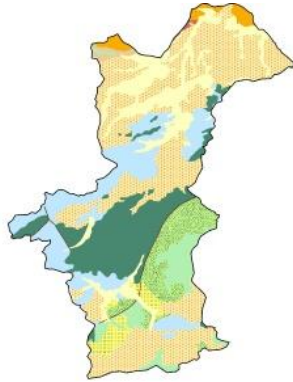

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.4 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Mekerra aval (SBV3B)

Paramètres Nom SBV	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Mekerra aval											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L_i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I_l (%)	I_c (%)
	340,2	47,53	8641	3,10	2785,6	1,82	4053	50	7,27	48,71	27,42

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

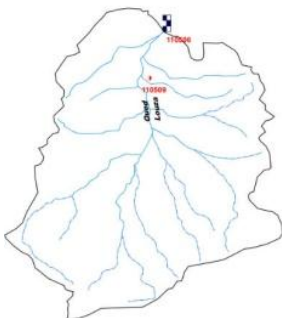

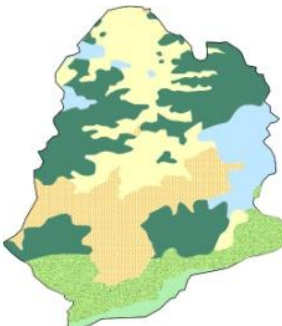
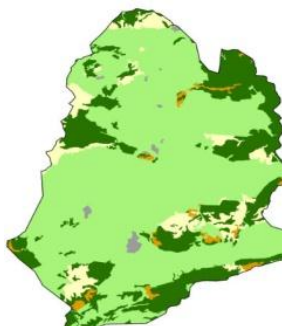
S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

I_c : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.5 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Louza (SBV5)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Louza											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	304,1	4,47	2157,9	2,90	744,1	1,23	1110	50	7,46	33,50	9,55

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;


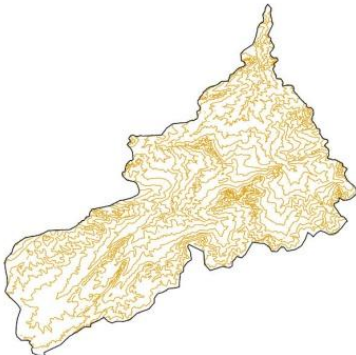
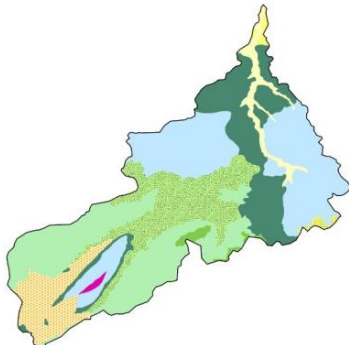
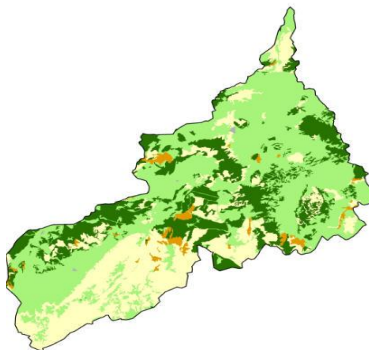
Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.6 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Hounet (SBV10)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Hounet											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	201,1	16,78	7162	2,78	2576,8	1,66	4139	50	8,03	28,00	29,29

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ;

Kc : Indice de forme ;

L : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

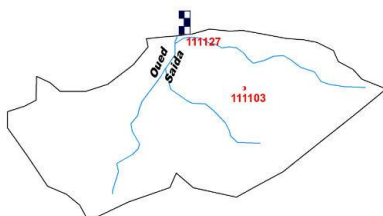
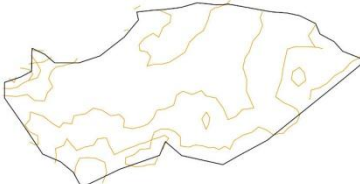
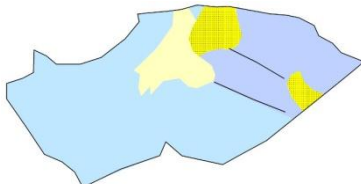
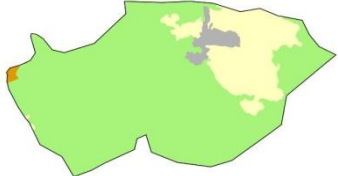
ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ;

Im : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

I_c : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.7 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Saida PN03 (SBV11A)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Saida PN03											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L_i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I_l (%)	I_c (%)
	312,2	5,70	118,2	1,95	60,6	1,28	69,1	50	5,71	35,60	20,81

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

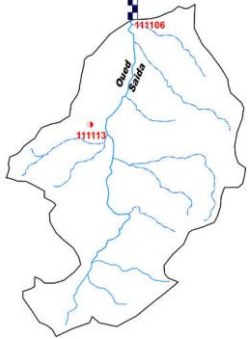

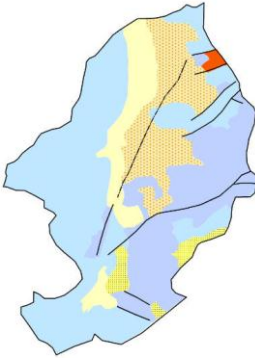
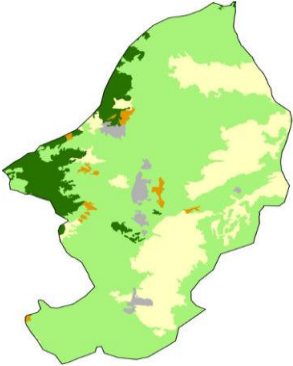
Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.8 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Saida PK50 (SBV11B)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Saida PK50											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L_i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I_l (%)	I_c (%)
	248	10,62	975,1	2,53	385,7	1,34	629,6	50	8,16	51,0	27,0

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

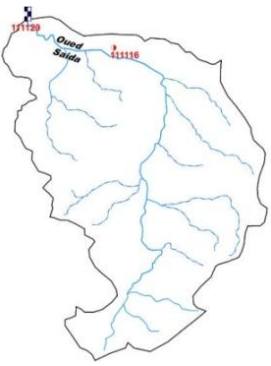


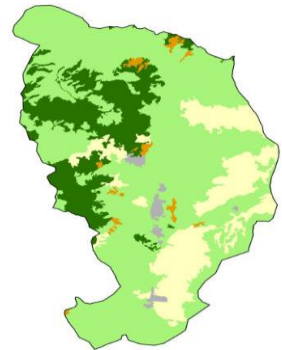
Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.9 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Saida (SBV11C)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Saida											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	287,6	23,59	1672,1	2,91	574,6	1,33	1255	50	10,92	47,80	19,71

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ;

Kc : Indice de forme ;

L : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);


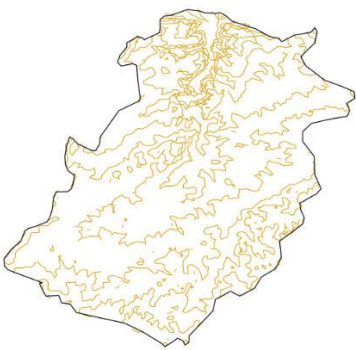
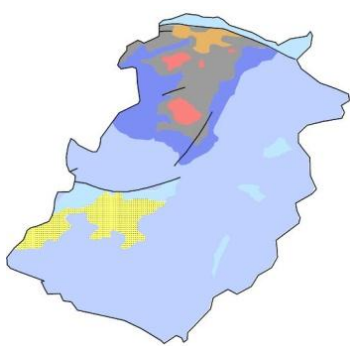
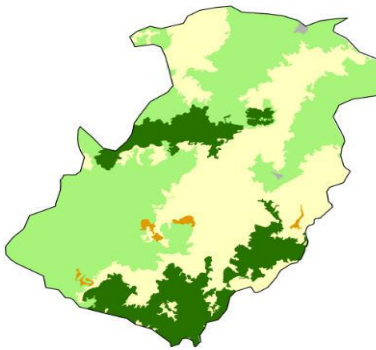
ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ;

Im : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

I_c : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

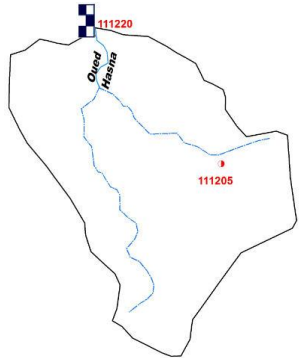
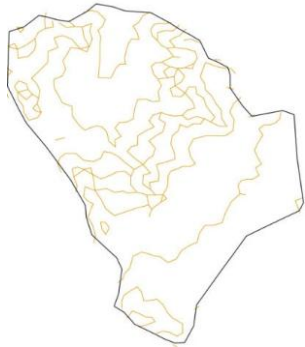
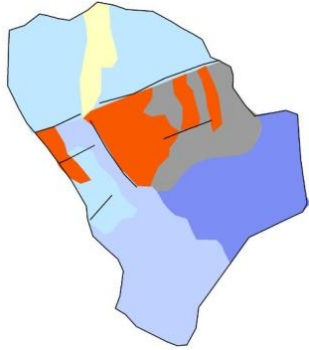
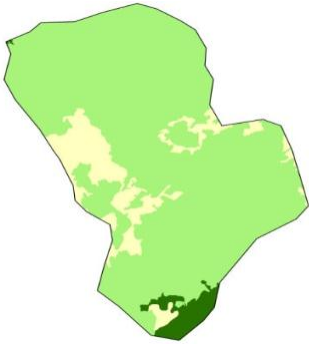
Tableau VI.10 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Sidi Mimoun (SBV12A)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Sidi Mimoun											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	355,1	10,28	1999,5	2,90	689,5	1,42	1192	50	8,64	10,10	38,42

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;**A** : Apport moyen interannuel (Hm³) ;**L_i** : Longueur des affluents (Km) ;**Dd** : Densité de drainage (Km/Km²).**S** : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);**ΔH** : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);**I_l** : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;**I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.11 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Domaine Bouchikhi (SBV12B)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Domaine Bouchikhi											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L_i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I_l (%)	I_c (%)
	337,9	2,20	271,9	2,33	116,7	1,25	163,4	50	7,00	33,40	11,66

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

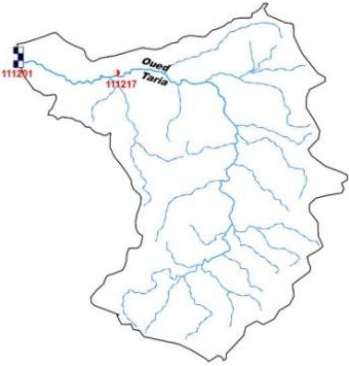
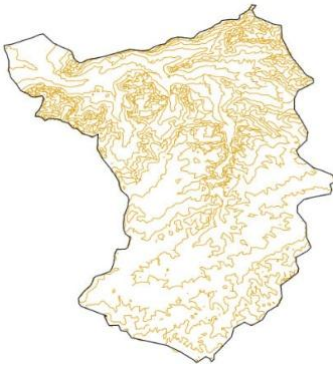
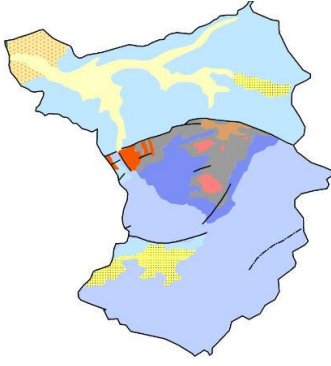
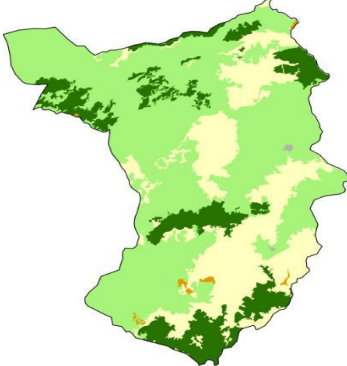
Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.12 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Taria (SBV12C)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Taria											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm ³)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km ²)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	295,6	20,55	3934	2,83	1389,9	1,42	1750	50	9,89	45,40	26,65

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

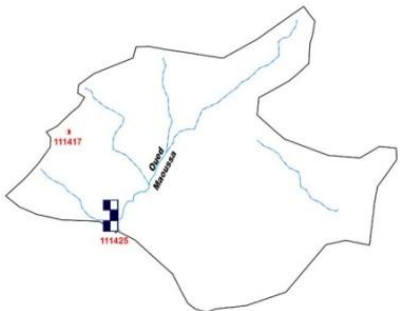
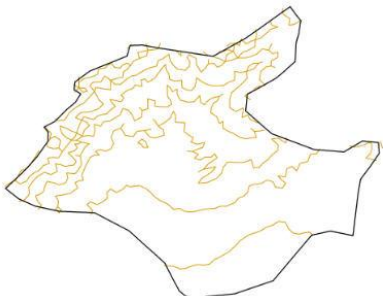
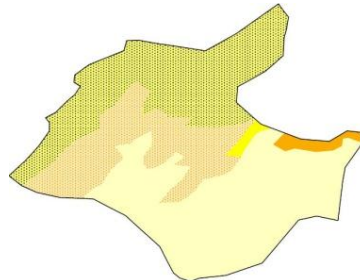

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.13 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Khalouia (SBV14A)

Paramètres Nom SBV	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Khalouia											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	375,4	2,28	185,8	1,65	112,6	1,53	218,4	50	4,97	27,10	3,31

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

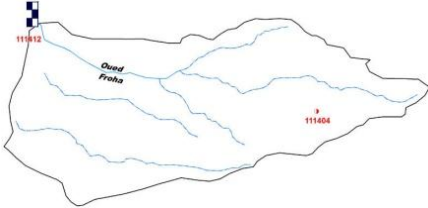
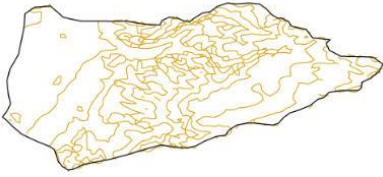
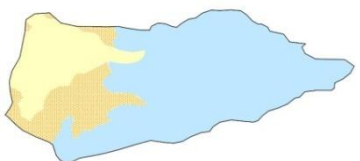
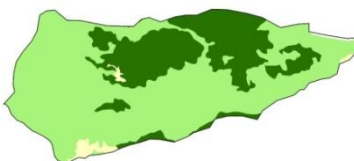
S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

I_c : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.14 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Ghriss (SBV14B)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Ghriss											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	440,3	2,28	299,7	1,50	199,8	1,39	388,4	50	9,72	31,20	1,81

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ;

A : Apport moyen interannuel (Hm³) ;

L_i : Longueur des affluents (Km) ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km²).

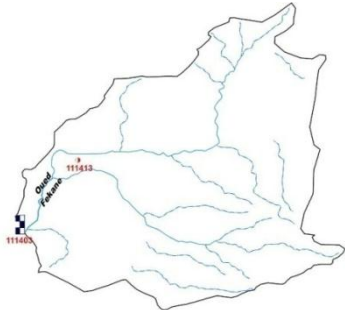
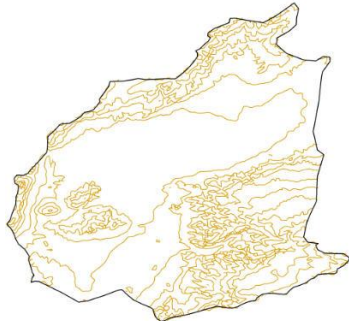
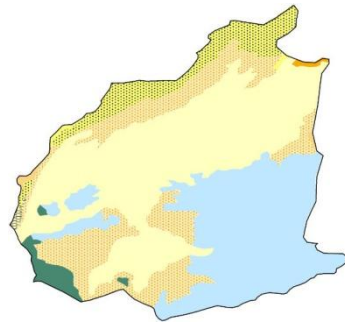
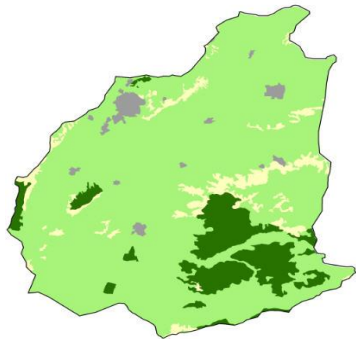
S : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);

ΔH : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);

I_l : Indice lithologique de non perméabilité (%) ;

I_c : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

Tableau VI.15 : Synthèse des différents paramètres caractéristiques du sous bassin versant Ain Fekan (SBV14C)

Paramètres	Climatiques et Hydrographiques				Topographie					Lithologie	Couvert végétal
Nom SBV											
Ain Fekan											
Caractéristiques	P (mm)	A (Hm3)	L _i (Km)	Dd (Km/Km ²)	S (Km2)	Kc	L (Km)	ΔH (m)	Im (%)	I _l (%)	I _c (%)
	344,9	12,68	3410	2,94	1158,7	1,27	1560	50	6,73	44,10	8,17

Avec :

P_{moy} : Pluviométrie moyenne interannuelle (mm) ; **A** : Apport moyen interannuel (Hm³) ;**L_i** : Longueur des affluents (Km) ; **Dd** : Densité de drainage (Km/Km²).**S** : Surface drainée par le sous bassin versant (Km²) ; **Kc** : Indice de forme ; **L** : Longueur totale des courbes de niveaux (Km);**ΔH** : Equidistance entre les courbes de niveaux (m) ; **Im** : Pente moyenne de la zone considérée(%);**I_l** : Indice lithologique de non perméabilité (%) ; **I_c** : Indice de couvert végétal favorable à l'écoulement(%).

VI.3 Analyse en composantes principales des apports liquides

Les facteurs climatiques et physiomorphométriques retenues de chaque sous bassin versant jaugé de la Macta selon le nouveau découpage ont été soumis à une analyse en composante principale pour déterminer les affinités entre les différents sous bassins versants jaugés et déduire les paramètres susceptibles d'influencer l'apport liquide au droit des stations hydrométriques.

Le fichier de données est composé de Huit (08) colonnes (facteurs climatiques et physio-morphométriques) qui sont des variables et Quinze (15) lignes (sous bassins versants jaugés) qui sont des individus. Donc est une matrice de 120 valeurs.

Les variables retenues sont : l'apport moyen interannuel de l'oued (**A**), la surface drainée (**S**), le coefficient de compacité (**Kc**), la densité de drainage (**Dd**), l'indice de pente moyenne (**I_m**), les précipitations moyennes interannuelles (**P**), l'indice lithologique de non perméabilité (**I_l**) et l'indice de couvert végétal (**I_c**) favorable à l'écoulement.

VI.3.1 Résultats de l'ACP

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

- a. Les valeurs propres, pourcentage de variance expliquée, pourcentage cumulé de la variance.

Les résultats sont donnés au tableau VI.16.

Tableau VI.16 : Valeurs propres et variances expliquées

N°	Valeurs propres	Variance (%)	Variance cumulée (%)
CP1	3,94	49,26	49,26
CP2	1,32	16,54	65,80
CP3	1,05	13,13	78,93
CP4	0,85	10,63	89,55
CP5	0,52	6,53	96,08

N.B : Seules les cinq (05) premières valeurs propres ont été présentées dans le tableau VI.16 car le pouvoir explicatif des autres composantes est faibles (moins de 5%).

Les résultats obtenus du tableau IV.16 montrent que la première composante principale accapare à seule presque 50% de la variance totale (**49,3%**) et les deux premières composantes résument presque 2/3 de l'information totale (**65,8%**). Donc ces deux composantes seront retenues avec **49,26%** pour la première et **16,54%** pour la seconde.

b. Matrice de corrélation entre les variables

Le degré de liaison des variables entre elles, notamment avec l'apport liquide est donné au tableau VI.17.

Tableau VI.17 : Matrice de corrélation entre les variables

	A	S	K _C	Dd	Im	Pmoy	I _l	I _c
A	1,00							
S	0,81	1,00						
K _C	0,75	0,80	1,00					
Dd	0,72	0,70	0,31	1,00				
P	0,48	0,48	0,09	0,72	1,00			
Im	0,33	0,17	0,08	0,24	0,00	1,00		
I _l	0,61	0,33	0,18	0,38	0,03	0,21	1,00	
I _c	0,40	0,46	0,37	0,48	0,44	0,11	0,00	1,00

L'analyse de la matrice de corrélation montre qu'il existe une corrélation entre l'apport liquide et l'ensemble des variables explicatives ; l'apport liquide est bien corrélé positivement avec : la surface (S), l'indice de forme (K_C), la densité de drainage (Dd), les précipitations (P), l'indice lithologique (I_l) et l'indice de couvert végétal.

c. Projection des variables sur les axes factoriels

La projection des variables sur les axes factoriels choisis représentés par les composantes principales CP1, CP2, est donnée au tableau VI.18.

Tableau VI.18 : Projection des variables sur les axes factoriels

Variables	CP1	CP2
A	<u>-0,93</u>	0,28
S	<u>-0,91</u>	0,01
K_C	-0,70	0,22
Dd	<u>-0,85</u>	-0,22
P	-0,60	<u>-0,63</u>
I_m	-0,30	0,42
I_l	-0,48	<u>0,61</u>
I_c	-0,60	-0,45

- Projection des variables sur la première composante **CP1**

L'axe factoriel I indiqué par **CP1** représente **49,26%** de la variance total est corrélé négativement avec l'ensemble des caractéristiques étudiées des sous bassins versants. Cet axe factoriel est très bien corrélé avec l'apport liquide (A), à la surface drainée (S), au coefficient de compacité (K_C), à la densité de drainage (Dd), aux précipitations (P) et à l'indice de couvert végétal (I_c). Donc l'axe I détermine les paramètres du drainage.

- Projection des variables sur la deuxième composante **CP2**

L'axe factoriel II indiqué par **CP2** avec **16,54%** de la variance totale, présente une bonne liaison avec l'indice lithologique (I_l) et l'indice de pente (I_m) et une bonne corrélation mais négative avec les précipitations (P).

Aussi le cercle de corrélation (**CP1xCP2**) représentant **65,80%** d'inertie (figure VI.16A), indique que l'axe II a plutôt une signification topographique.

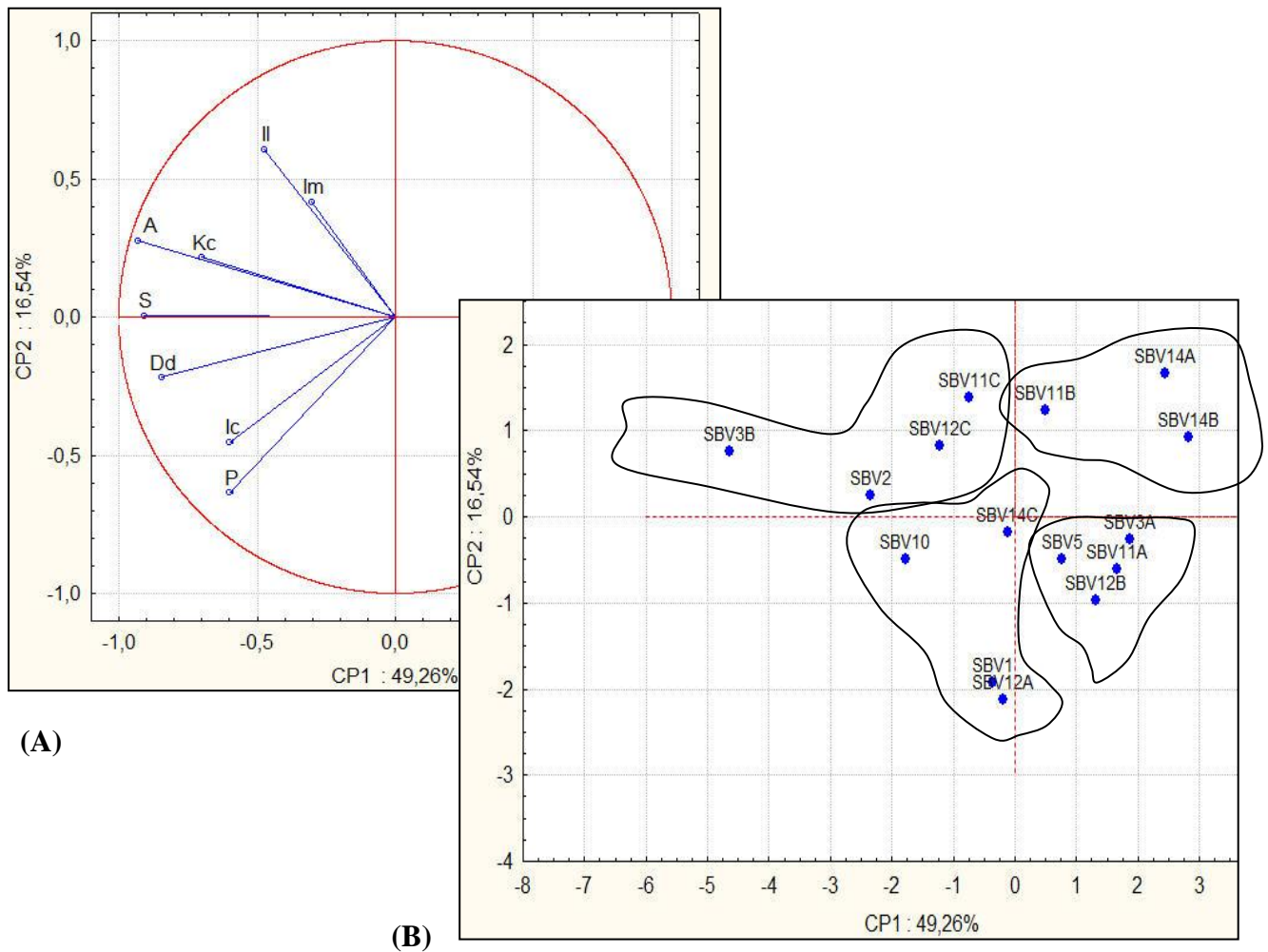


Figure VI.1: Projection des variables et des individus sur les plans (CP1xCP2)

La projection des individus (sous bassins versant jaugés) dans le plan factoriel (CP1xCP2) (figure VI.16B), met en évidence quatre (04) groupes de bassins :

- ❖ Le premier groupe formé par les sous bassins de Mekerra moyen (SBV2), de Mekerra aval (SBV3B), de Saida (SBV11C) et celui de Taria (SBV12C) dont les surfaces drainées et l'apport liquide sont largement supérieures aux autres bassins.
- ❖ Le second groupe est formé par les sous bassins de Saida PK50 (SBV11B), de khalouia (SBV14A) et celui de Ghriss (SBV14B) ; ce sont des bassins de plaines occupants l'Est du bassin versant de la Macta, ayant des surfaces drainées entre 110 Km² et 380 Km² et l'apport liquide entre 02 Hm³ et 10Hm³.

- ❖ Le troisième groupe est représenté par les sous bassins de Sarno amont (SBV3A), de Louza (SBV5), de Saida PN03 (SBV11A) et celui du domaine Bouchikhi (SBV12B), correspondant aux plus faibles apports liquides et surfaces.
- ❖ Le quatrième groupe est formé des sous bassins versants de Mekerra amont (SBV1), de Hounet (SBV10), de Sidi Mimoun (SBV12A) et celui d'Ain Fekan (SBV14C) dont l'apport liquide est de l'ordre de 7Hm^3 à 17Hm^3 .

VI.4 Etude de la relation apport liquide- Géomorphométrie

Après avoir déterminé l'affinité entre les sous bassins versant jaugés de la Macta, une autre analyse statistique a été appliquée, basée sur la régression linéaire multiple afin de définir la relation entre l'apport liquide mesuré au droit des stations hydrométriques et les paramètres climatiques, morphométriques et physiolithogiques de chaque sous bassin versant jaugé.

VI.4.1 La régression linéaire multiple (RLM)

La régression linéaire multiple a pour but d'expliquer une variable dépendante à partir d'un ensemble de variables explicatives indépendantes.

L'acceptation ou le rejet d'une équation de régression est déterminé par :

- ☞ La valeur du coefficient de détermination R^2 ; qu'il soit le meilleur possible.
- ☞ La précision ; l'erreur résiduelle doit être petite que possible par rapport au seuil de signification 5%.

VI.4.1.1 Méthode de régression pas à pas

La méthode de régression linéaire multiple utilisée dans notre cas est du type pas à pas (Stepwise regression method). Cette méthode de régression permet de calculer une série d'équations de régression où à chaque pas une variable est ajoutée ou retranchée selon le critère de R^2 . De plus, elle permet de tester la contribution des variables déjà introduites et de voir si elle est significative compte tenu des nouvelles variables introduites.

Cependant, si le nombre p de variables explicatives est grand, elle conduit à de nombreux calculs. Pour éviter ce long travail, on peut :

- ☞ Soit éliminer la variable qui entraîne la plus faible diminution du coefficient R^2 ; on fait une régression avec $(p - 1)$ variables et on recommence (Veyseyere, 2006).
- ☞ Soit chercher la variable la plus fortement corrélée avec la variable à expliquer puis introduire successivement les variables qui provoquent le plus fort accroissement du coefficient R^2 (Veyseyere, 2006).

VI.4.1.2 Application de la méthode de régression pas à pas

Comme il a été venu de voir dans la matrice de corrélation entre les variables (tableau VI.17), il existe une corrélation entre l'apport liquide et les différentes variables explicatives. La plus forte corrélation est avec la surface drainée (S), le coefficient de forme (K_c), et la densité de drainage (Dd), tandis que la plus faible corrélation est avec l'indice de pente (I_m).

La régression linéaire multiple a été appliquée au sous bassins versants jaugés de la Macta en utilisant le logiciel « **STATISTICA 6.1** ». Après plusieurs tentatives, nous avons abouti aux séries d'équations (Tableau VI.19) où à chaque pas une variable est ajoutée ou retranchée selon le critère de R^2 et le seuil de signification 5% :

Tableau VI.19 : Modèles régressifs obtenus

N°	Rmultiple	P	Modèle obtenu
1	0,57	0,005	$A = 0,38S + 0,84K_c + 0,39Dd + 0,23P + 0,15I_m + 0,4I_l - 0,04I_c$
2	0,72	0,00018	$A = 0,79K_c + 0,45Dd + 0,17P + 0,4I_l$
3	0,64	0,00064	$A = 0,57K_c + 0,52Dd + 0,27P + 0,16I_m$
4	0,90	0,00002	$A = 0,18\sqrt{S} + 0,39Dd + 0,18P + 0,28I_l$

La meilleure régression retenue est le modèle N° 4 avec $R=0,90$

$$A = 0,18\sqrt{S} + 0,39Dd + 0,18P + 0,28I_l \quad (\text{VI.1})$$

Nous remarquons que les variables du modèle N°04 expliquent mieux l'apport liquide avec un coefficient de corrélation multiple élevé ($R=0,90$) par rapport au modèle N°01 qui tient compte de toutes les variables explicatives.

Les coefficients de corrélation partielle des variables explicatives pour chaque modèle sont donnés au tableau IV.20.

Tableau VI.20 : Coefficients de corrélation partielle de chaque modèle

N° modèle	Rmultiple	S	Kc	Dd	P	I _m	I _l	I _c
1	0,57	0,61	0,81	0,74	0,65	0,65	0,89	-
2	0,64	-	0,57	0,52	0,72	-	0,40	-
3	0,72	-	0,67	0,70	0,66	0,35	-	-
4	0,90	0,94	-	0,89	0,81	-	0,71	-

Les résultats du tableau VI.20 montrent clairement que les coefficients de corrélation partielle des variables explicatives du modèle N°04 sont plus élevés par rapports aux autres modèles.

VI.4.1.3 Validation du modèle de régression retenu

La validation du modèle N°04 de régression retenu a été effectuée en utilisant les critères statistiques d'efficacité de R^2 , Nash et RMSE.

Au vue des résultats du tableau VI.21, il apparait que :

- Le coefficient de détermination est significatif au niveau de cinq (05) sous bassins versants ($R^2 > 0,80$). Et acceptable au niveau de quatre (04) sous bassins versants. Alors qu'il est non significatif au reste des sous bassins versants.
- Le critère de Nash est non significatif ($Nash < 0$) pour la majorité des sous bassins (09 sous bassins) et acceptable ($Nash > 0$) au niveau de six (06) sous bassins versants.
- Il existe une certaine concordance entre les valeurs de R^2 et Nash ; ils sont significatifs au niveau de cinq (05) sous bassins versants ($R^2 > 0,80$ et $Nash > 0$). Ces cinq (05) sous bassins versants sont : sous bassin versant de Mekerra amont, de Louza, de Saida PN°03, de Bouchikhi et de Ghriss.

Tableau VI. 21 : Critères de validité du modèle

N°	SBV	Station hydrométrique	Critères d'efficacité	
			R ²	Nash
1	Mekerra amont	110101	0,85	0,01
2	Mekerra moyen	110201	0,79	-0,92
3	Mekerra aval	110301	0,41	-2,09
4	Sarno amont	110302	0,69	0,01
5	Louza	110506	0,87	0,03
6	Hounet	111003	0,52	-0,88
7	Saida PN03	111127	0,80	0,03
8	Saida PK50	111106	0,77	-0,73
9	Saida	111129	0,53	-1,39
10	Sidi Mimoun	111208	0,46	-3,18
11	Bouchikhi	111220	0,86	0,03
12	Taria	111201	0,52	-2,37
13	Ghriss	111425	0,88	0,05
14	Khalouia	111412	0,73	-0,97
15	Fekane	111403	0,44	-5,21

Donc, le modèle global retenu explique mieux les apports liquides au niveau de cinq (05) sous bassins de la Macta.

Conclusion

Le modèle global régressif pour toute la région d'étude est de type : $A = 0,18\sqrt{S} + 0,39Dd + 0,18P + 0,28I_i$, avec un coefficient de corrélation de 0,90.

Le modèle obtenu est fonction de variables explicatives (S, Dd, P et I_i) facilement mesurables. Ce modèle régressif a prouvé son efficacité au niveau de cinq (05) sous bassins versants de la Macta en utilisant les critères de R² et Nash.

Mais, la complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant mérite que dans le cadre d'une étude de bilan, l'on s'interroge sur les facteurs qui influencent significativement la transformation de la pluie en débit.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale & recommandations

Au terme de ce travail, qui s'inscrit dans le domaine de l'évaluation des apports liquides du bassin versant de la Macta, nous pensons avoir fourni une étude synthétique des apports liquides des oueds de la Macta par des analyses et des méthodes de type statistiques 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 :

1. Caractéristiques de la zone d'étude ; Le bassin versant de la Macta est composé de seize (16) sous bassins. Un nouveau découpage à été effectué selon notre objectif en considérant que chaque station hydrométrique représente l'exutoire d'un nouveau sous bassin versant. Donc, seize (16) nouvelles surfaces ont été obtenues. les sous bassins versant de la Macta selon le nouveau découpage possèdent une forme allongée ($K_c > 1$). 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 ($1,5 < D_d < 3,5$). 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.

2. Pluviométrie et écoulement :

Les données pluviométriques et hydrométriques constituent le noyau de base de ce travail dont l'acquisition et la critique des données a été une tâche très longue et fastidieuse. Cette analyse met en évidence :

❖ **Pluviométrie :** l'étude climatique des trois (03) stations climatologiques montre que le bassin versant de la Macta appartient à l'étage bioclimatique semi-aride ($321mm < P < 345mm$) caractérisé par une variabilité des précipitations tant spatiale que temporelle. L'analyse en composantes principales des séries pluviométriques de dix neuf (19) stations pluviométriques 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 durant la période (1972-1985) provoquant une diminution du régime pluviométrique jusqu'à 29 %.

❖ **Apports liquides :** Le climat semi-aride du bassin versant est caractérisé par des écoulements temporaires. L'ensemble des Oueds de la Macta au droit des stations hydrométriques étudiées sont irréguliers ($C_v > 0,5$), à l'exception de l'Oued Mekerra au droit de la station hydrométrique 110201 qui est régulier ($C_v=0,3$). 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. Le maximum de débits liquides est observé en saison de printemps (enregistré par Huit (08) stations hydrométriques). Alors, 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 a montré que tous les oueds ont connu une rupture entre les années 70 et les années 80 produisant une diminution des apports liquides jusqu'à 65,6%, ce qui confirme l'hypothèse formulée quant à la variabilité climatique qui a frappé le Nord-Ouest Algérien en général et le bassin versant de la Macta en particulier.

3. Performance des formules empiriques de calcul des apports liquides

La comparaison des apports liquides des oueds de la Macta calculés par les modèles empiriques les plus utilisés en Algérie et ceux mesurés au droits des stations hydrométriques en utilisant les critères statistiques de R^2 , Nash et RMSE montre que ces modèles ne sont pas adaptés aux sous bassins versants jaugés; ils produisent soit une surestimation ou bien une sous estimation des apports liquides et ne peuvent en aucun cas remplacer les valeurs observées. Donc il faut s'écarter de l'utilisation de ces modèles empiriques.

4. Analyse multidimensionnelle des apports liquides

Sur la base des données climatiques, morphométriques et physio-lithologiques des sous bassins versants jaugés de la Macta, l'analyse en composantes principales effectuée pour déterminer l'affinité entre les sous bassin versant jaugés de la Macta a mis en évidence quatre (04) groupes des sous bassins selon leurs caractéristiques (surface, apport liquide, densité de

drainage...). L'analyse statistique appliquée basée sur la régression linéaire multiple type pas à pas entre l'apport liquide mesuré au droit des stations hydrométriques et les paramètres morphométriques et physiolithologiques de chaque sous bassin versant jaugé a permis de dégager des modèles régressifs liants l'apport liquide aux différents paramètres retenus à savoir : la surface S , le coefficient de forme K_c , la densité de drainage D_d , l'indice de pente I_m et l'indice lithologique de non perméabilité I_l . Le modèle global régressif est de type : $A = 0,18\sqrt{S} + 0,39D_d + 0,18P + 0,28I_l$ avec un coefficient de corrélation ($R^2=0,90$). Il est fonction de variables facilement mesurables.

Dans le souci de préserver la ressource en eau et lui assurer une gestion rationnelle et durable, il est souhaitable de prendre les recommandations suivantes :

- ✓ S'écarter de l'utilisation des formules empiriques de calcul des apports liquides et développer des modèles pluie-débit régionales propre à chaque sous bassins versant de la Macta.
- ✓ Implantation d'un nouveau réseau hydrométrique qui couvre la totalité du bassin versant de la Macta, surtout dans la région centrale du bassin et la partie Nord-Ouest et veiller à améliorer la qualité des données hydrométriques.
- ✓ Réalisation de nouveaux ouvrages de mobilisation des ressources en eau superficielles (petits barrages et retenues collinaires) surtout dans les régions agricoles (les plaines).
- ✓ Encourager les agriculteurs à utiliser la ressource en eau superficielle dans l'irrigation tout en contrôlant sa qualité.

Enfin, il est important de faire un suivi continu de l'évolution spatiotemporelle, tant quantitatif que qualitatif, des différentes composantes hydrologiques du cycle de l'eau et faire aussi une comparaison du changement du cycle de l'eau et les besoins en eau actuels, pour définir la ressource en eau, sous double aspect quantitatif et qualitatif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Achite, M., Touaibia, B. (2007).** Sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant de la Mina, Algérie. Colloque international sur l'eau –Environnement, 30-31 Janvier 2007, Alger, Algérie, 10p.
- Akognongbé, A. (2009).** Analyse hydrologique multi-échelle du bassin de l'Ouémé Supérieur: processus dominants à l'origine des écoulements. Mémoire de Master de recherche. Université de Montpellier, France, 50 p.
- 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 en sciences de l'eau dans l'environnement continental, Université de Montpellier II, France, 116p.
- 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 de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, France, 240 p.
- Baahmed, Dj. (2004).** Estimation du module superficiel des oueds du bassin de la Macta. Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran – Mohamed Boudiaf, Algérie, 170 p.
- Bobée, B. (1978).** Eléments de statistique, Université de Québec, Canada, 159p.
- Bobée, B., Robitaille R. (1976).** Ajustement des distributions Pearson 3, Gamma, Log Pearson 3, Log Gamma, méthodes et programmes de calcul. Rapport scientifique N°70. INRS-Eau, Université de Québec, Canada, 155 p.
- Bobée, B., Des groseilliers L. (1985).** Ajustement des distributions Pearson type 3, Gamma, Gamma généralisée, Log Pearson type 3 et Log gamma, rapport scientifique N°105, INRS-eau. Université de Québec, Canada, 75 p.
- Bois, P.H. (2000).** Hydrologie générale. Ecole nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble, France, 175p.
- Bois, Ph., Obled, Ch., Zin, L. (2007).** Introduction au traitement des données en hydrologie. Institut national polytechnique de Grenoble, France, 265 p.
- 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 Belabbes). ISSN, Vol 43 N° 2, 172-182 pp.
- Boukherouba, K. (2010).** Elaboration d'un modèle stochastique de type Box-Jenkins pour la prédiction simple et filtre de kalman pour la prédiction multi-site des apports des oueds au nord d'Algérie. Thèse de Doctorat, Ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 373 p.

- Brunet-Moret, Y. (1969).** Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie, ORSTOM, série hydrologique, Vol 6 N°03, 89 p.
- Chaponnière, A. (2005).** Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride, Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 179 p.
- CNEA. (2003).** Etude d'aménagement antiérosif du bassin versant oued Bou Seyyala à B'ni Hassen, Tunisie, 17-24 pp.
- Dagnelie, P. (1970).** Théorie et Méthodes Statistiques. Les presses agronomiques de Gembloux, Vol 2, 451 p.
- Debbakh, A. (2012).** Qualité et dynamique des eaux des systèmes lacustre en amont de l'Oued Righ. Mémoire de Magister en hydraulique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 176 p.
- Duband, D. (1982).** Hydrologie statistique approfondie, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 276 p.
- Ducharne, A., Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E., Déqué, M. (2003).** Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, la revue électronique en sciences de l'environnement , Vol 04 N°03, 80-99 pp.
- Ferrer, JP. (1992).** Analyse statistique des pluies maximales journalières, comparaison des différentes méthodes et application au bassin Guadalhorse (Espagne). Journal de l'hydrologie continentale, Vol 7, N°01, 22-31 pp.
- Froget, C. (1979).** La sédimentation au quaternaire terminal dans le golf d'Arzew (Algérie). Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, Vol 30, 41-64 pp.
- GIEC. (2007).** Bilan des changements climatiques: 1 au 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 25 p.
- Gouaidia, L. (2008).** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 215 p.
- 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. (2008).** 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.
- Hamel, A. (2009).** Hydrogéologie des systèmes aquifères en pays montagneux au climat semi-aride : cas de la vallée d'Oued El Abiod (AURES). Mémoire de Magister en hydrogéologie, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 231 p.
- Hebal, A. (2011).** Analyse hydrologique de quelques bassins versants du nord Algérien : eaux superficielles, crues et aménagements. Thèse de Doctorat en sciences de l'eau. Université Saâd Dahlab, Blida, Algérie, 276 p.

- 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*, Vol 110, 349-367 pp.
- 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.
- Khalidi, 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.
- Kotz, S., Johnson , L. M. (1983).** *Encyclopedia of Statistical Sciences*. Wiley, New York, Vol 4, 267-295 pp.
- Laborde, J.P. (2000).** *Eléments d'Hydrologie de surface*. Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 192 p.
- Latron, J., Gallart, F. (2008).** Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Journal of Hydrology*, Vol 04, 206-220 pp.
- MATHE. (2003).** Etude de faisabilité d'une retenue collinaire à Sidi Boutchent, wilaya de Tissemsilt. Mission hydrologique, Bureau d'étude MATHE, Constantine, Algérie, 56 p.
- Meddi, M., Hubert, P. (2003).** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Proceedings of an international symposium held at Montpellier, Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS Publ N° 278, 229-235 pp.
- Meddi, M., Talia, A., Martin C. (2009).** Evolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Revue de géographie physiques*, Vol 3, 61-84 pp.
- Meddi, M., Ben Abbes, A. (2013).** Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie). *Revue de Nature et Technologie*, N°10, 21-31pp.
- Merrien Soukatchoff, V. (2003).** *Hydrologie et hydrogéologie*. Ecole des mines de Nancy, France, 89 p.
- Meylan, P., Musy, A. (1999).** *Hydrologie fréquentielle*. Edition HGA, Bucarest. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 413 p.
- Musy, A., Higy, C. (1998).** *Hydrologie appliquée*, Edition H.G.A. Bucarest. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 365 p.
- OMM. (1994).** *Guide des pratiques hydrologiques*, 5^{ème} édition, OMM N°168. ISBN 92-63-25168-1, 829 p.
- Perreault, L., Bobée, B. (1992).** Loi généralisée des valeurs extrêmes, rapport scientifique N° 350, INRS. Université de Québec, Canada, 60 p.
- Perreault, L., Bobée, B. (1997).** Modélisation des données hydrologiques extrêmes des crues à l'aide des lois de Halphen, rapport scientifique, INRS, 87-106 pp.

- Perreault, L. (2000).** Analyse bayésienne rétrospective d'une rupture dans les séquences de variables aléatoires hydrologiques, Thèse de Doctorat, Université de Québec, Canada, 109 p.
- Pilgrim, D H., Chapman, T G., Doran, D G. (1988).** Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. Journal des Sciences Hydrologiques, Vol 4, 379-400 pp.
- Pitaud, G. (1973).** Etude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée de l'Oued Saida. D.E.M.R.H.
- Remenieras, G. (1976).** Hydrologie de l'ingénieur. Édition Eyrolles. Collection des études et recherches d'électricité de France, 456 p.
- Roche, M. (1963).** Hydrologie de surface, office de la recherche scientifique et technique Outre-mer, Paris, 430 p.
- Sari, A. (2002).** Initiation à l'hydrologie de surface, ISBN.9961-66-636-4, Alger, Algérie, 223p.
- SOGREAH. (1986-1989).** Etude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires et mise au point d'outils de calculs pratique à l'analyse des directions de l'hydraulique des Wilayas, Rapports d'étude N°1 à 31.
- Souadi, Y. (2011).** L'érosion hydrique au Maghreb étude d'un cas: le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale). Thèse de Doctorat, Université du Québec, Canada, 114 p.
- Sourisseau. (1974).** Etude hydrogéologique de la plaine de Ghriss, DEMRH.
- Soro, TD., Soro, N., OGA, Y., Lasm, Th., Soro, G., Ahoussi, K., 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 cote d'ivoire). Journal de géographie physique et environnement, Vol 5, 55-73 pp.
- Szczypta, C. (2012).** Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses au bassin méditerranéen. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 197 p.
- Touaibia, S. (2002).** Elaboration d'un système d'information géographique pour l'étude des ressources en eau souterraines du bassin versant de la Macta. Mémoire de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran, Algérie, 218 p.
- Touaïbia, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. ISBN 9947-0-03367-1, Blida- Algérie, 159 p.
- Veysseyere, R. (2006).** Aide mémoire statistique et probabilité pour l'ingénieur, 2^{ème} édition DUNOD, ISBN 2-10-049994-7, Paris. 475 p.