



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mostafa Benboulaïd BATNA-2-

Institut des sciences de la terre et de l'univers
Département de Géographie et Aménagement du territoire



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCOTRAT EN SCIENCES

Option : Aménagement du territoire

Présentée par :

Mme Belloula Moufida

Thème

Evaluation de l'aptitude aux écoulements et risque
d'érosion dans le haut cours de la Medjerda par
Modélisation

Jury :

Président	: Kalla Mahdi	Professeur	UMB Batna-2-
Rapporteur	: Dridi Hadda	Professeur	UMB Batna-2-
Examineur	: Gettouche M ^{ed} Said	Professeur	USTHB Alger
Examineur	: Boutiba Makhlouf	Professeur	USTHB Alger
Examineur	: Boulamtafes Brahim	Maitre de conférences (A)	USTHB Alger
Examineur	: Brinis Nafaa	Maitre de conférences (A)	UMB Batna-2-

2016-2017

Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années d'études et qui m'ont permis d'en arriver là.

Je remercie ma directrice de thèse **Professeuse Hadda Dridi** de m'avoir encadré, qui a toujours répondu favorablement pour toute sollicitation. Elle m'a réservé des moments précieux de discussion et de conseils et surtout par ses grandes qualités humaines. Sa compétence, son dynamisme m'ont beaucoup aidé et facilité toutes les conditions pour mener à bien ce travail, malgré les difficultés de son état de santé qu'a subi ces deux dernière années. Je suis extrêmement très fière d'avoir travaillé avec elle.

Je tiens tout particulièrement à exprimé ma gratitude et mes remerciements à Monsieur le **Professeur Mahdi Kalla** de m'avoir prêté aide, conseils, son soutien et sa confiance le long de toutes ces années. Je le remercie encor, d'avoir accepté de présider le Jury, je lui en suis très reconnaissante.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse de doctorat.

Je remercie vivement, **Madame Fatima Zohra Tebbi Maitre de conférence (B)** de m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire pour le bon déroulement de ce travail. Je tiens également à la remercier de sa gentillesse, sa grande disponibilité et surtout ces conseils.

Je tiens aussi vivement à remercier **Monsieur Tarek Drias** de m'avoir guidé par ses conseils, sa confiance, sa gentillesse, sa disponibilité pour mener à bien ce travail. Je garderais toujours un bon souvenir très vif de son dynamique et ses grandes qualités humaines.

Mes remerciements vont à tout le personnel administratif de l'Agence Nationale des ressources hydrique (ANRH) d'Alger de Tébessa et aussi de Constantine pour l'aide précieuse qu'il m'ont fournie. Je remercie aussi la subdivision des forêts et l'ONM de Tébessa.

Je n'oublierai sans doute pas de remercier mes collègues et amis enseignants de l'institut des Sciences de la Terre et de l'Univers et surtout mes chers collègues du département de Géographie et Aménagement du Territoire.

A mes très chers parents.

*A Farek mon époux qui, avec son
dévouement et ses sacrifices, ce
travail a pu voir le jour.*

A mes très chers enfants Jyad et Alaa.

A mes frères et ma sœur.

A toutes les familles Belloula et Drias partout dans ce monde.

A mes amies.

*A eux tous je dédie ce travail.
Moufida*

Sommaire

Remerciements	i
Abstract	ii
Résumé	iii
الملخص	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	iiiv
Liste des annexes	vi
Introduction générale	1
Etats des connaissances et choix du terrain	2
Objectifs de l'étude	2
Plan de travail	3
 <i>Première partie : Caractéristiques physiques et facteurs morphométriques du bassin versant de la Medjerda</i>	
Chapitre 1 : Caractéristiques physiques du bassin versant de la Medjerda	
1.1- Introduction	5
1.2- Situation géographique	5
1.3- La topographie	6
1.3.1- La zone de montagne	7
1.3.2- La zone de piedmont	8
1.3.3- La zone de plaine	8
1.4-Géologie et Interaction Hydrologique	10
1.4.1-Cadre générale	10
1.4.2 Les séries litho-stratigraphiques	11
1.4.2.1 Trias	11
1.4.2.2 Jurassique	12
1.4.2.3 Crétacé	12
1.4.2.4 Paléocène	13
1.4.2.5 Eocène	14
1.4.2.6 Miocène	14
1.4.2.7 Pliocène	14
1.4.2.8 Quaternaire	14
1.1-impact de géologie sur l'hydrologie	15
1.7 - L'occupation du sol	16
Conclusion	19
Chapitre 2 : Analyse morphométrique et statistique	
2.1- Introduction	20
2.2- Les caractéristiques géométriques	20
2.2.1- Surface et périmètre du bassin versant	20
2.2.2- Forme du bassin	20
a-Indice de compacité de Gravelus (Kc)	21
2.2.3- Le relief	21
a-Altitudes caractéristiques	22
a.1- Altitude moyenne (\bar{H})	22
2.2.4- Rectangle équivalent	23
2.2.5- La pente et ces indices	24
a- La pente	24

b- Les indices de Pentes	26
b.1- Indice de pente de M.Roche (Ip)	26
b.2- Indice de pente global (Ig)	26
b.3- Dénivelée spécifique (Ds)	27
b.4- Indice de pente moyenne (Im)	28
2.3- Les caractéristiques morphométriques	28
2.3.1- Réseau hydrographique	28
2.3.2- Densité de drainage (Dd)	30
2.3.3- Rapport de confluence (Rc)	30
2.3.4- Rapport de longueur (RI)	30
2.3.5- Coefficient de torrentialité (Ct)	31
2.3.6- Temps de concentration (Tc)	31
2.4 Analyse statistique des données physiographiques	32
2.4 .1 Analyse des variables	34
Conclusion	35

Deuxième partie : Caractéristiques Hydro-Climatique du bassin versant de la Medjerda

Chapitre 3 : Etude climatologique

3.1- Introduction	36
3.2- Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord	36
3.3- Aperçu sur le climat de l'Algérie	36
3.4- Equipement du bassin versant	37
3.4.1- Stations pluviométriques	37
3.4.2- Etude des précipitations	38
3.4.2.1- Homogénéisation des données pluviométriques	38
a- Méthode d'homogénéisation	38
3.4.2.2- Variations spatio-temporelles des précipitations	41
a- Variation mensuelle des précipitations	41
b- Variation saisonnière des précipitations	44
c- Interannuelle des précipitations	48
3.4.2.3- Evaluation de précipitation moyenne sur le bassin	51
a- Moyenne arithmétique	51
b- Méthode des isohyètes	52
3.4.2.4- Analyse statistique des séries pluviométriques	54
a- Ajustement des précipitations annuelles	54
a.1- Test d'adéquation	57
a.2- L'intervalle de confiance	58
a.3- Calcul des précipitations pour des périodes de récurrence donnée	58
b- Analyse statistique des précipitations extrêmes	59
b.1- Ajustement a une loi de Gauss	59
b.2- Test d'adéquation d'une loi théorique	61
b.2.1- Test Kolmogorov-Smirnov	62
b.2.2- Test du Khi 2	62
b.3- Les pluies journalières maximales fréquentielles selon la loi de Gauss	63
3.4.3- Le régime thermique	65
3.4.3.1- Températures moyennes mensuelles	65
3.4.3.2- Relation Température – Précipitation (Diagramme Ombrothermique)	69
3.4.4- Les autres facteurs climatiques	69
3.4.4.1- L'humidité relative de l'air	70
3.4.4.2- La vitesse de vent	70
3.4.4.3- Le rayonnement solaire	71
3.4.4.4- La neige	72
3.4.4.5- Coefficient pluviométrique	72

3.4.5- Détermination des indices climatiques	73
3.4.5.1- Climagramme d'Emberger	73
3.4.5.2- Indice d'aridité de Martonne	74
3.4.5.3- Indice d'aridité mensuelle	75
3.4.6- Le Bilan hydrique	76
3.4.6.1- Etude de l'évapotranspiration	76
a- Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	76
a.1- Estimation de l'ETP par la formule de Thornthwaite	76
a.2- Estimation de l'ETP par la formule de TURC	78
b- Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	80
b.1- Formule de Turc	80
3.4.6.2- Bilan Hydrique selon Thornthwaite	81
a- Estimation des réserves facilement utilisables (RFU)	81
b- Calcul du ruissellement	82
c- Calcul de l'infiltration	83
Conclusion	84

Chapitre 4 : Etude Hydrologique

4.1- Introduction	85
4.2- Stations hydrométriques	85
4.3- Choix de l'année hydrologique	85
4.4- Débits moyens annuels	86
4.4.1- Variations des débits annuels moyens bruts (m ³ /s)	86
4.4.2- Variations des débits annuels moyens spécifiques (l/s/km ²)	88
4.4.3- L'irrégularité inter annuelle des modules	89
4.4.3.1- Coefficient d'immodération (R)	89
4.4.3.2- Coefficient de variation	89
4.4.3.3- L'hydraulicité	90
4.4.4- Ajustement des débits annuels	91
4.4.4.1- Ajustement graphique	91
4.4.4.2- Test d'adéquation d'une loi théorique	92
a-Test Kolmogorov-Smirnov	92
4.5- Modules caractéristiques	93
4.6- Bilan moyen annuel de l'écoulement	93
4.7- Débits moyens mensuels et saisonniers	93
4.7.1- Coefficient mensuel de Débits	94
4.8- Etude des débits extrêmes	96
4.8.1- Les crues	96
4.8.2- Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles	96
4.8.2.1- Méthodologie	97
Conclusion	99

Troisième partie : Modélisation du transport solide et identification des zones vulnérable a l'érosion hydrique

Chapitre 5 : Erosion et Transport Solide

5.1- Introduction	100
5.2- Les principaux agents de l'érosion hydrique	100
5.2.1- Intensité des pluies	100
5.2.2- Ruissellement	102
5.2.3- L'infiltration	103
5.2.4- Erodibilité des sols	103

5.2.5- Le couvert végétal	103
5.2.6- Pente et longueur de pente	104
5.2.7- Etat hydrique initial	105
5.3- Les différentes formes de l'érosion	106
5.3.1- Erosion en nappe	106
5.3.2- Erosion par ravinement	106
5.3.3- Erosion par sapement des berges	106
5.4- Transport solide	107
5.4.1- Quelques données sur le transport solide en Algérie	107
5.5- Quantification de l'érosion hydrique	108
5.5.1- Formule de Wischmeier et Smith (1978)	108
5.5.2- Modèle de Fournier (1960)	109
5.5.3- Modèle de Tixeront (1960)	109
5.5.4- Modèle de la Sogreah	109
5.6- Dégradation spécifique	110
5.7- Caractérisation du transport solide	110
5.7.1- Principaux travaux sur le transport solide en Algérie	111
5.7.2- Modélisation statistique de sédiments en suspension	112
5.7.3- Théorie des principaux modèles existants	113
a- Ligne tracée à l'œil	113
b-Le modèle linéaire	113
c-Le modèle logarithmique	113
d-Le modèle polynomiale	114
e-Le modèle exponentiel	114
f-Le modèle en puissance	114
5.7.4-Mesure de la matière en suspension	115
5.7.5-Elaboration du modèle	115
5.7.6-Validité du modèle	117
5.7.7-Données Hydrologiques	117
5.7.7.1-Traitement de données	117
a-Homogénéité et stationnarité	118
b-Indépendance et stationnarité	119
5.7.8-Application de la courbe de tarage en sédiments pour le bassin versant de la Medjerda	119
5.7.9-Résultats et discussion	119
5.7.9.1 Modèle « SRC » n'a pas Saisonnier	120
5.7.9.2-Modèle « SRC » a pas interannuel	123
5.7.10-Calcul du débit solide et de la dégradation spécifique	124
5.7.10.1-Débit solide (Q_s)	124
5.7.10.2-Dégradation spécifique (D_s)	125
Conclusion	126

Chapitre 6 : Cartographie de l'aléa l'érosion

6.1 Introduction	127
6.2 Analyse multicritère	127
6.3 Analytical Hierarchy Process (AHP)	128
6.4 Méthodologie	131
6.5 Les Eléments Du Modèle	133
6.5.1 L'érodibilité des sols	133
6.5.2 Le facteur topographique pente	135
6.5.3 Les précipitations	136
6.5.4 L'occupation du sol	138
6.5.4.1 Influence du couvert végétal sur l'érosion	139
6.6 Calcul du ratio cohérence (RC)	142
6.7 Résultat et Discussion	144

Conclusion	145
Conclusion générale	146
Références bibliographiques	151
Annexes	

Résumé

La présente étude tente de quantifier l'érosion et les transports solides en suspension dans le bassin versant de la Medjerda situé au Nord-est de l'Algérie, sur une période d'observation moyenne de 34 ans. Les conditions ayant favorisé l'érosion de chaque milieu physique : topographique, lithologique, l'occupation des sols, climatique et hydrologiques sont identifiées, évaluées et interprétées en se basant sur l'analyse quantitative.

Le transport solide en suspension des débits prélevés a été calculé en utilisant les concentrations estimées à partir d'une analyse de régression. Alors une tentative de subdivision de l'ensemble des individus en concentrations moyennes journalières et débits liquides moyens journaliers a été réalisée en utilisant la méthode des classes des débits et ce afin d'établir les courbes de transport solide.

La dégradation spécifique moyenne annuelle et remarquable au niveau du bassin versant de Mellegue avec (739.22 t/km²/an), par contre celles estimées dans les deux bassins Medjerda et Chabro sont respectivement (321.17 t/km²/an et 631.61 t/km²/an).

La détermination des relations entre les flux sédimentaires et les paramètres physico-climatiques et hydrologiques s'est basée sur la relation liant les débits liquides (paramètre d'écoulement) et la concentration en sédiments. Les résultats ont montré par la suite que la dégradation spécifique est reliée à d'autres paramètres physiques.

Suite aux conditions naturelles et l'impact humain, il est nécessaire d'évaluer spatialement et quantitativement les effets de l'érosion des sols. L'application de l'analyse multicritère (AHP) nous a permis d'identifier les zones vulnérables à l'érosion du sol en s'appuyant sur les classes d'érodibilité des sols, pente, l'intensité des pluies et l'occupation du sol. Par conséquent, le ratio de cohérence (CR) estimé est important ce qui nous donne un avantage d'appliquer cette méthode pour la détermination de la vulnérabilité à l'érosion.

Mots clés: Bassin versant, Medjerda, quantification, transport solide, Erosion, AHP, vulnérabilité.

Abstract

The present study attempts to quantify the erosion and the suspended sediment yield in the Medjerda catchment in northeastern Algeria, over a period of 34 years. The conditions that have favored the erosion of every physical landform topography, lithology, land use, climatic and hydrological are identified, evaluated and interpreted on the basis of quantitative analysis.

The suspended sediment yield of the recorded storm events has been calculated using other estimated sediment concentrations from the regression analysis of the study storm events. Then a tentative has been used by dividing the set of individuals into mean daily sediment concentration and mean daily water discharge using the method of discharge classes and that to construct sediment rating curves.

The average annual degradation observed in the Mellegue catchment area with (739.22 t / km² / year) compared with those estimated in the two Medjerda and Chabro catchment is 321.17 t / km² / year and 631.61 t / km² / year).

The determination of the operating relationships between sediment flows and physico-climatic and hydrological parameters is based on the relationship between liquid flow rates (flow parameter) and concentration. These relationships have subsequently shown that the specific degradation is connected by other physical parameters.

Due to natural conditions and human impact, it is necessary to evaluate spatially and quantitatively the effects of soil erosion. The application of multicriteria analysis (AHP) allowed us to identify areas vulnerable to soil erosion based on soil erodibility classes, slope, rainfall intensity and occupation of the ground. Therefore, the estimated coherence ratio (CR) is important which gives us an advantage. To apply this method for determining vulnerability to erosion.

Key words: Catchment, Medjerda, quantification, solid transport, Erosion, AHP, vulnerability.

ملخص

لقد تضمنت الدراسة الحالية تقييم التعرية العشائية للأراضي و كذلك حساب انتقالات المواد الصلبة المتعلقة الناتجة على مستوى الحوض التجميحي لمجردى الموجود في الشمال الشرقي الجزائري على مدى 34 سنة من الملاحظات. العوامل التي أخذت بعين الاعتبار و التي أدت إلى تدعيم ظاهرة التعرية العشائية للوسط الفيزيائي تتلخص في : الارتفاعات , نوعية الصخور , الغطاء النباتي و الشروط المناخية و الهيدرولوجية , المناطق التي تكتسب طاقة كبيرة لإنتاج المواد الصلبة، قد عرفت و تم تفسير ظواهرها عن طريق الدراسة الحسابية.

إن انتقال الرواسب المعلقة و الناتجة عن ارتفاعات كمية المياه المسجلة قد عدت باستعمال التركيزات المحسوبة بالطرق الارتدادية للمنحنيات , بالنسبة للارتفاعات المائية التي لا تكتسب قياسات.

لقد تمت محاولة تقسيم مجموعة من المعطيات المتعلقة بالتركيزات و الكميات المائية المعدلية و اليومية باستعمال طريقة الصفوف بهدف استخراج المنحنيات الخاصة للمصارف الصلبة.

إن متوسط تدهور التربة السنوي جد ملحوظ في حوض ملاق بمعدل 739.22 طن/كم²/سنة. أما بالنسبة لحوضي مجردى و شبر و متوسط التدهور قدر على التوالي 321.17 طن/كم²/سنة و 631.61 طن/كم²/سنة.

إن تحديد العلاقات العامة و الوظيفة الهيدرولوجية بين الاندفاع الرسوبي و الثوابت الفيزيومناخية و الهيدرولوجية قد تمت على أساس علاقات بين المصرف المائي الصلب و عوامل السيلان و مياه الأمطار و كذلك علاقات بين المصرف المائي و التركيزات الرسوبية.

نظرا للظروف الطبيعية و تأثير الإنسان على الوسط، لابد من التقييم المجالي و الإحصائي المتعدد المعايير التحليل (AHP) ، سمح لنا بتحديد المناطق المعرضة و المهددة بالتعرية مستعينين بأقسام الفئات : حساسية التربة ، الانحدار ، للتعرية. و عليه تطبيق شدة التساقطات ، و بالتالي نسبة التناسق المتحصل عليها لها أهمية كبيرة مما يسمح لنا بتطبيق هذه الطريقة لتحديد المناطق الحساسة للتعرية.

الكلمات المفتاحية: الحوض التجميحي ، مجردى ، التقييم الكمي ، النقل الصلب ، التعرية ، (PHA) ، حساسية المنطقة.

Liste de Figures

Fig n°1 : Carte de situation géographique du bassin versant de la Medjerda	6
Fig n°2: Carte hypsométrique du Bassin Versant de la Medjerda	7
Fig n°3 : Profils topographique (Bassin versant de la Medjerda)	9
Fig n°4 : Carte géologique de la Medjerda (Lafitte 1/200.000)	11
Fig n°5 : Carte lithologique du bassin versant de la Medjerda	15
Fig n°6 : Carte de perméabilité du bassin versant de la Medjerda	16
Fig n°7 : Carte du couvert végétal dans le bassin versant de la Medjerda	17
Fig n°8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la Medjerda	22
Fig n°9 : Le rectangle équivalent	24
Fig n°10 : Carte des pentes du Bassin Versant de la Medjerda	25
Fig n°11 : Carte du réseau hydrographique du Bassin Versant de la Medjerda	29
Fig n°12 : Longueur des principaux oueds dans le bassin versant de la Medjerda	29
Fig n°13 : Le graphique des valeurs propres	33
Fig n° 14: Résultats de l'analyse en composantes principales	34
Fig n°15 : Régression linéaire à l'échelle annuelle des précipitations (différentes stations)	40
Fig n°16a : Précipitations moyennes mensuelles dans le Bassin versant de la Medjerda	42
Fig n°16b : Précipitations moyennes mensuelles dans le Bassin versant de la Medjerda	43
Fig n°17a : Variation saisonnière des précipitations dans le bassin versant de la Medjerda	45
Fig n°17b : Variation saisonnière des précipitations dans le bassin versant de la Medjerda	46
Fig n°18a : Répartition saisonnière des précipitations du bassin versant de la Medjerda	47
Fig n°18b : Répartition saisonnière des précipitations du bassin versant de la Medjerda	48
Fig n°19a : Variation interannuelle des précipitations bassin versant de la Medjerda	49
Fig n°19b : Variation interannuelle des précipitations bassin versant de la Medjerda	50
Fig n°20: Précipitations moyennes annuelles des différentes stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda	52
Fig n°21: Carte des isohyète du Bassin Versant de la Medjerda	53
Fig n°22a : Ajustement des précipitations moyennes annuelles des différentes stations de la Medjerda (1969-2014)	55
Fig n°22b : Ajustement des précipitations moyennes annuelles des différentes stations de la Medjerda (1969-2014)	56
Fig n°23a : Ajustement des pluies journalières maximal des différentes stations de la Medjerda (1969-2014)	60
Fig n°23b : Ajustement des pluies journalières maximal des différentes stations de la Medjerda (1969-2014)	61
Fig n°24 : Températures moyennes mensuelles à la station de Tébessa (1972/2014)	65
Fig n°25 : Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (1972/2014)	66
Fig n°26 : Températures moyennes mensuelles à la station de Souk Ahras (1972/2014)	66
Fig n°27 : Températures moyennes interannuelles à la station de Souk Ahras (1972/2014)	67
Fig n°28 : Histogrammes des températures à la station de Tébessa	67
Fig n°29 : Histogrammes des températures à la station de Souk Ahras	68
Fig n°30 : Diagramme Ombrothermique station Tébessa (1972/2014)	69
Fig n°31 : Diagramme Ombrothermique station Souk Ahras (1972/2014)	69
Fig n°32 : Humidité relative moyenne mensuelle (%) station de Tébessa	70
Fig n°33 : Vitesse du vent moyen mensuel (m/s) station de Tébessa	71
Fig n°34 : Insolation moyenne mensuelle (%) station de Tébessa	71
Fig n°35 : Climagramme d'EMBERGER	74
Fig n°36: Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923	75
Fig n°37: Evolution de l'ETP (mm) de Thornthwaite à la station de Souk Ahras	77
Fig n°38: Evolution de l'ETP (mm) de Thornthwaite à la station de Tébessa	78
Fig n°39a : Evolution de l'ETP (mm) de TURC à la station de Souk Ahras	79
Fig n°39b : Evolution de l'ETP (mm) de TURC à la station de Tébessa	80
Fig n°40 : Variation interannuelle des débits moyens annuels des différentes stations (1972/2010)	88
Fig n°41 : Ajustement des débits moyens annuels d'oued Medjerda à une loi log-normale (différentes stations de la Medjerda 1972-2010)	92
Fig n°42 : Variations des débits moyens mensuels des différents oueds de la Medjerda	95
Fig n°43: Ajustement graphique des séries des débits maximums du bassin versant de la Medjerda	98
Fig n°44 : Schéma du modèle proposé	116
Fig n°45 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour la station	120

de Souk Ahras

Fig n°46 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour la station d'Ouenza	121
Fig n°47 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour la station de Morsott	122
Fig n°48 : Modèles annuelles reliant les débits solides aux débits liquides pour les différentes stations du bassin versant de la Medjerda	123
Fig n°49 : Carte d'érodibilité du sol du bassin versant de la Medjerda	134
Fig n°50 : Carte des classes de pentes du bassin versant de la Medjerda	136
Fig n°51 : Carte de l'intensité des pluies dans le bassin versant de la Medjerda	138
Fig n°52 : Carte d'occupation du sol	139
Fig n°53 : Diachronologie du couvert végétal naturel	140
Fig n°54 : Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Medjerda	143

Liste des Tableaux

Tabl n°1 : Répartition des superficies forestières par commune et par type en (Ha)	18
Tabl n°2 : La répartition altimétriques du bassin versant de la Medjerda	21
Tabl n°3 : Altitudes caractéristiques du bassin versant de la Medjerda	22
Tabl n°4: Calcul des largeurs des intervalles	23
Tabl n°5 : Classification des pentes selon GRECO	25
Tabl n°6 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM	27
Tabl n°7: Classification du relief selon Ds	27
Tabl n°8: Récapitulation des paramètres du bassin versant de la Medjerda	32
Tabl n°9 : Valeurs propres	33
Tabl n°10: Matrice de corrélation des variables (bassins versants)	33
Tabl n°11 : Caractéristiques des postes pluviométriques du bassin versant de la Medjerda	37
Tabl n°12 : Précipitations moyennes mensuelles période (1969-2014)	41
Tabl n°13: Variations saisonnières des précipitations dans le bassin de la Medjerda	44
Tabl n°14 : caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda	49
Tabl n°15 : Caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda	51
Tabl n°16: Caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda (méthode isohyète)	52
Tabl n°17 : Paramètres empiriques	54
Tabl n°18: Résultat de calcul du χ^2 pour les différentes stations	57
Tabl n°19: Intervalle de confiance pour les différentes stations du Bassin versant	58
Tabl n°20 : Valeurs des précipitations pour des périodes de récurrences données	59
Tabl n°21: Les équations d'ajustement d'une loi normal (Gauss)	60
Tabl n°22: Test d'adéquation (Kolmogorov-Smirnov)	62
Tabl n°23a: Résultat de calcul du χ^2 pour la station de Souk Ahras	62
Tabl n°23b: Résultat de calcul du χ^2 pour la station de Ouenza	62
Tabl n°23c : Résultat de calcul du χ^2 pour la station de Ain Zarga	63
Tabl n°23d: Test d'adéquation (Khi 2)	63
Tabl n°24a: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Souk Ahras	63
Tabl n°24b: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ouenza	63
Tabl n°24c : Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Meskiana	63
Tabl n°24d: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Tébéssa	64
Tabl n°24e: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ain Kissa	64
Tabl n°24f: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ain Dhalaa	64
Tabl n°24h: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Hammamet	64
Tabl n°24i: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ain Zerga	64
Tabl n°24g : Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Morsott	64
Tabl n°24k: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ruines de Khemissa	64
Tabl n°24l: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station M'Daourouche	64
Tabl n°25 : Coordonnées des stations météorologiques dans le bassin versant de la Medjerda	65
Tabl n°26 : Températures Moyennes mensuelle dans la station de Tébéssa (1972-2014)	65
Tabl n°27 : Températures Moyennes mensuelle dans la station de Souk Ahras (1972-2014)	66
Tabl n°28 : Température moyenne mensuelle ($^{\circ}$ C) à la station de Tébéssa (1972-2014)	67
Tabl n°29 : Température moyenne mensuelle ($^{\circ}$ C) à la station de Souk Ahras (1972-2014)	68
Tabl n°30: L'humidité relative de l'air (%) à la station de Tébéssa (1985-2013)	70
Tabl n°31: La vitesse moyenne du vent (m/s) à la station de Tébéssa (1985-2013)	70
Tabl n°32 : Insolation moyenne (h/j) Station de Tébéssa (1985-2013)	71
Tabl n°33 : Coefficient pluviométrique station Souk-Ahras (1969-2014)	72
Tabl n°34 : Coefficient pluviométrique station Tébéssa (1969-2014)	73
Tabl n°35 : Indice d'aridité mensuel (Tébéssa)	75
Tabl n°36 : Indice d'aridité mensuel (Souk Ahras)	75

Tabl n°37 : Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la station de Souk Ahras	77
Tabl n°38 : Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la station de Tébessa	77
Tabl n°39a : Calcul de l'ETP selon la formule de TURC à la station de Souk Ahras	79
Tabl n°39b : Calcul de l'ETP selon la formule de TURC à la station de Tébessa	79
Tabl n°40 : Estimation d'ETR d'après Turc	81
Tabl n°41a : Bilan hydrique de Thornthwaite à la Station de Tébessa	81
Tabl n°41b: Bilan hydrique de Thornthwaite à la Station de Souk Ahras	82
Tabl n°42: Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin versant de la Medjerda	85
Tabl n°43 : Variations des débits moyens annuels, Débits spécifiques (Medjerda-Algérie)	87
Tabl n°44: Débits spécifiques et lames d'eau écoulées	88
Tabl n°45 : valeurs caractéristiques des modules au niveau des bassins versants	89
Tabl n°46 : Hydraulicité des différentes stations de la Medjerda	90
Tabl n°47 : Les paramètres empiriques (loi log normal (Galton))	91
Tabl n°48: Test d'adéquation (Kolmogorov-Smirnov)	92
Tabl n°49: Modules caractéristiques en (m ³ /s) pour les périodes de récurrence	93
Tabl n°50 : Bilans moyens annuels de l'écoulement des différentes stations	93
Tabl n°51 : Répartition des débits mensuels des différents bassin versant	94
Tabl n°52: Ajustement des séries des débits maximums instantanés correspondant aux différents bassins étudiés	97
Tabl n°53 : Estimation des Quantiles de crue des différents oueds	98
Tab n°54 : Valeurs de α pour différentes perméabilités	109
Tab n°55: Valeurs de la dégradation spécifique (estimation par différents formule empirique)	110
Tab n°56 : Modèle utilisé	113
Tab n°57 : Caractéristiques des stations hydrométriques	117
Tab n°58 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » saisonnier pour la station Souk Ahras	120
Tab n°59 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » saisonnier pour la station Ouenza	121
Tab n°60 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » saisonnier pour la station Morsott	122
Tab n°61 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » interannuel pour les différentes stations du Bassin Versant de la Medjerda	123
Tab n°62a : Résultats des débits solide à différentes échelles (Station Souk Ahras)	124
Tab n°62b : Résultats de débits solide à différentes échelles (Station Ouenza)	124
Tab n°62c : Résultats de débits solide à différentes échelles (Station Morsott)	124
Tab n°63: Résultats de la dégradation spécifique (E_s).	125
Tabl n° 64 : Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre	129
Tabl n° 65: détermination du degré de l'importance des facteurs par échelle d'après par SAATY (1991)	131
Tabl n° 66 : Valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice	131
Tabl n°67 : Matrice de comparaison	133
Tabl n° 68: Calcul de la pondération du critère (érodibilité du sol)	134
Tabl n° 69 : Calcul du rapport de cohérence (CR)	134
Tabl n°70 : Nature et contribution des classes de pente	135
Tabl n° 71 : Matrice de comparaison	135
Tabl n°72 : Calcul de la pondération du critère pente	135
Tabl n°73 : Calcul du rapport de cohérence (CR)	136
Tabl n°74 : Nature et contribution des classes de pluies	137
Tabl n°75 : Matrice de comparaison	137
Tabl n°76 : Calcul de la pondération du critère pluies	137
Tabl n° 77 : Calcul du rapport de cohérence (CR)	137
Tabl n°78 : Nature et contribution des classes d'occupation du sol	141
Tabl n° 79 : Matrice de comparaison	141
Tabl n°80 : Calcul de la pondération du critère occupation du sol	141
Tabl n° 81 : Calcul du rapport de cohérence (CR)	141

Tabl n° 82 : Matrice de comparaison d'après Marinoni (2004)	142
Tabl n°83 : Détermination du poids de chaque critère	142
Tabl n° 84 : Indices aléatoires pour les matrices de différentes tailles Saaty et Vargas (1991)	142
Tabl n° 85 : Calcul du rapport de cohérence (CR)	143

Liste des Annexes

- Annexe n° 1** : *Caractéristiques de forme des unités hydrologiques de la Medjerda..*
- Annexe n° 2a**: *Caractéristiques topographiques du bassin versant de Medjerda (Souk Ahras).*
- Annexe n° 2b** : *Caractéristiques topographiques du bassin versant de Mellegue Amont.*
- Annexe n° 2c** : *Caractéristiques topographiques du bassin versant de Meskiana..*
- Annexe n° 2d** : *Caractéristiques topographiques du bassin versant de Chabro (Tébessa).*
- Annexe n° 2e** : *Caractéristiques topographiques du bassin versant de Mellegue Aval.*
- Annexe n° 3** : *Altitudes caractéristiques des bassins versant de la Medjerda.*
- Annexe n° 4** : *Carte et indices de Pentés.*
- Annexe n° 5** : *Classification du relief selon l'ORSTOM..*
- Annexe n° 6** : *Classification des pentes Comité de l'Union Internationale des Géographes.*
- Annexe n° 7** : *Réseau hydrographique des différents sous bassin versant de la Medjerda.*
- Annexe n° 8** : *Caractéristiques morphométrique.*
- Annexe n° 9a** : *Critique des données pluviométriques par la méthode des doubles cumuls.*
- Annexe n° 9b**: *Critique des données pluviométriques par la méthode des doubles cumuls.*
- Annexe n° 10** : *Cartes des isohyètes des BV de la Medjerda.*
- Annexe n° 11a**: *Diagnostic de la régression (Station de Souk Ahras).*
- Annexe n° 11b**: *Diagnostic de la régression (Station de Souk Ahras).*
- Annexe n° 11c**: *Diagnostic de la régression (Station de Souk Ahras).*
- Annexe n° 12a**: *Diagnostic de la régression (Station Ouenza).*
- Annexe n° 12b**: *Diagnostic de la régression (Station d'Ouenza).*
- Annexe n° 12c**: *Diagnostic de la régression (Station d'Ouenza).*
- Annexe n° 13a**: *Diagnostic de la régression (Station de Morsott).*
- Annexe n° 13b**: *Diagnostic de la régression (Station de Morsott).*
- Annexe n° 13c** : *Diagnostic de la régression (Station de Morsott).*
- Annexe n° 14a** : *Carte d'occupation du bassin versant de la Medjerda année 1987.*
- Annexe n° 14b** : *Carte d'occupation du bassin versant Medjerda année 2009.*
- Annexe n° 14c** : *Carte d'occupation du bassin versant Medjerda année 2016.*

Introduction générale

Introduction générale

L'eau joue un rôle majeur dans le développement et à la vie des êtres humains. Il occupe près de 70% de la terre, 2,5 % seulement de cette eau est douce et les deux tiers sont bloqués sous forme de glaciers situés dans les régions polaires (*Simonovic 2009, Jacques, 1996*). La répartition quantitative de l'eau à l'échelle du globe est très hétérogène et la rareté de l'eau douce et sa répartition irrégulière deviennent de plus en plus une question politique conflictuelle entre de nombreux pays. En revanche la variabilité de sa disponibilité, sa qualité et sa quantité est une source de plusieurs problèmes tel que l'érosion du sol.

A l'échelle mondiale, l'érosion du sol reste toujours le plus grand problème de l'environnement, menaçant non seulement les pays développés et plus les pays en développement, 30% à l'érosion éolienne et 56% de ces pertes sont attribuables à l'érosion hydrique (*FAO. 1994*). Cette dernière et très répandue en Algérie dont elle menace les potentialités en eau et en sol. Les particules solides libérées sont entraînées par les eaux de ruissellement vers les courts d'eau, les barrages et aussi les retenues...ect. Ainsi les matériaux transportés en suspension ou par charriage peuvent être quantifiés.

Au sein du cycle hydrologique. Les précipitations sont les principaux agents de mobilisation des particules et génèrent le ruissellement qui en assure le transport des matières en suspension (*Lienou et al 2003*). Cependant, le couvert végétal, a une influence très importante sur le milieu, en protégeant les sols contre plusieurs problèmes diversifiés. Il joue un rôle essentiel sur le cycle hydrologique et le transport de matière. Les sédiments ainsi érodés, riches en éléments fertilisants, se déposent à différents espaces, en raison de la diminution de la vitesse de l'agent de transport Diallo 2000. Par conséquent ces phénomènes provoquent la disparition des terres fertiles. Par exemple, chaque hectare de terrain perd en moyenne 7,1 tonnes de terre par an en Afrique, 7 tonnes en Amérique du Sud, 6,1 tonnes en Asie, 4,5 tonnes en Amérique du Nord et Centrale et 8,4 tonnes pour l'Europe (*Solter 1992*). De part leur position géographique, situés en zones arides à semi-arides, trois pays du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie) ont depuis des millénaires eu une évolution fortement liée au climat et à sa variabilité. Ce climat se caractérise par des contrastes importants avec des types de climats très différents et ce en relation avec les particularités géographiques et écologiques de cette région (*Agoumi 2003*). Les données climatiques relevées dans la région durant le 20^{ème} siècle indiquent un réchauffement d'environ de 1°C, avec une tendance accentuée durant les 40 dernières années (*Agoumi 2003*). Ces données montrent aussi une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations et une variabilité marquée dans les régimes d'écoulement.

Pour appréhender de manière assez fine tous ces mécanismes et processus, apparaît la nécessité d'élaborer des modèles simples faciles à implémenter et restituant au mieux la réalité du terrain.

Etats des connaissances et choix du terrain :

Situé au Nord-Est de l'Algérie et faisant partie des bassins méditerranéenne le bassin versant de la Medjerda totalise une superficie de 7877 km². Il est caractérisé par un climat de type semi-aride, chaud en été et froid et sec en hiver. Les irrégularités sévères des précipitations dans le temps et dans l'espace ont engendrés des averses fréquentes et importantes ayant une efficacité élevée en transport solide. La fragilité du milieu, traduisant une action érosive et un transport des sédiments en suspension provoqué par des averses sur des sols secs et peu protégés, par conséquent le bassin versant de la Medjerda abrite des zones vulnérables à l'érosion des sols. De nombreux chercheurs ont tenté d'expliquer les mécanismes de ce dernier et de les quantifier. On notera les travaux de : (*Demmak 1982, Ghachi 1982, Bourouba 2003, Terfous 2001 et 2003, Meddi 1999 et 2004....ect*). Cependant le manque des données constitue un handicap majeur dans l'estimation et la prévision des transports solides, cet état nous a conduits à proposer un modèle de prévision.

Toutefois, une grande partie des travaux sur la dégradation spécifique a été effectuée à partir des méthodes empiriques qui donnent une estimation de l'érosion qui s'avère en réalité surestimées ou sous-estimées, aspect que nous nous emploierons à montrer entre autres dans le cadre de cette thèse. Ces formules empiriques ont été utilisées par plusieurs chercheurs (*Fournier, Tixeront....ect*) pour quantifier l'érosion (*Khanchoul 2006*). Ces formules impliquent des paramètres explicatifs sous forme de relations sans tenir compte des processus et des récurrences spatiales et temporelles qui régissent le fonctionnement hydro-sédimentaire.

Objectifs de l'étude :

A cet égard, notre travail s'appuie sur deux objectifs principaux :

- Nous avons opté pour une modélisation quantitative basé sur un classement des modèles hydrologiques conceptuels globaux des modalités de l'écoulement, du régime hydrologique et la dynamique au transport des sédiments en suspension afin de déterminer les ressources en eau superficielles, leur variabilité spatio-temporelle, ainsi que l'action de l'eau dans un bassin versant a climat semi-aride. Ces modèles permettant d'améliorer progressivement les performances de ces derniers et ne nécessitent pas une description fine du bassin versant.

Les variables d'entrée sont limitées aux séries de pluies et des débits, donc l'objectif visé ici est de déterminer pour le bassin versant de la Medjerda les paramètres du modèle qui seront considérés comme ceux relatifs à son fonctionnement.

- Le deuxième objectif est de parvenir à un zonage d'une spatialisation de la sensibilité des sols à l'érosion à l'échelle locale, du bassin versant de la Medjerda afin d'étudier le processus d'érosion et d'en évaluer l'impact potentiel sur les zones semi-aride. Pour ce faire, on a choisi une modélisation qualitative qui est basé sur une analyse multicritères (AHP) combinant les facteurs qui déclenchent le phénomène de l'érosion, les plus représentatifs sont : lithologiques (indice d'érodibilité), topographiques (la pente), climatiques (l'intensité des pluies) et aussi l'occupation du sol. Ce choix est fait en nous appuyant sur plusieurs études sur l'érosion des sols tel que les travaux : (*Mazour 2004, Morsli et al 2004, Roose et al 1996, Talbi et al 2002..ect*).

En effet, les précipitations constituent l'élément climatique essentiel, leur variabilité spatio-temporelle aussi bien annuelle que mensuelle. Tendent que les probabilités d'occurrence des précipitations de fortes intensités sont également réparties spatialement dans le bassin, provoquant des dégâts érosifs importants par conséquent pour la zone d'étude, les versants nord sont plus arrosés que les versants sud, les pluies maximales journalières dépassent 70 mm (*Mazour 2004*). Ceci s'explique par l'activité des gouttes de pluie et les eaux de ruissellement sur les terrains où la pente est importante qui détachent et entraînent les différentes particules en raison du caractère du sol, sa texture, sa minéralogie et sa stabilité structurale. De même, le couvert végétal intervient sur le volume ruisselé et les pertes en terre, comme il protège le sol, donc maintient l'ouverture du sol et réduit le ruissellement et absorbe une grande quantité (*Roose 1994*). Le risque peut se définir par le croisement de deux dimensions : aléa x vulnérabilité. L'aléa est le phénomène physique aléatoire, par définition à l'abri ou à l'écart de toute installation ou enjeu humain. Ce dernier aspect se traduit par la vulnérabilité qui est en termes économiques ou en termes de vies humaines, de l'aléa en question (*Glossary 1992*).

Plan de travail :

Le présent travail s'articule autour de Trois parties :

Première partie : Définit le cadre physico- géographique du bassin versant de la Medjerda et on précisant les particularités : orographiques, géologiques, morphométriques, naturel (couvert végétal, sol) et leurs interactions dans le comportement hydrologique de ce bassin.

Deuxième partie : Porte sur l'étude climatique et hydrologique qui, sera basées sur le traitement statistique des données hydrométriques, mettra en lumière les aspects fondamentaux de l'écoulement et l'évaluation des apports liquides annuels, saisonnier, mensuel et des crues dans le bassin concerné.

Troisième partie : Concerne l'étude des transports solides en suspension et modélisation, ce qui permettra par la suite d'évaluer les quantités des sédiments transportés et de préciser la dynamique érosive dans notre bassin et d'établir quelques modèles analytiques et descriptifs débits liquides - débits solides, basés sur une approche statistique d'analyse des chroniques de données et de corrélations simples. Ces modèles préciseront l'interrelation entre les différents paramètres hydrologiques. Ainsi que la quantification de l'érosion au niveau du bassin versant de la Medjerda. L'utilisation d'une approche multicritères nous a permis d'évaluer la qualité des facteurs retenus dont l'analyse spatiale permettra de réaliser une carte fine de vulnérabilité à l'érosion.

PREMIERE PARTIE

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET FACTEURS MORPHOMETRIQUES DU BASSINS VERSANT DE LA MEDJERDA

Chapitre 1

Caractéristiques physiques du bassin versant de la Medjerda

1.1- Introduction :

L'érosion présente un problème très complexe dans les bassins versants qui se trouvent au Nord-Est algérien en raison de leur sensibilité et la fragilité du milieu (matériel tendre en majorité, pente importante...ect). L'utilisation des caractéristiques physiques de ce milieu est très utile car, elle nous permet d'analyser et d'expliquer l'ampleur et l'évolution du phénomène d'érosion sur les versants. C'est pour cette raison qu'on va consacrer ce chapitre à l'étude du milieu physique dans le bassin versant de la Medjerda pour montrer l'influence des différents facteurs, tels que, les facteurs lithologiques, topographiques et aussi pédologiques.

1.2- Situation géographique :

Le bassin versant de la Medjerda appartient au domaine de l'Atlas Saharien Oriental aux confins Algéro-Tunisiens. Il se situe au Nord- Est du territoire algérien et s'étale sur une superficie de (7877 km²). Cette surface est drainée par deux principaux affluents : Oued Mellegue qui coule sur une longueur d'environ (149 km) depuis sa source à djebel Tadinart au Sud- Ouest jusqu'à la frontière algéro-tunisienne au Nord-Est et Oued Medjerda qui coule sur une longueur de (106 km) du Nord-Ouest jusqu'au Nord Est de L'Algérie. Le bassin d'intérêt prend le code (12) d'après l'ABH (*Fig n° 1*). Globalement, le bassin versant de la Medjerda peut être subdivisé en cinq (5) sous bassins versants :

- Meskiana au Sud ouest (1878 km²).
- Chabro au Sud Est (1567 km²).
- Mellegue Amont au Centre de la Medjerda (1513 km²).
- Mellegue Aval à l'extrême Est Algérien (1393 km²).
- Medjerda (Souk Ahras) au Nord (1519 km²).

Notre zone d'étude est limitée administrativement par :

- la wilaya de Souk Ahras au Nord.
- la wilaya d'El Oued au Sud.
- la wilayas d'Oum El Bouaghi et Khenchela à l'Ouest.
- les frontières Algéro- Tunisienne à l'Est.

Le bassin versant de la Medjerda est situé entre les méridiens de 7°37'E et 8°25' et les parallèles 36°05' et 36°27 'Nord (*Fig n°1*).

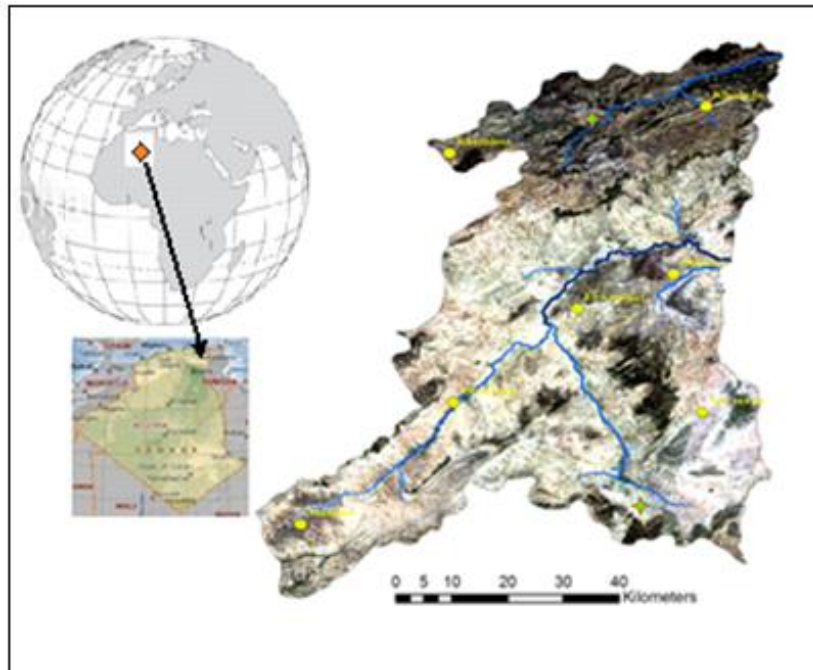


Fig n°1 : Carte de situation géographique du bassin versant de la Medjerda

1.3- La topographie :

La topographie ou le relief est un élément qui influe considérablement sur les différents paramètres hydro climatiques d'une région donnée. Il joue un rôle très important dans la détermination du comportement hydrologique du bassin versant.

Partant de là (*Fig n° 2*) on peut constater que le bassin versant de la Medjerda se subdivise en deux parties :

- la partie Nord qui englobe le bassin versant de la Medjerda (Souk Ahras), drainant un ensemble de régions hétérogènes des hautes altitudes au Nord par un relief accidenté où les écoulements ont un régime torrentiel.
- la partie Sud se trouve au Nord de l'Atlas tellien, dans la zone des hautes plaines (bassin versant de Mellegue). Cette partie est caractérisée par un relief en majorité plat là où les altitudes moyennes atteignent (800 m), entouré par un massif montagneux suivant la ligne de partage des eaux de surface.

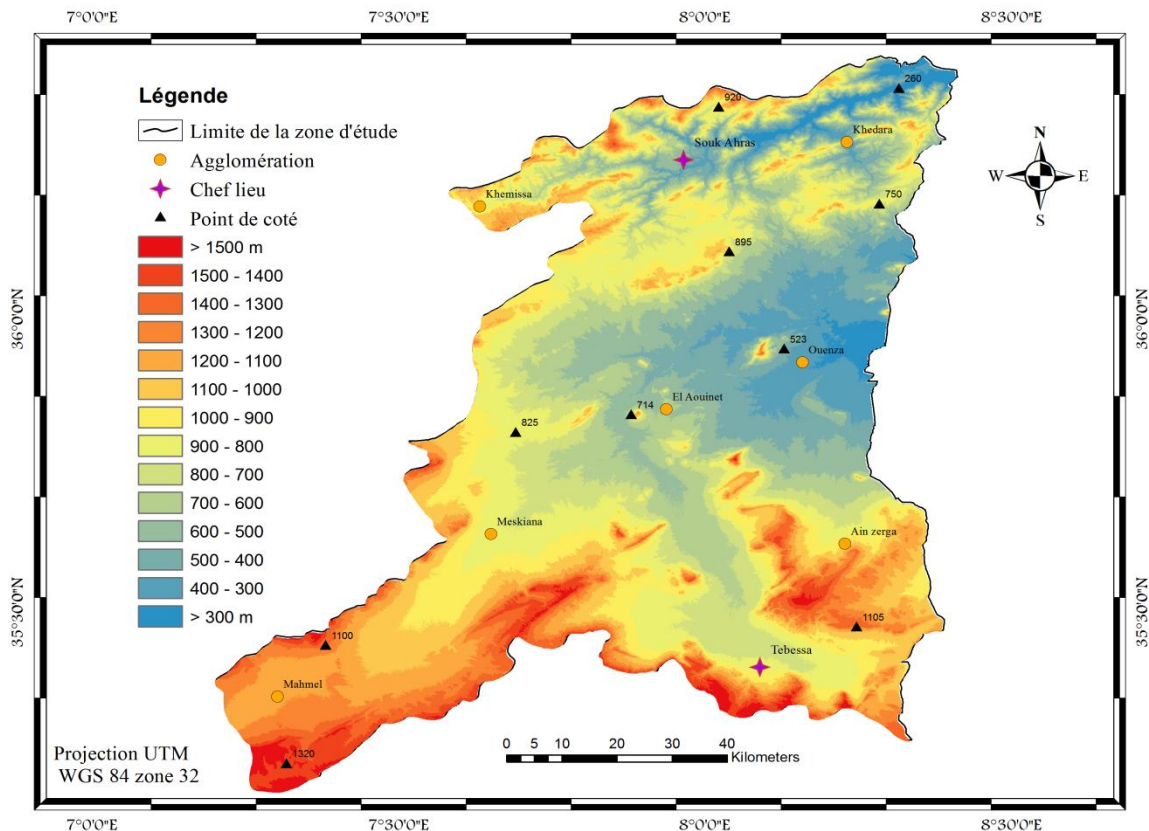


Fig n° 2: Carte hypsométrique du Bassin Versant de la Medjerda.

A travers la répartition des tranches d'altitudes (Fig n°3) : l'analyse orographique du bassin versant de la Medjerda fait apparaître trois grands ensembles morphologiques:

1.3.1 - La zone de montagne :

Nous avons considéré que la zone de montagne se situe au-delà de 1000 m de hauteur, qui occupe une superficie de (3640.1km²) soit (46.21%). Le secteur montagneux orienté sensiblement Nord-Est, Sud-Ouest est composé des unités suivantes :

- Au Sud-Est : Djebel Doukkan ayant une altitude de (1712 m), les Monts de Troubia (1456 m).
- Au Sud-Ouest : Les monts de Hamamir et les monts de Tadinart.
- A l'Ouest : Les monts de Tafrennt (1406 m), Djebel Bou Talhoma et Djebel Fedjidjet. et aussi Monts de Amamat El Kebir et Terrguelt.
- Au Nord : Les Mont de Bousessou ayant une altitude de (1087 m), et aussi le massifs de Ras el alia, Tiffech.
- A l'Est : Les Monts de Ouenza (1288 m), Boukhadra (1463 m), Djebel Zitouna (1231 m) et Djebel Dyr (1472 m).

1.3.2- La zone de piedmont:

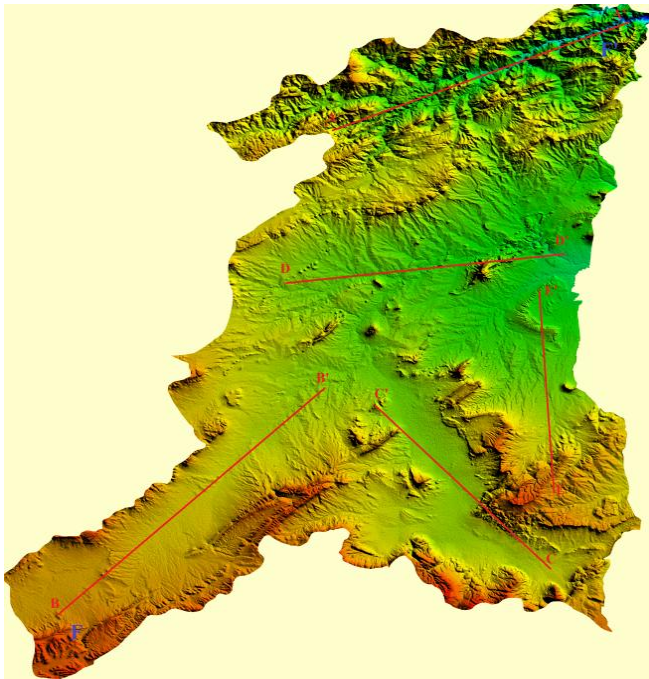
Les piedmonts correspondent à des zones de transition entre les montagnes et les plaines à des altitudes moyennes qui varient entre (700 – 1000 m). Ils montrent un développement différent d'un secteur à un autre. Ces piedmonts correspondent, en général à un ensemble de glacis d'ablation couverts sous formes de lanières résiduelles, le plus souvent par une croûte calcaire, cette zone couvre une superficie de (2606.25 km²) soit (33.09 %).

1.3.3- La zone de plaine:

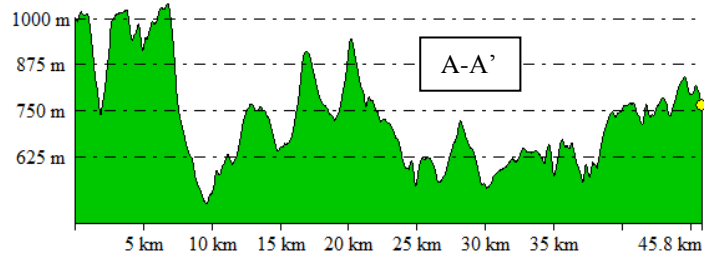
C'est la partie la plus dominante, elle qui s'étend au Nord et à l'Est des piedmonts avec des altitudes inférieures à (700 m) occupant une surface de (1630.5 km²) soit (20.70 %). Cette zone est composée par les unités suivantes :

- *Plaine de Tébessa* : remplie par des sédiments récents d'âge quaternaire, et composés généralement par des cailloutis de calcaires, marnes, argiles et sable fin et moyen.
- *Plaine de Serdiès* : C'est une vaste combe dégagée dans une puissante série marneuse emschérienne, limitée par Dj. Troubia au Sud et par les crêtes rectilignes de Dj Serdiès à l'Ouest.
- *Plaine de Hammamet* : Elle est installée sur un fossé d'effondrement subsidient causé par la composante dextre de contrainte maximale plio- quaternaire qui est devenue le siège d'une sédimentation importante des formations d'âge quaternaires.
- *Plaine de Tifféech* et la *plaine de M'Daourouch*.

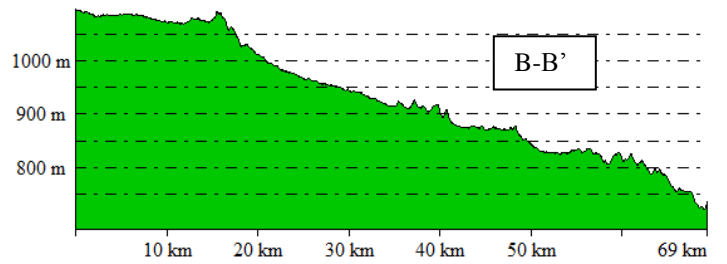
Fig n°3 : Profils topographique
(Bassin versant de la Medjerda)



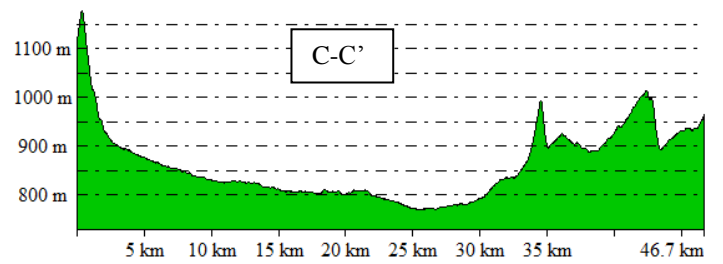
From Pos: 29991.70789, 130802.15512 To Pos: 28241.48373, 130351.17712



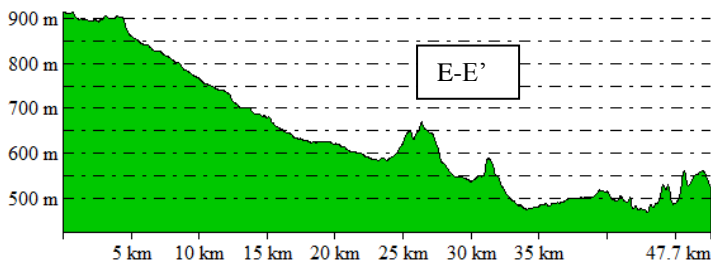
From Pos: 26201.34514, 127129.90566 To Pos: 28198.53344, 128676.11596



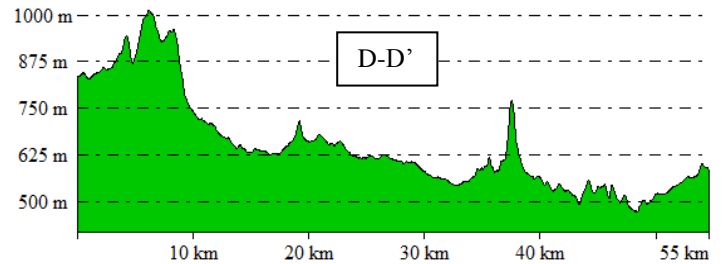
From Pos: 29787.69403, 127290.96923 To Pos: 28252.22130, 128139.23738



From Pos: 29454.82931, 128203.66281 To Pos: 29465.56688, 129749.87311

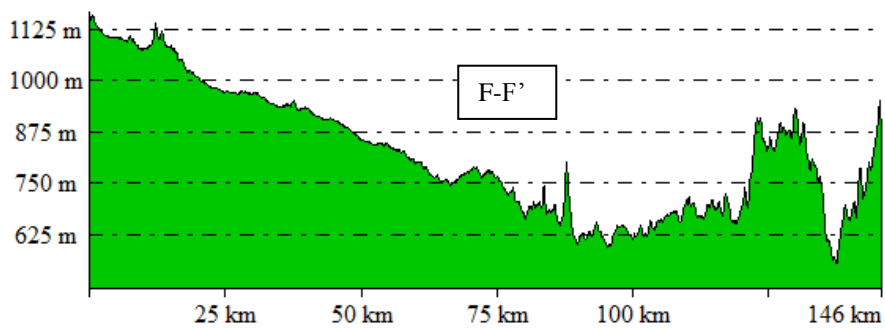


From Pos: 27833.45601, 128869.39225 To Pos: 29723.26860, 129749.87311



From Pos: 26297.98328, 127076.21780

To Pos: 29905.80731, 130780.67998



1-4 Géologie et Interaction Hydrologique :

La lithologie joue un rôle important sur le ruissèlement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent par des formations meubles (sables, argiles, marne) ou par des formations consolidées (grès, calcaires, dolomies, ...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type de dépôts alluvionnaires. Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de la Medjerda et passer par la suite à une description des formations rencontrées au niveau de la zone d'étude.

1.4.1 Cadre générale :

Le bassin d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir: L'Atlas Tellien au Nord et saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Au Nord le bassin d'étude présente un relief accidenté et entouré d'une série de montagnes dont l'altitude varie entre (1400 m) et (700 m). Il se caractérise par une végétation très développée et dense. Il est considéré comme le prolongement naturel des hautes plaines constantinoises sans pour autant en avoir les mêmes caractéristiques naturelles et physiques. Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-ouest, Nord-est. Cette structure est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du crétacé. Leur couverture est généralement mince. Selon *David (1956)* la zone est caractérisée par deux périodes orogéniques, une période pré-orogénique caractérisée par un calme parfait, l'autre orogénique très courte et mouvementée où de nombreuses phases orogéniques se succèdent depuis le Crétacé jusqu'au Quaternaire.

- La première période pré-orogénique débute à l'aube du crétacé où se sont produits les premiers plissements qu'a connus la zone. Ces plissements sont survenus vers la fin du Maestrichtien au cours desquels il y a eu l'émersion des hautes plaines, puis vers la fin de l'Eocène le calme revient.

- La deuxième période au cours de laquelle se sont produites plusieurs phases de diastrophisme, débutant à l'Eocène vers la fin du Luthérien et se prolonge jusqu'au quaternaire. Au commencement, elles étaient faibles puis paroxysmales puis faibles de nouveau. La phase préliminaire qui avait mis fin à la longue période de sédimentation (depuis le crétacé) était post-Luterien et anti-Bartonien. Elle était responsable du premier véritable plissement. La première phase majeure post-Oligocène et Anté-Miocène avait mis fin au dépôt Oligocène à faciès Numidien. Pendant cette phase, les poussées venues du Nord-Ouest étaient très intenses. Elles étaient responsables de la modification de la structure de la zone Nord par la mise en place de la chaîne montagneuse Nord à structure fortement plissée. La zone sud avait, déjà, sa constitution définitive et la structure plissée était en place.

La deuxième phase majeure était post- Miocène inférieur et Anté- Miocène supérieur pendant laquelle a eu le chevauchement vers le sud des unités telliennes et des écailles de sellaoua. L'oued Medjerda s'étire du Sud-ouest au Nord- Est, le long du versant méridional des monts arrosés de Medjerda ayant pris sa source à la limite du front (Fig n°4).

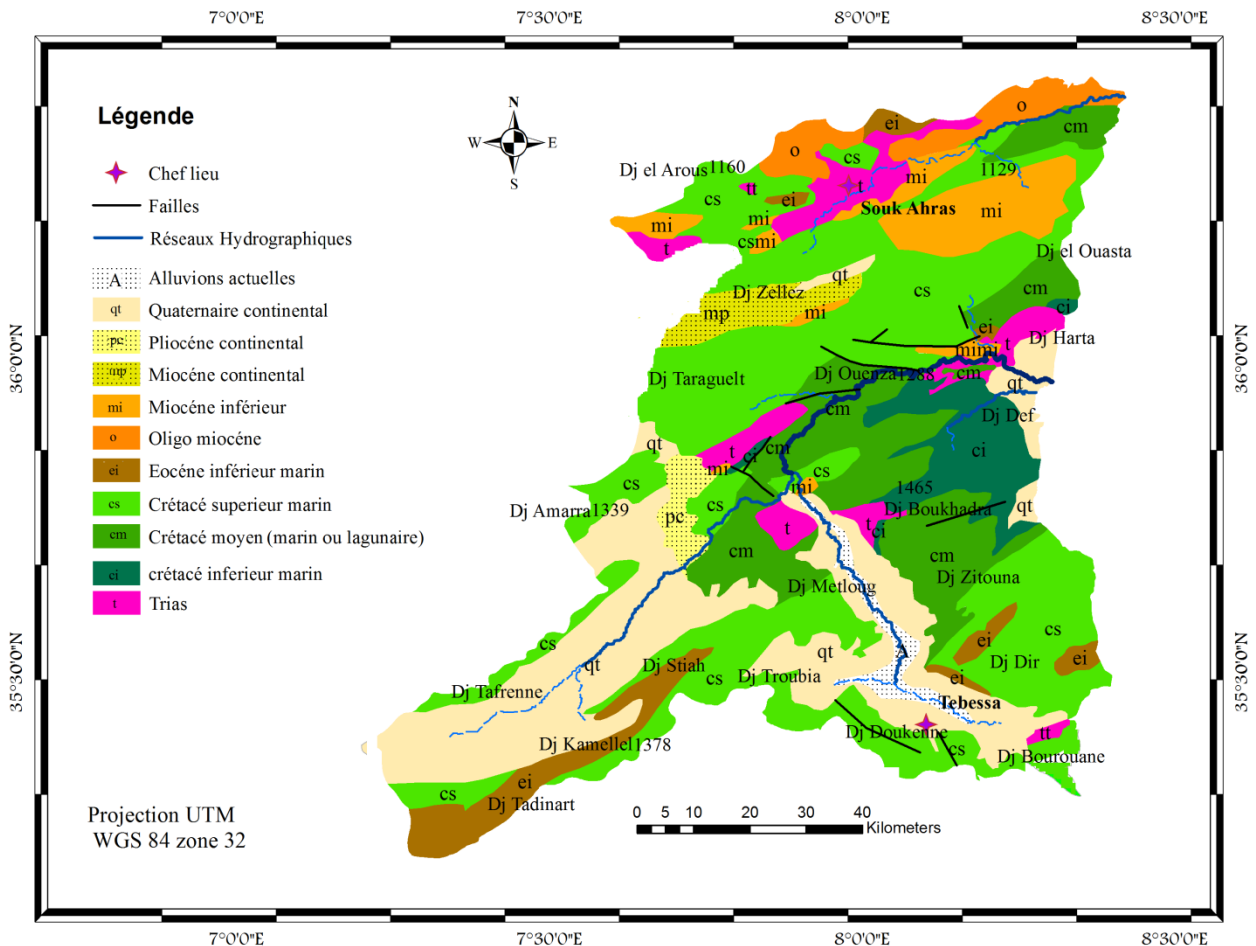


Fig n° 4 : Carte géologique de la Medjerda (Lafitte 1/200. 000)

I.4.2 Les séries litho-stratigraphiques (Fig n°5):

I.4.2.1 Trias :

Les affleurements les plus importants sont ceux des Monts de Mechrouha, Mellègue, de l'Ouenza, de Boukhadra, de Mesloul, de Hameimat Nord, de Djebessa et Belkif. A Essaoubaa par contre, le trias n'affleure pas en surface. Dans les Monts de Mellègue par exemple, le Trias affleure à la faveur d'extrusions et occupe généralement le cœur des structures anticlinales *Perthuisot et Rouvier (1992)*. En Algérie nord orientale et en Tunisie, les nombreux diapirs sont à trias évaporitique sans sel affleurant ; toutefois la présence du sel est souvent confirmée en profondeur *Bouzenoune (1993)*.

I.4.2.2 Jurassique :

Les dépôts jurassiques sont absents dans la région en question *Dubordieu, (1956), chevenine et al (1989)*.

I.4.2.3 Crétacé :

a) Le Barrémien :

Les seules formations qui se rapportent au Barrémien, affleurent au petit anticlinal de Sidi Embarka au NE de Dj Ouenza, sur le flanc SW de l'anticlinal de Mesloulou et le long de l'oued Batma et au NW de Dehar Mesloulou *Dubordieu (1956)*. Les formations Barrémiennes sont représentées essentiellement par des marnes grises ou jaunes assez argileuses, à ammonites pyriteuses. Vers le sommet, ces marnes sont intercalées par de minces passées de calcaires noduleux gris clair à patine ocre. A Mesloulou, le Barrémien est gréseux avec des passages marneux, de calcaires et de conglomérats.

b) L'aptien :

La formation aptienne débute par un Aptien essentiellement marneux composé par une alternance de marne, d'argile, de grès et de calcaire à Gastéropodes, Mollusques et Echinoides. Cet Aptien marneux est surmonté par un Aptien calcaire, formé de puissants blocs calcaires à ciment dolomitique, bioclastiques à arborescences, rudistes et qualifiés de récifaux (*Dubordieu, 1956*).

c) L'albien :

Généralement la formation albienne dans la zone d'étude, débute par un Albien carbonaté qualifié de « récifal » dans sa partie inférieure et marneux et marno-calcaire dans sa partie moyenne et supérieure. L'Albien dans les monts de Mellègue est marqué par une faune benthique dans des zones peu profondes. A l'Ouenza, les calcaires deviennent plus marneux vers la terminaison périclinale et présentent la même association micro-faunique ; tandis qu'à Mesloulou, la partie inférieure de l'Albien forme une assise carbonatée, constituée de calcaire et de calcaire marneux gris et stratifié. A Boujaber, il est constitué par des bancs plurimétriques de calcaire devenant massif dès sa partie médiane (*Vila et Charrière, 1993*). A Hameimat Nord l'Albien est analogue à Hameimat Sud ; c'est une puissante série de marnes noires grises et dont la base est formée de niveaux lenticulaires de calcaires gris.

d) Cénomaniens :

Dans les monts de Mellègue, une série monotone de marnes argileuses verdâtre s'installe au Cénomaniens inférieur. Au Cénomaniens moyen, ces marnes admettent diverses intercalations calcaires peu développées avec une faune plus au moins abondante. Au Cénomaniens supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation Cénomaniens est estimée entre (750 et 1100 m). Au nord - est d'Essouabaa, le Cénomaniens est formé par deux assises, l'assise inférieure est constituée de marnes argileuse grise verdâtre et jaunâtre.

L'assise supérieure, quant à elle, débute par un niveau de calcaire marneux gris clair à patine rougeâtre souvent lumachellique qui alterne avec des marnes argileuses de couleur verdâtre riche en foraminifère. Dans la région de Tébessa, cette époque est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement nord est – sud ouest (NE –SW) (*Othmanine, 1987*). Les marnes argileuses sont remplacées par des couches chargées de carbonates de chaux (*Dubourdieu, 1956*).

e) Turonien:

Il se fait remarquer par son changement rapide de sédimentation, vers des calcaires compacts donnant lieu à des reliefs accusés, il constitue les flancs des grands anticlinaux et synclinaux. Le Turonien affleure au Dj Krorza à Ouenza, il s'agit des calcaires noirs à gris foncé à inocérames, séparés parfois par des marnes grises. On le trouve aussi dans la région El Hammamet. A Essouabaa, le Turonien est formé d'une série d'alternances stratocroissantes de marnes, de calcaire marneux et de calcaires. Les marnes sont parfois argileuses de couleur grisâtre, d'ordre métrique à plurimétrique.

f) Campanien-Santonien :

Ils ne sont pas subdivisés à cause du manque de datation. Ils sont représentés par des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris à plaquettes de calcite fibreuse et intercalation de marnes à lumachelles. Leur puissance varie de (200 à 300 mètres) à l'Ouenza et de (500 à 600 mètres) à Boukhadra (*Dubourdieu (1956)*).

g) Maestrichtien:

Il est marqué par des calcaires blancs bien lités, d'environ (60 mètres) d'épaisseur, recouverts par une très forte accumulation de marnes argileuses grises à noirs (150m), ces dernières admettent, à leur base, quelques intercalations de calcaires (*Dubourdieu (1956)*). Le régime sédimentaire au Campanien supérieur et au Maestrichtien, indique toujours la continuité des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et de mer chaude (*chevenine et al (1989)*) avec une prédominance de calcaire crayeux rarement récifaux.

I.4.2.4 Paléocène

Sa base présente des marnes analogues à celles du maestrichtien supérieur qui s'intercalent à des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs. Cette formation est très visible au Dj Dyr et El Kouif. Aux monts du Mellègue, aucune assise préabonienne n'a été reconnue (*Dubourdieu, 1956*), mais tout auprès de ses périmètres, au Nord de Souk Ahras, au Kef, à l'Est de Kalaat Essenam, à Tadjerouine et au Sud de Tébessa, l'Eocène (inférieur et moyen) dans son ensemble se charge en calcaires à silex et d'autres à nummulites, très épais jusqu'à (200 m).

I.4.2.5 Eocène

Il se manifeste par des bancs de calcaires massifs, à gros silex, renfermant des Huîtres et des Lumachelles, surtout au niveau de Djebel Dyr et près des périmètres des monts de Mellègue. Il affleure également aux environs de Taoura et au Nord de Djebel M'sid à Souk Ahras. Leurs puissances sont de (200mètres).

I.4.2.6 Miocène :

Les dépôts du Miocène inférieur et moyen reposent transgressivement sur les formations anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias). Il s'agit d'une puissante accumulation de marnes et de grès dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin de Oulad Soukiès (NW de l'Ouenza) 1000 mètres (*Dubourdieu, 1956 ; Kowalski et Hamimed, 2000*). A leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (*Bouzenoune, 1993*).

I.4.2.7 Pliocène :

a) Villafranchien Inférieur :

Il est marqué par des argiles rouges et des conglomérats au niveau des contreforts de Djebel Djebissa. Ces derniers recouvrent largement les calcaires Eocènes en bordure de la plaine aux environs de Bekkaria. Les sédiments de cet étage constituent le matériel de comblement du fossé et caractérisent le Pliocène supérieur (*Dubourdieu, 1956*).

I.4.2.8 Quaternaire :

Les dépôts quaternaires sont distribués dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes (Plaines et vallées actuelles). Ils sont formés de croûtes calcaires, limons éboulis, cailloutis et de poudingues. Le quaternaire, d'origine continentale, est d'une puissance de (10 à 30 mètres) (*Dubourdieu, 1956*). Le recouvrement des pentes est formé par des éboulis d'éléments grossiers assez arrondis en général d'un ciment calcaire, très abondant ou de plaines. Elles forment ainsi, un épandage ancien fortement entamé par l'érosion et couvrent des surfaces importantes. Les dépôts fluviatiles sont des bancs de galets, généralement consolidés en poudingues se rencontrent en bordures des cours d'eaux en particulier ; Mellègue, Kseub et Oued Hourihir. Quant au Quaternaire récent, il est représenté par une accumulation gypso-calcaire représentant un ancien lessivage du Trias par les eaux de Mellègue, des terrasses alluviales de Mellègues, des marnes et calcaires de Taoura et M'Daourouch, des rares calcaires lacustres environ du plateau d'El Guessaa, des limons rosés (Ouled Boughanem) et des nappes des cailloux qui sont cantonnées surtout aux alentours de Boukhadra et de Haoud Esegahir. Ils assurent ainsi le comblement des fossés d'effondrements.

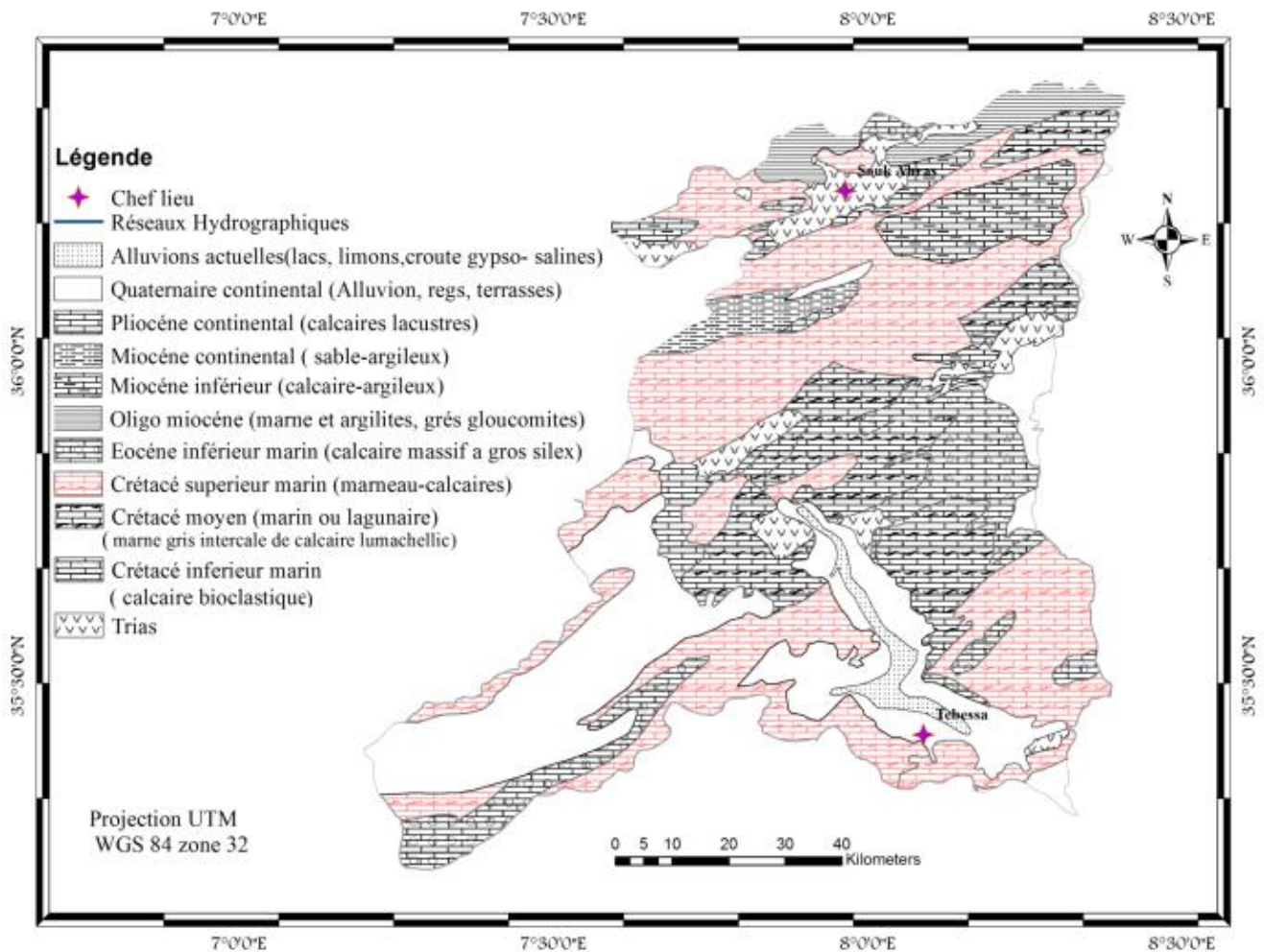


Fig n° 5 : Carte lithologique du bassin versant de la Medjerda

I.4.3 Impact de la géologie sur l'hydrologie :

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels (Bouanani A. 2004). En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura, en générale, une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépend de l'infiltration.

Les sous bassins de la Medjerda sont formés essentiellement par des formations de perméabilité moyenne, occupant les monts de Tébessa, Meskiana, Mellègue et M'daourouch. Elles occupent presque la majorité de la superficie du bassin, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface. Tandis que les plaines des sous bassins de K'sob, Meskiana, Mellègue amont et Mellègue aval, sont représentées par des formations de perméabilité faible à très faible (Alluvions fines et argile) favorisant ainsi le ruissellement de surface (Fig n°6).

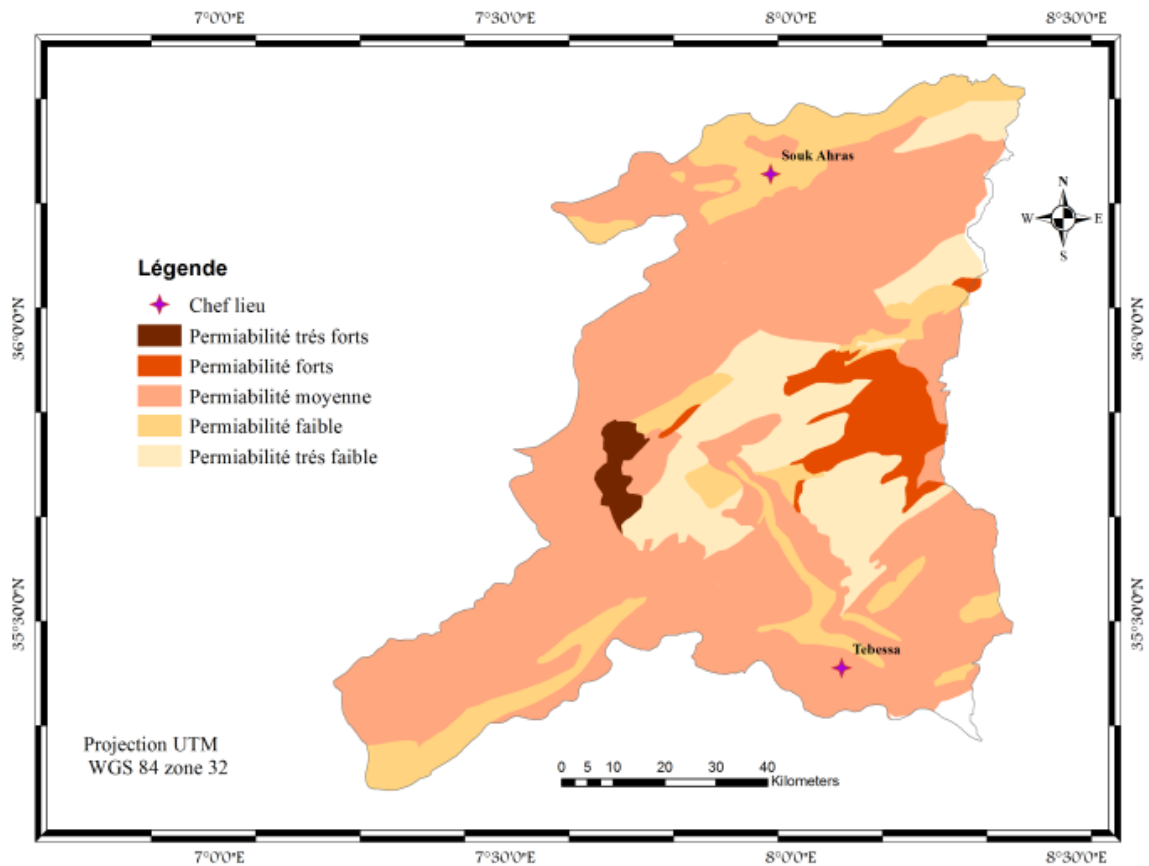


Fig n° 6 : Carte de perméabilité du bassin versant de la Medjerda.

1.7- L'occupation du sol :

La végétation joue un rôle très important dans la protection du sol, cette relation directe se manifeste par la diminution de l'action érosive des eaux. En effet la végétation dont l'action est assez complexe intervient d'une façon directe sur l'écoulement fluviale, en diminuant l'écoulement des eaux et en favorisant leur infiltration ; donc son rôle est plus important surtout dans les régions de forte déclivité, atténuant la violence des crues, ainsi le couvert végétal protège le sol contre l'érosion et limite le transport solide.

D'une manière générale, la composition végétale de la zone d'étude est constituée de forêts, de maquis et de reboisement, le reste de surface se répartissant entre les terres agricoles et les terres improductives. Le développement de l'agriculture est fortement compromis par les caractéristiques du sol, des écoulements, et de l'intensité de l'action humaine (Fig n°7).

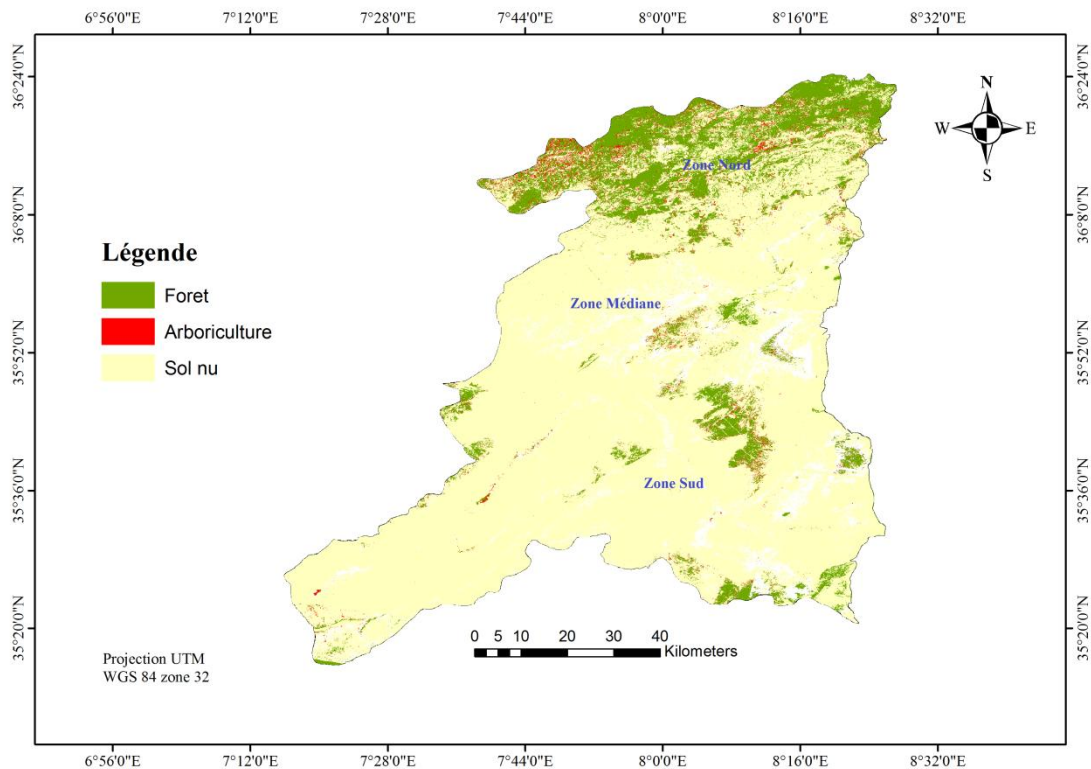


Fig n° 7 : Carte du couvert végétal dans le bassin versant de la Medjerda.

La configuration géographique du bassin versant de la Medjerda fait apparaître trois (3) grands ensembles nettement distincts (Fig n°7) :

- a- Partie Nord (*zone montagneuse*) : faisant partie de la chaîne tellienne qui est limitée par les monts de la Medjerda et Beni Salah avec une superficie de (114000 ha), on remarque que les sols sont instables et la pluviométrie est très importante (région montagneuse). La forêt est prédominante avec une surface plus de (43%), elle est concentrée essentiellement au niveau de la commune de Mechroha, Ouled-Moumen, Ain-Zana et Zaarouria (Tabl n° 1) et une agriculture de subsistance est pratiquée par les ruraux (maraichage, arboriculture, élevage). Cette zone est relativement stable en matière de peuplement forestier et demeure encore marginalisée malgré sa biodiversité.

Tabl N° 1: Répartition des superficies forestières par commune et par type en (Ha)

N°	Commune	Forêt	Maquis	Broussailles	Total
1	Souk-Ahras	490.13	270	120	880.13
2	Khemissa	550	165.94	0	715
3	Mdaourouch	909	0	0	909
4	Tiffech	341.46	2 417.7	0	2 758
5	Ragouba	0	900	0	900
6	Taoura	4 100	2558.01	0	6658
7	Zaarouria	3200	4902.20	0	81.02
8	Drea	2 790	2868	0	5658
9	Merahna	0	0	0	0
10	Ouillen	1 694.5	490	392	2577
11	Heddada	3858.6	450	117	4486
12	Khedara	2 549.1	750	1987	5286
13	O.Moumen	4 900	380	597.05	5 877
14	Mechroha	15 524.2	525	417	16566.2
15	Hennencha	4 007	8 890	1348	14305
16	Ouled-Driss	2 955	1099.4	400.01	4445.4
17	Ain Zana	8 240	276	501	7 463
Total		31855	24525	5879	73687

- b- Partie Médiane : Elle représente les hautes plaines et les piémonts dont l'altitude dépasse (800 m) et qui se situe au sud de la wilaya de Souk-Ahras tels que : commune de Taoura, commune de Merahna, commune de M'Daourouche jusqu'à la commune de Sidi Fredj qui couvrent une superficie d'environ (80000 ha). Cette zone à variation agricole (céréales) se caractérise par des sols stables.
- c- Partie Sud : Elle englobe le Nord de la wilaya de Tébessa et une partie de la wilaya D'Oum-El Bouaghi et de Khenchela. La quasi-totalité des forêts est située dans les zones montagneuses dans la partie Sud-Est : djebel Tella et djebel Anoual qui sont couverts par des forêts de Pin d'Alep et Genévriers, et aussi la partie sud-ouest djebel Tadinart. On rencontre également les forêts de pin d'alep à l'Est de Dj Zitouna, à l'Ouest de Dj Metloug et dans les versants d'oued Chabro. Alors que les plaines de Ain Touila, Zoui se sont des zones qui ne sont pas favorables à l'activité agricole intense.

Conclusion

L'oued de la Medjerda draine un vaste bassin qui occupe une superficie de (7877 km²). Ce bassin versant présente des ensembles morpho-structuraux bien tranchés, représentés d'une part par un relief plus au moins accentué, avec un couvert végétal moyen à dense, constitué par des formations carbonatées et argileuses, d'autre part, on trouve des plaines contenant des formations géologiques meubles. On outre le diagnostic physio-géographique permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'écoulement, leurs influence sur le milieu et la mise en évidence de l'interrelation entre les différents paramètres physiques. La combinaison de ces derniers est déterminant dans le comportement hydrologique des diverses unités du bassin.

Chapitre 2

Analyse morphométrique et statistique

2.1 Introduction :

L'étude des caractéristiques morphométriques d'un bassin versant constitue une plate-forme essentielle pour l'explication et la compréhension de son comportement hydrologique et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage *Musset (2005)*. Parmi les caractéristiques morphologiques, nous citons en premier lieu, la taille du bassin (surface), forme, pente et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces paramètres ont l'avantage de se prêter à une analyse quantitative, mais l'emploi des méthodes de mesures correspondantes doit être utilisé avec prudence vu l'extrême interférence des facteurs physiques et l'influence parfois prononcée. Ceci concerne essentiellement certains paramètres qui sont difficiles à exprimer par des méthodes précises et définies.

2.2- Les caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques d'un bassin versant nécessitent au préalable la connaissance d'un ensemble d'indices qui aide à déterminer les caractéristiques qualitatifs et quantitatifs du bassin. Ces indices dépendent de certaines mesures tels que la surface et le périmètre qui représentent les éléments les plus importants.

2.2.1- Surface et périmètre du bassin versant:

Le bassin versant en un point ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau est défini comme la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de la dite section; tous les écoulements prenant naissance à l'intérieur de cette surface doivent traverser la section droite considérée pour suivre leur trajet vers l'aval. La détermination de la surface du bassin versant ainsi que son périmètre ont été déterminés par l'utilisation des images satellitaires à l'aide du logiciel (*Arc-Gis*). Cette technique nous a permis de déterminer avec précision la surface de notre bassin versant qui est de (7877 km^2) et un périmètre de (846 Km).

2.2.2- Forme du bassin :

La forme du bassin affecte l'hydrogramme afférent à une averse donnée et en particulier le débit de pointe à l'exutoire du bassin versant. Il existe plusieurs indices utilisés pour décrire la forme d'un bassin, tel que l'Indice de compacité de Gravelus (K_c), rapport de circularité *Miller (1953)* et aussi facteur de forme (FF) *Zavoianu (1978)*.

a- Indice de compacité de Gravelus (Kc) :

L'indice de compacité de Gravelus traduit la forme du bassin versant, il indique un allongement ou le ramassage du bassin versant s'il est proche de 1 aura une forme ramassée, ce qui implique un temps de concentration court et plus il est loin de 1, plus le bassin aura une forme allongée. Il est donné par la formule suivante :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Kc : indice de compacité.

P : périmètre du bassin versant (km).

A : surface du bassin versant (km²).

La valeur de l'indice de compacité ($Kc = 2.67$) montre que le bassin versant de la Medjerda a une forme allongée, ce qui augmente théoriquement le temps de concentration et implique une forte compacité (*Annex n°1*).

2.2.3- Le relief :

Le relief est un facteur essentiel qui peut être caractérisé par la courbe hypsométrique. Il joue un rôle dans la détermination de l'aptitude au ruissellement, à l'infiltration et l'évaporation du bassin versant. La courbe hypsométrique représente la répartition altimétrique en (%) cumulé de la surface totale du bassin versant par tranche d'altitude (*Tabl n° 2*). Partant de cette répartition, nous avons établi la courbe Hypsométrique et les diagrammes des fréquences altimétriques (*Fig n 8*), (*Annex n°2*).

Tabl n 2: La répartition altimétriques du bassin versant de la Medjerda.

Tranche d'altitude (m)	Altitude moyenne Hi (m)	Surface partielle ai (km ²)	Surface cumulé ai (km ²)	Surface partielle ai (%)	Surface cumulé ai (%)	Dénivelé (di)
1712-1500	1606	132.1	132.1	1.68	1.68	212
1500-1400	1450	448.4	580.5	5.69	7.37	100
1400-1300	1350	669.7	1250.2	8.50	15.87	100
1300-1200	1250	665.7	1915.9	8.45	24.32	100
1200-1100	1150	832.9	2748.8	10.57	34.90	100
1100-1000	1050	891.3	3640.1	11.32	46.21	100
1000-900	950	1038.2	4678.3	13.18	59.39	100
900-800	850	836.4	5514.7	10.62	70.01	100
800-700	750	731.65	6246.35	9.29	79.30	100
700-600	650	628.2	6874.55	7.98	87.30	100
600-500	550	427.3	7301.85	5.42	92.70	100
500-400	450	282.9	7584.75	3.59	96.29	100
400-300	350	205.9	7790.65	2.61	98.91	100
300-260	280	86.2	7876.85	1.09	99.99	40

Le bassin versant d'oued Medjerda atteint (1712 m) à son point culminant au sommet de Djebel Doukkane à la limite sud-Est du bassin versant, tandis que le point le plus bas atteint (260m) d'altitude, donc une dénivelée totale de (1452 m).

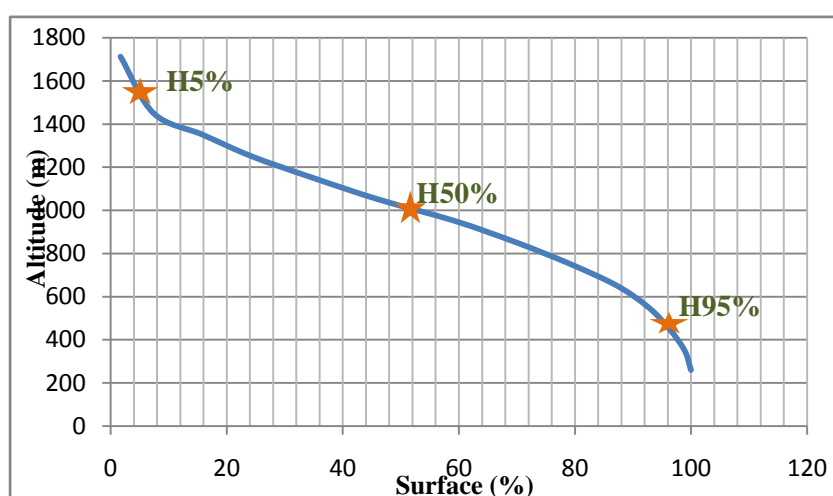


Fig n° 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la Medjerda.

a- Altitudes caractéristiques :

Les courbes hypsométriques et les histogrammes des fréquences altimétriques permettent de déterminer les altitudes caractéristiques du bassin versant et l'état de ce dernier (Tabl n° 3)(Annex n°3).

Tabl n° 3 : Altitudes caractéristiques du bassin versant de la Medjerda.

Bassin	Hmin	Hmax	D=Hmax-Hmin	H50%	H5%	H95%
Medjerda	260	1712	1452	1004	1596	498

a.1- Altitude moyenne (\bar{H}) :

Elle s'obtient en divisant le volume montagneux (V) par la superficie du bassin (A).

Ce volume est la somme des volumes partiels (V_i) de chaque tranche de surface comprise entre les isohypses choisies. Ces volumes s'obtiennent en multipliant les surfaces partielles (A_i) par la moyenne arithmétique des altitudes (H_i) et (H_{i+1}) des courbes qui les limitent.

$$\bar{H} = \frac{\sum A_i \bar{H}_i}{A}$$

Dans notre cas $\bar{H} = 965.5 \text{ m}$

2.2.4- Rectangle équivalent :

Pour apprécier la forme, et par la suite les dimensions, du bassin versant, on assimile ce dernier à un rectangle ayant la même superficie (A), le même périmètre (P) et le même indice (Kc). Ce rectangle, appelé rectangle équivalent, est caractérisé par sa longueur (L) et sa largeur (l) qu'on peut les calculer comme suit :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right)$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right)$$

Ayant déterminé les dimensions du rectangle équivalent, l'on détermine la répartition des courbes de niveaux, en utilisant la courbe hypsométrique tracée précédemment. Ainsi, la longueur et la largeur du rectangle équivalent du bassin versant de la Medjerda sont confirmées respectivement égale à ($L = 404.11 \text{ km}$) et ($l = 19.49 \text{ km}$).

Tabl n° 4 : Calcul des largeurs des intervalles.

Tranche d'altitude	Surface de l'intervalle (km²)	Pourcentage de la surface (%)	Largeur de l'intervalle
1712-1500	132.1	1.68	6.79
1500-1400	448.4	5.69	23.01
1400-1300	669.7	8.50	34.35
1300-1200	665.7	8.45	34.15
1200-1100	832.9	10.57	42.71
1100-1000	891.3	11.32	45.75
1000-900	1038.2	13.18	53.26
900-800	836.4	10.62	42.92
800-700	731.65	9.29	37.54
700-600	628.2	7.98	32.25
600-500	427.3	5.42	21.91
500-400	282.9	3.59	14.51
400-300	205.9	2.61	10.57
300-260	86.2	1.09	4.41

La largeur de l'intervalle est égale au produit de la longueur du rectangle équivalent par le pourcentage de la surface intéressée (Tabl n° 4). Ensuite, à l'aide des dimensions trouvées, on trace le rectangle équivalent (Fig n° 9).

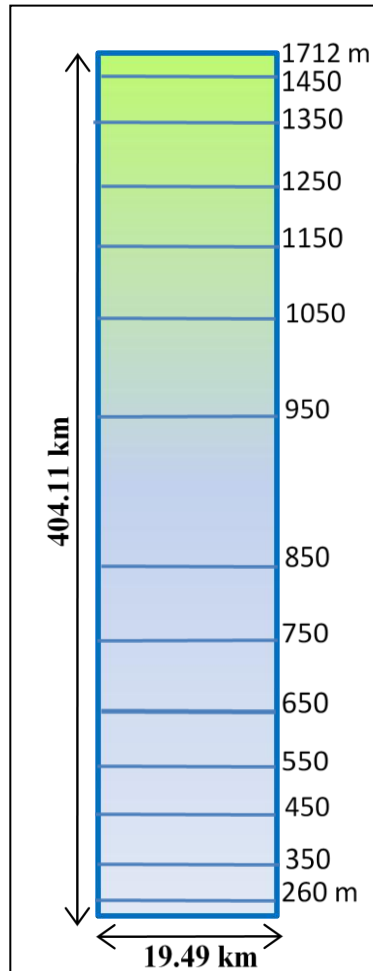


Fig n° 9 : Le rectangle équivalent.

2.2.5- La pente et ces indices :

a- La pente :

La pente est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin versant, elle détermine une grande partie d'amplitude des terrains au ruissellement et conditionne la vitesse de l'écoulement des eaux de surface par l'effet de la pesanteur (Fig n° 10), (Annexe n°4).

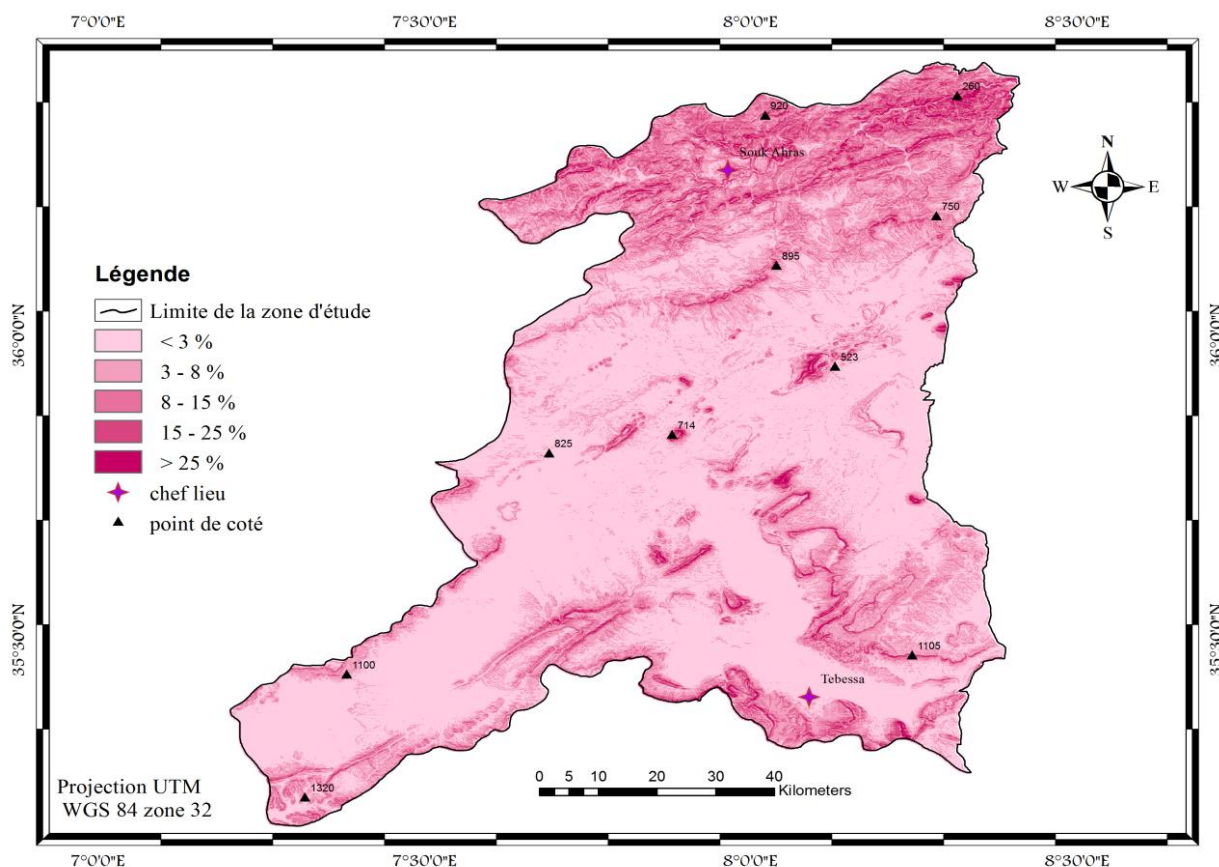


Fig n° 10 : Carte des pentes du Bassin Versant de la Medjerda.

D'après la carte des pentes réalisées (Fig n° 10), on peut déterminer 5 classes (Tabl n°5).

Tabl n° 5 : Classification des pentes selon GRECO.

Classe de pente	Superficie (km ²)	Superficie (%)
< 3	4399.4	55.85
3 - 8	1986.9	25.23
8 - 15	970.2	12.32
15 - 25	412.8	5.24
> 25	107.5	1.36

Le bassin versant de la Medjerda est caractérisé par deux zones distinctes :
 une zone montagneuse à forte pente au nord du bassin qui atteint une superficie d'environ (520 km²) soit (7%) de la surface totale, cette partie est le siège des particules solides charriées par l'oued, et au sud du bassin versant de la Medjerda, une zone médiane correspondant aux plaines et plateaux où les pentes sont douces à la moyenne qui dépasse les (50%). Cette classe de pente est la plus fréquente au niveau du bassin.

b- Les indices de Pentes :

Ces indices permettent de caractériser les pentes d'un bassin versant et d'établir une classification des différents reliefs pour établir ensuite la comparaison entre les différents bassins versant.

b.1- Indice de pente de M.Roche (I_p) :

L'indice de pente de *Roche* sert à déterminer la pente moyenne à partir des données du bassin versant. Il tient compte du facteur de ruissellement et de l'influence du facteur de pente sur le régime hydrologique du bassin. *M. Roche* a introduit cet indice qui se calcule, directement à partir du rectangle équivalent, il est défini la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{\beta_i \cdot d_i}$$

D'où : I_p : indice de pente de *M.Roche*.

L : longueur du rectangle équivalent.

β_i : fraction de la surface totale du bassin versant comprise entre les côtes (a_i) et (a_{i-1}) fonction donnée par le tableau hypsométrique.

d_i : distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

$$I_p = 17.98$$

b.2- Indice de pente global (I_g) :

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global. Cet indice (I_g), exprimé en m/km, est donné par le rapport de la dénivelée utile (D) en m ; estimée à partir de la courbe hypsométrique; à la longueur du rectangle équivalent (L) en km.

$$I_g = D/L$$

I_g : indice globale de Roche D : dénivelée (m).

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points telle que, la surface supérieure ou inférieure soit égale à (5%) de la surface totale. ($H_{5\%}$) et ($H_{95\%}$) sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent (90%) de la surface du bassin. La dénivelée D est donc égale à ($H_{5\%}-H_{95\%}$).

$$I_g = 2.73 \text{ m/km}$$

Selon la classification adoptée par l'ORSTOM (France), le relief est dit moyennement faible si l'indice de pente global est compris entre (2 et 5 m/Km) (Tabl n° 6), (Annexe n°4).

Tabl n° 6 : Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM

Relief très faible	$I_g < 2$ m/km
Relief faible	$2 < I_g < 5$
Relief assez faible	$5 < I_g < 10$
Relief modéré	$10 < I_g < 20$
Relief assez fort	$20 < I_g < 50$
Relief fort	$50 < I_g < 100$
Relief très fort	$I_g > 100$

b.3- Dénivelée spécifique (Ds) :

La dénivelée spécifique apparaît donc comme une correction de la dénivelée simple par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin, exprimée en (m). Ce qui donne la possibilité de comparer les valeurs des différents bassins. Elle s'obtient à partir de la pente globale et la superficie par la relation suivante :

$$Ds = I_g \sqrt{A}$$

D'où Ds : dénivelée spécifique.

I_g : indice de pente global.

A : surface totale du bassin versant.

$$Ds = 242.4 \text{ m}$$

La dénivelée spécifique trouvée montre que notre bassin présente un relief assez fort d'après le (Tabl n° 7), (Annexe n°5) .

Tabl n° 7 : Classification du relief selon Ds

Ds < 10 m	Relief très faible
$10 < Ds < 25$ m	Relief faible
$25 < Ds < 50$ m	Relief assez faible
$50 < Ds < 100$ m	Relief modéré
$100 < Ds < 250$ m	Relief assez fort
$250 < Ds < 500$ m	Relief fort
$Ds > 500$	Relief très fort

b.4- Indice de pente moyenne (Im) :

La pente moyenne est un paramètre important qui renseigne sur la topographie du bassin versant. Elle donne une bonne indication sur le temps de concentration et influe directement sur le débit de pointe lors d'une averse. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$Im = \frac{Dt}{L}$$

Avec : Im : indice de pente moyenne (%).

Dt : dénivelée totale du rectangle équivalent (m).

L : longueur du rectangle équivalent (km).

$$Im = 16.36 \text{ m/km}$$

Selon la classification de l'C.U.I.G, la valeur de l'indice de pente moyenne obtenue, indique que la pente est inclinée légèrement (*Annexe n°6*).

2.3- Les caractéristiques morphométriques:

Les paramètres morphométriques les plus classiques sont la densité de drainage, les rapports de longueur et de confluence. En conséquence, toute la mesure repose sur l'établissement du plan du chevelu hydrographique complet du bassin versant à une échelle connue, on aura ensuite à décompter les thalwegs puis à en mesurer les longueurs, enfin il faudra évaluer les rapports de longueur et de confluence par ajustement.

2.3.1- Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Il est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement et son profil en long (*Fig n°11*).

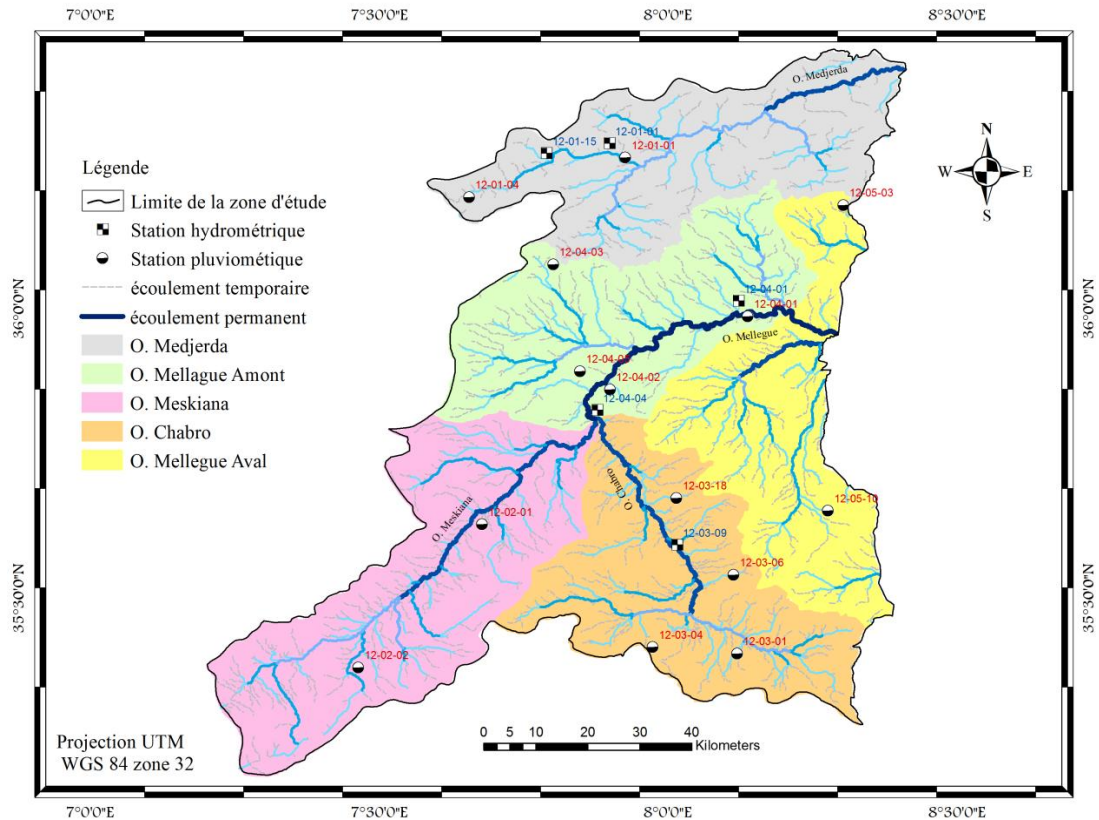


Fig n°11 : Carte du réseau hydrographique du Bassin Versant de la Medjerda.

L'oued Medjerda-Mellegue est considéré parmi les oueds qui donne accès a une porte internationale, il traverse le territoire de deux états: L'Algérie dans la partie haute du courant et la Tunisie dans ses parties moyennes et basses, qui prend naissance du côté de Khemissa " Ruine Romaine " (avec une direction Nord- Est) et oued Meskiana aussi oued Chabro (direction Sud ouest-Nord est) puis s'écoule vers l'Est avant de se jeter dans la Méditerranée " golf de Tunis" (Annexe n°7). Ces principaux affluents sont présentés dont la (Fig n° 12).

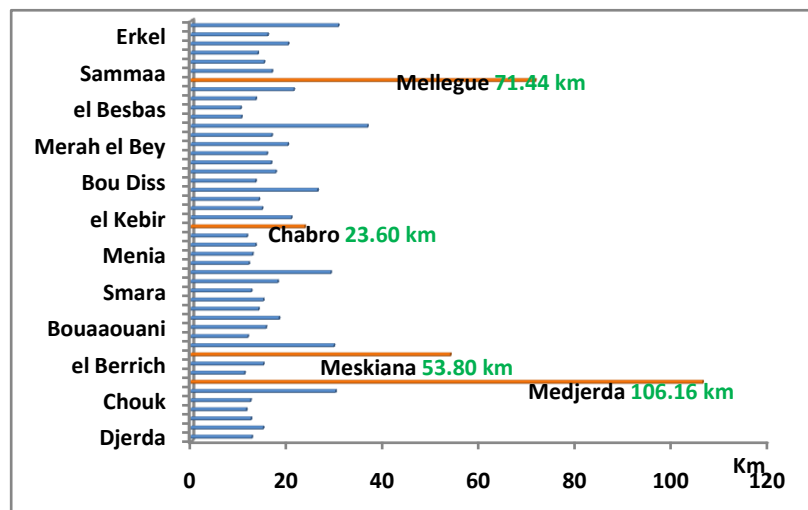


Fig n° 12 : Longueur des principaux oueds dans le bassin versant de la Medjerda.

2.3.2- Densité de drainage (Dd) :

Se définit comme étant le rapport de la longueur total (L_x), en km à la superficie totale du bassin (A) en km^2 soit :

$$Dd = \frac{\sum L_x}{A}$$

D'où Dd : densité de drainage (km/km^2).

L_x : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en (km).

A : surface du bassin versant (km^2).

$$Dd = 0.45 \text{ km}/\text{km}^2$$

D'après le résultat obtenu, le bassin versant de la Medjerda est caractérisé par un écoulement moyen a élevé, qui est lié à une lithologie moyenne perméabilité et, une pluviométrie moyenne dans sa partie sud est élevé dans sa partie nord (*Annexe n°8*).

2.3.3- Rapport de confluence (Rc) :

Pour calculer la pente de la droite ajustée, les valeurs de (N_x) et (N_{x+1}) sont prises sur la droite et on obtient par extraction des logarithmes (*Annexe n°8*). Le rapport de confluence défini par la relation suivante :

$$Rc = \frac{N_x}{N_{x+1}}$$

D'où Rc : rapport confluence.

N_x : nombres de talwegs de l'ordre x.

N_{x+1} : nombres de talwegs de l'ordre x+1.

$$Rc = 2.13$$

2.3.4- Rapport de longueur (Rl) :

Le rapport des longueurs est calculé par la relation suivante (*Annexe n°8*) :

$$Rl = \frac{L_{x+1}}{L_x}$$

D'où Rl : Rapport des longueurs.

L_x : Longueur de cours d'eau d'ordre x.

L_{x+1} : Longueur de cours d'eau d'ordre x+1.

$$Rl = 1.24$$

2.3.5- Coefficient de torrentialité (Ct) :

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage (*Annexe n°8*) :

$$Ct = F_1 \times Dd$$

$$F_1 = \frac{N_1}{A}$$

Avec Ct : coefficient de torrentialité.
Dd : densité de drainage.
 F_1 : fréquence des thalwegs élémentaires.
 N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1.
A : surface du bassin versant.

$$Ct = 0.02$$

2.3.6- Temps de concentration (Tc) :

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul (*Annexe n°8*), nous faisons appel à la formule de Giandotti.

$$Tc = 4(A + 1.5L)^{1/2} / 0.8(H_{moy} - H_{min})^{1/2}$$

D'où Tc : temps de concentration (heure).
A : surface du bassin versant (km²).
L : longueur du talweg principal (km).
 H_{moy} : altitude moyenne (m).
 H_{min} : altitude minimale (m).

$$Tc = 24.18 \text{ heures}$$

On remarque que le temps de concentration est d'autant plus élevé que l'allongement du bassin est marqué. Dans le (*Tabl n° 8*), nous avons représenté les valeurs des différents paramètres du bassin versant de la Medjerda.

Tabl n° 8 : Récapitulation des paramètres du bassin versant de la Medjerda.

Caractéristiques	Paramètres	Symbole	Unités	Valeurs
Géométriques	Surface	A	km ²	7877
	Périmètre	P	km	846
	Coefficient de Gravelius	Kc	/	2.67
	Longueur du rectangle équivalent	L	km	404.11
	Largeur du rectangle équivalent	l	km	19.49
Morphométriques	Altitude maximale	Hmax	m	1712
	Altitude moyenne	Hmoy	m	965.5
	Altitude minimale	Hmin	m	260
	Pente globale	Ig	m/km	2.73
	Pente de M.Roche	Ip	/	17.98
	Pente moyenne	Im	m/km	0.004
	Dénivelée spécifique	Ds	m	242.4
Morphométriques	Densité de drainage	Dd	km/km ²	0.45
	Temps de concentration	Tc	heurs	24.18
	Coefficient de torrentialité	Ct	/	0.02
	Rapport des confluences	Rc	/	2.13
	Rapport des longueurs	Rl	/	1.24

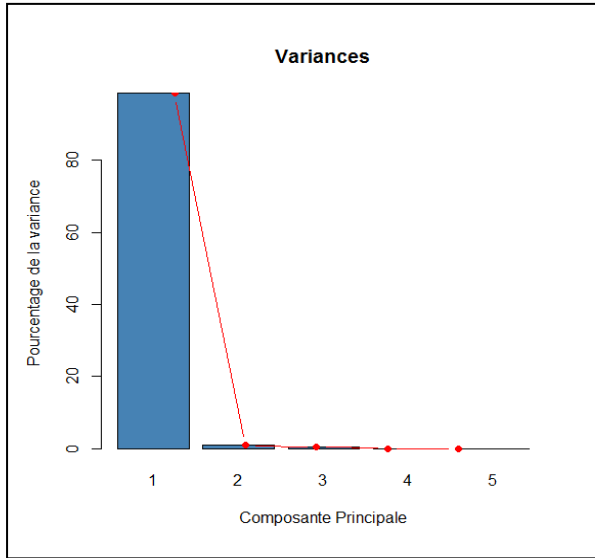
2.4 Analyse statistique des données physiographiques :

Nous avons impliqué tous les paramètres physiques calculés pour les différents sous bassins de la Medjerda a une analyse en composantes principale (ACP), afin de mettre en évidence les affinités entre ces sous bassins et déduire les paramètres les plus prépondérants.

L'analyse en composante principale (ACP), est une méthode de réduction du nombre de variables permettant la représentation géométrique des observations et des variables. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls *Bouroche et Saporta 1980*.

La méthode a été appliquée à 5 variables (sous bassins versants) et 15 individus (variables physiographiques) qui sont: la superficie (S), le périmètre (P), l'indice de compacité de Gravelius (Kc), la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent, la dénivelé spécifique (Ds), la densité de drainage (Dd), le rapport de longueur (Rl) et le rapport de confluence (Rc), l'altitude la plus fréquente (H5%), l'altitude de fréquence (H50%), les indices de pente globale (Ig) et de Roche (Ip), le coefficient de torrentialité (Ct) et enfin le temps de concentration (Tc).

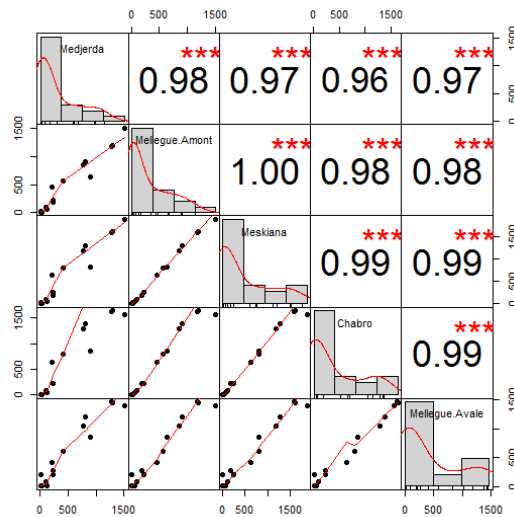
L'analyse de la courbe des valeurs propres (*Fig n°13*), montre que les deux premiers facteurs permettent de représenter le maximum d'informations (99.46%).



Tabl n° 9 : Valeurs propres

Facteurs	F1	F2
Valeur propre	4.92	0.047
Variabilité (%)	98.53	0.93
% cumulé	98.53	99.46

Fig n°13 : Le graphique des valeurs propres



Tabl n°10: Matrice de corrélation des variables (bassins versants)

L'analyse de la matrice de corrélation (Tabl n°10) montre une excellente corrélation et même très significative entre les bassins versants (Meskiana, Chabro et Mellegue aval) et à un degré moindre entre ces derniers et ceux de la Medjerda et Mellegue aval.

2.4 .1 Analyse des variables :

La projection des variables (sous bassins) sur le plan factoriel (F1-F2) (*Fig n°14*), montre que le facteur (F1) est bien représenté par les sous bassins de la région. Ce ci témoigne la forte corrélation qui existe entre eux. Ce facteur exprime donc l'homogénéité des bassins de la région. Quant au facteur (F2), nous constatons l'existence de deux groupes celui des bassins de la Medjerda et Mellegue amont avec des coordonnées positives et celui des trois bassins de Meskiana, Chabro et Mellegue Aval qui contribuent négativement. Cette symétrie par rapport à l'axe (F2) explique donc le paramètre relief qui est différent pour ces deux groupes.

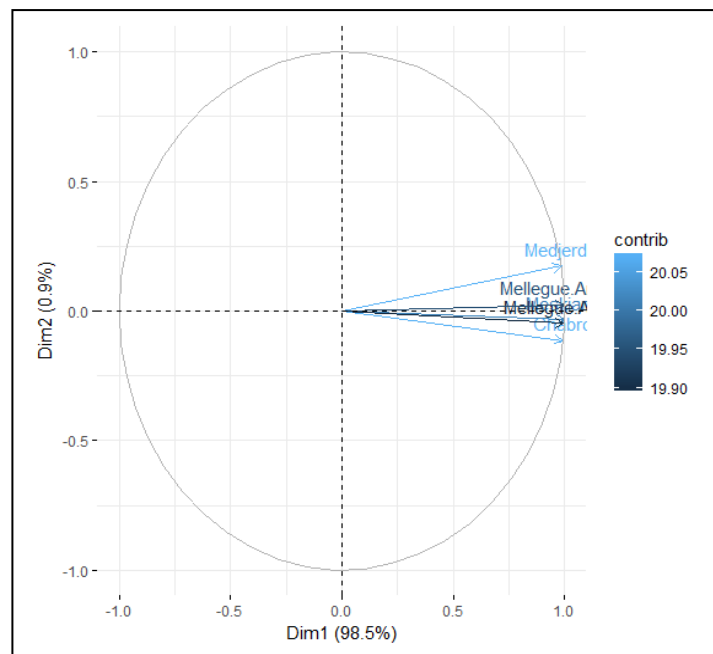


Fig n° 14: Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP).

Conclusion

L'analyse morphométrique est la base de toute étude hydrologique, elle permet de quantifier les différentes caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant. Généralement le bassin versant de la Medjerda présente une forme moyennement allongée. La valeur du coefficient de torrentialité (C_t) est assez faible ; ceci s'explique par la faiblesse des précipitations surtout dans la partie Sud du bassin. Par ailleurs, le temps de concentration s'avère important en raison de la forme et le relief qui est modéré à fort dans son ensemble. La pente est assez forte où la répartition des valeurs met en évidence la sensibilité de ce bassin au phénomène de l'érosion. Le rapport de confluence (2.13), indique que le réseau hydrographique est bien organisé de forme dentritique. Donc on peut dire que le réseau hydrographique se caractérise par un chevelu hydrographique bien hiérarchisé et moyennement dense. L'application de l'analyse en composante principale à parmi de déduire d'une part l'homogénéité des différents sous bassins versants, et d'autre part la disparité de relief dans la zone d'étude. Ce dernier peut avoir un rôle déterminant dans le processus d'érosion.

DEUXIEME PARTIE

CARACTERISTIQUES HYDRO- CLIMATOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MEDJERDA

Chapitre 3

Etude Climatologique

3.1- Introduction :

Les conditions climatiques d'une région jouent un rôle important dans le comportement hydrologique des cours d'eau *Roche (1963), Cosande (2001)*. Aujourd'hui, de nombreuses questions se posent concernant l'avenir de la planète vis-à-vis des changements des climatiques. Le continent Africain reste le plus exposé aux soubresauts du climat. Pour mieux comprendre le fonctionnement et les influences d'un système hydraulique de surface dans une région donnée, il est nécessaire d'établir un bilan hydrique. L'évaluation de ce dernier exige la connaissance des différents paramètres tels que : l'infiltration, l'évaporation, les ruissellements et aussi les précipitations. *Lanani, (2008)* remarque que les relevés pluviométriques constituent l'une des données indispensables dans l'étude du climat d'une région. Les précipitations, représentent essentiellement le facteur influençant le régime d'écoulement et le volume d'eau infiltré.

3.2- Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord :

L'Algérie correspond à la zone de contact entre les masses d'air d'origine ou d'affinités polaires et arctiques d'une part et les masses tropicales d'autres part *Seltzer, (1946)*. L'avancée des masses d'air froides vers le Sud peut être enregistrée tout au long de l'année. Mais l'observation a montré qu'elles n'influent avec efficacité sur l'évolution du temps qu'entre le début de l'automne et la fin du printemps *Bouanani (2004)*.

En effet, les masses d'air tropical, peuvent provenir de l'Atlantique ou du continent Africain par des courants dirigés vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-Est. Les différentes situations météorologiques perturbées sont susceptibles d'affecter l'Afrique du Nord correspondent à une circulation des masses d'air orientées d'une manière zonale (d'Ouest en Est) suivant le flux de Westerlies.

Le climat de la Méditerranée eurafricaine est étroitement bloqué entre un domaine tempéré plus frais au Nord et le désert au Sud excepté en bordure même de la mer où l'on n'observe pas un véritable climat maritime, mais plutôt un climat contrasté traduisant plus d'influences continentales qu'océaniques et reflétant avant tout leur double appartenance aux franges de la zone tempérée et de la zone tropicale.

3.3- Aperçu sur le climat de l'Algérie :

Le climat de l'Algérie, notamment dans sa partie Nord, est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse, allant globalement de Septembre à Mai, suivie d'un été sec et ensoleillé *Seltzer (1946)*. L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer.

L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles. Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaine plus sec relativement chaud et d'un écart thermique fort.

3.4- Equipement du bassin versant:

3.4.1- Stations pluviométriques :

La pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs *P.Seltzer (1913-1938)*, *H.Gaussen (1948)*, *G.Medinger (1956)*, *G.Medinger (1960)*, *M.Chaumont (1969)*, *M.Chaumont et C.Poquin (1971)*. La plupart des stations des bassins versants ont été arrêtés pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après (1962). Un bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien et ses données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente.

Pour cette étude, nous avons retenu des stations considérées représentatives pour le périmètre mais dont les périodes d'observations sont différentes d'une station à une autre, pour ne pas dire discordantes parfois. Notre bassin d'étude compte (11) stations pluviométriques réparties de la manière suivante.(Tabl n° 11 et Fig n° 12) :

Tabl n° 11: Caractéristiques des postes pluviométriques du bassin versant de la Medjerda.

Station	Code	Coordonnées			Appareil	Nbr. Année d'observation
		X	Y	Z		
Souk Ahras O.N.M	120101	967,25	342,25	590	pluviomètre	45 ans
Ruines de Khemissa	120104	945,5	332,5	900	pluviographe	45 ans
Ain Dhalaa	120202	940	248	983	pluviomètre	36 ans
Meskiana	120201	949,7	271	845	pluviomètre	24 ans
Tébessa	120301	981,9	247,2	890	pluviomètre	45 ans
Hammamet	120304	976,5	251,75	875	pluviomètre	45 ans
Ain Kissa	120306	992,1	257,4	105	pluviomètre	24 ans
Morsott	120318	979,7	273,7	728	pluviomètre	41 ans
Ouenza	120401	989	313	520	pluviomètre	44 ans
M'Daourouche	120403	960.85	320.65	870	pluviomètre	43 ans
Ain Zarga	120510	1003,65	274,95	850	pluviomètre	24 ans

3.4.2- Etude des précipitations:

Les précipitations constituent le premier facteur important dans le cycle de l'eau, leur distribution dans le temps et dans l'espace conditionne la forme des écoulements et les apports aux nappes.

Dans notre étude, nous avons retenu (11) stations pluviométriques qui se situent à l'intérieur du bassin versant de la Medjerda, ce nombre ; paraît, à priori, satisfaisant, mais il est en réalité, très faible comparé à la superficie du bassin. Par ailleurs, vu la qualité médiocre des observations, les données ne sont pas toujours dépourvues d'erreurs, de plus, faute de sécurité ces dernières années. Pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et déceler l'anomalie qui pourrait les affecter en vue de leur homogénéisation. Cette dernière opération est indispensable si l'on veut déterminer de façon plus ou moins précise les caractéristiques des précipitations (*Annexe n°9*).

3.4.2.1- Homogénéisation des données pluviométriques :

Les méthodes statistiques d'analyse des séries pluviométriques exigent de celle-ci une homogénéité de leurs composants. Or, bien souvent, dans la pratique, on est amené à travailler dans des conditions qui interdisent l'utilisation directe des données brutes, soit que les données sont défectueuses, ou bien la période d'observation d'une station est trop courte pour que les données puissent être traitées statistiquement.

a- Méthode d'homogénéisation :

La méthode utilisée pour l'homogénéisation est la régression linéaire simple. Il s'agit de prendre les postes deux à deux, situés dans la même région climatique et à une distance relativement faible. Le but de la régression est l'estimation d'un caractère correctif en fonction d'un autre. Sur un diagramme on représente un nuage de point et par ajustement on cherche une courbe de régression qui suit une fonction mathématique résumant la dispersion du nuage de point. Chaque point étant positionné sur un graphe selon les valeurs reportées en abscisse par la variable (X), on cherche ainsi à définir le degré de relation entre les deux séries. On calcule un coefficient de correction (K_{xy}^r) linéaire si la dépendance est forte. Le fait de connaître (X) permet de déterminer Y, car $Y=f(X)$. La formule qui permet de connaître le coefficient de corrélation linéaire est la suivante :

$$K_{xy}^r = \frac{\sum[(x_i - m_x^k)(y_i - m_y^k)]}{(k - 1)(\delta_x^k - \delta_y^k)}$$

$$m_x^k : \text{Moyenne des } x = \frac{\sum x_i}{K}$$

$$\delta_x^k : \text{Ecart type des } x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x^k)^2}{k-1}}$$

$$m_y^k : \text{Moyenne des } y = \frac{\sum y_i}{K}$$

$$\delta_y^k : \text{Ecart type des } y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - m_y^k)^2}{k-1}}$$

K : Nombre de valeurs communes d'observation.

Pour que les valeurs de (K_{xy}^r) soient significatives en fonction du nombre de couples utilisés. On utilise la table de Fisher des valeurs critiques du coefficient de corrélation (Fig n° 15). Si la corrélation est significative, on peut écrire l'équation de la droite de régression :

$$Y_x = m_y^k + k_{xy}^r \frac{\delta_y^k}{\delta_x^k} (x - m_x^k)$$

Ou : $Y(x) = ax + b$

$$a = k_{xy}^r \frac{\delta_y^k}{\delta_x^k}$$

et

$$b = m_y^k - m_x^k k_{xy}^r \frac{\delta_y^k}{\delta_x^k}$$

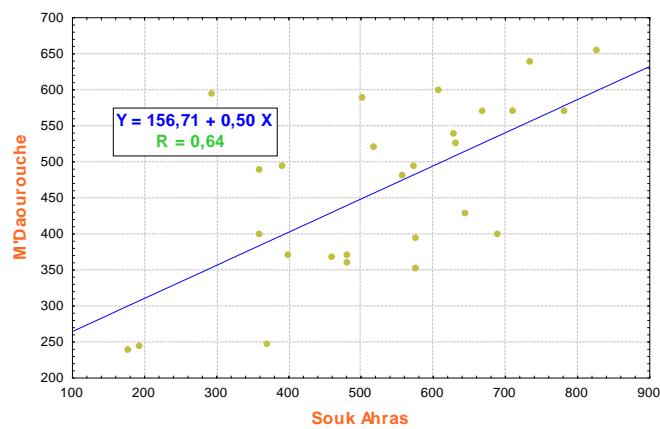
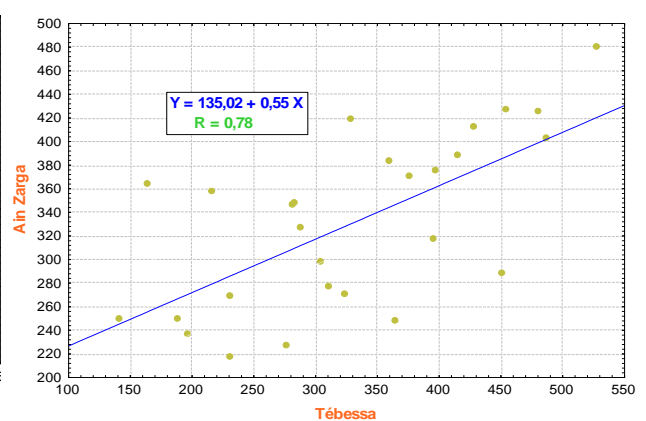
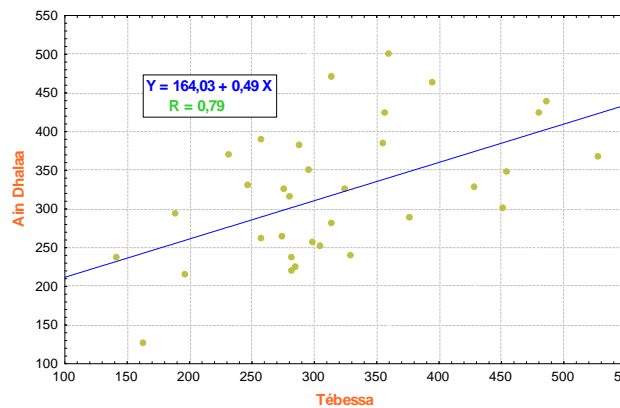
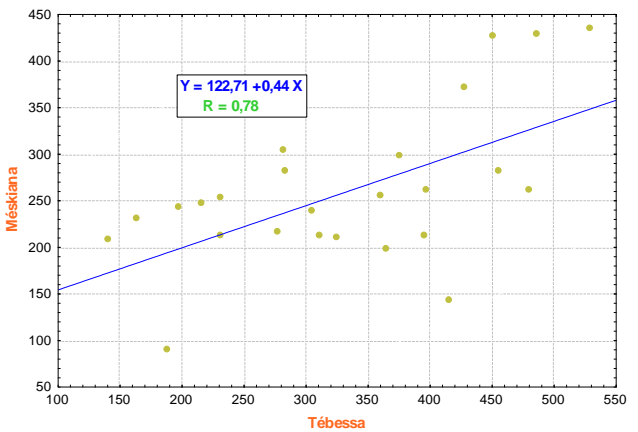
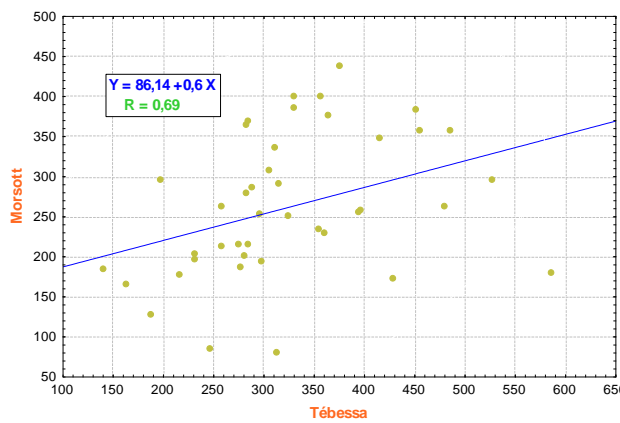
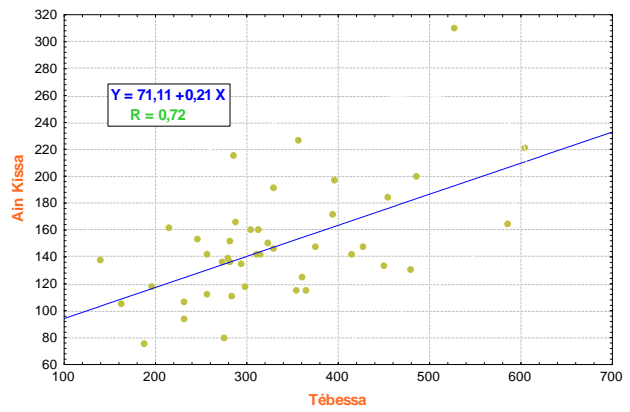
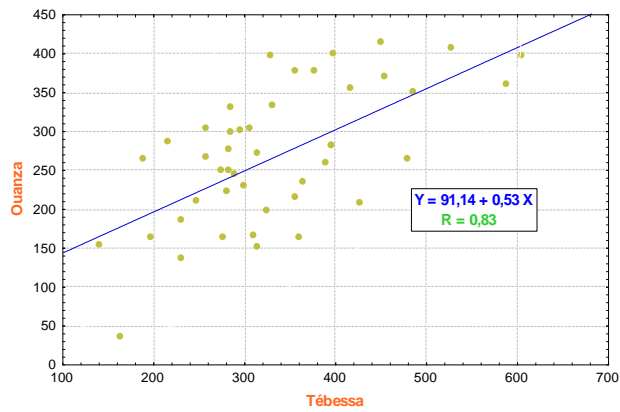


Fig n° 15 : Régression linéaire à l'échelle annuelle des précipitations (différentes stations)

3.4.2.2- Variations spatio-temporelles des précipitations :

a- Variation mensuelle des précipitations :

Les précipitations constituent le premier facteur important dans le cycle de l'eau, leur distribution dans le temps et dans l'espace conditionne la forme des écoulements et les apports aux nappes. La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionne une relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement et par la même le régime des cours d'eau. Autrement dit que les valeurs moyennes mensuelles relatives à la période (1969/2014), traduisent bien les variations mensuelles et saisonnières de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle (*Tabl n° 12*).

Tabl n° 12 : Précipitations moyennes mensuelles période (1969-2014).

Stations	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy (mm)
Souk Ahras	32.7	39.4	57.1	82.1	82.3	61.2	69.8	58.1	41.3	15.1	7.3	15.9	562.3
R. Khemissa	39.7	37.4	50.4	72.2	69.9	52.8	56.9	46.4	33.3	12.9	1.8	9.17	483.8
Ain Dhalaa	38.2	27.9	39.2	23.1	30.45	24.8	29.3	24.3	34.8	24.8	11.7	20	300.0
Meskiana	30.9	25.8	24.7	19.9	26.3	15.8	22.1	27.4	35.9	17.1	5.1	18.4	269.3
Tébessa	42.9	38.1	30.1	28.5	29.7	27.6	41.9	36.9	36.9	27.5	13.5	25.6	379.1
Hammamet	29.4	24.7	24.9	23.2	25.8	15.3	28.3	21.4	39.9	24.3	15.3	21.5	294.1
Ain Kissa	17.1	14.5	14.9	11.9	13.9	11.9	14.9	14.5	15.1	12.1	6.1	11.1	158.1
Morsott	30.5	22.5	24.9	21.3	27.7	24.2	23.7	23.4	27.6	16.1	5.6	13.5	268.8
Ouenza	29.3	20.6	22.9	17.4	21.8	19.6	27.8	29.6	36.1	19.1	7.3	13.4	264.9
M'Daourouche	26.4	30.9	31.1	40.9	45.1	41.6	44.8	43.3	32.6	16.9	7.5	14.8	376.13
Ain Zarga	32.5	26.9	30.9	27.8	27.4	18.2	31.6	39.5	37.9	18.8	9.6	17.4	318.3

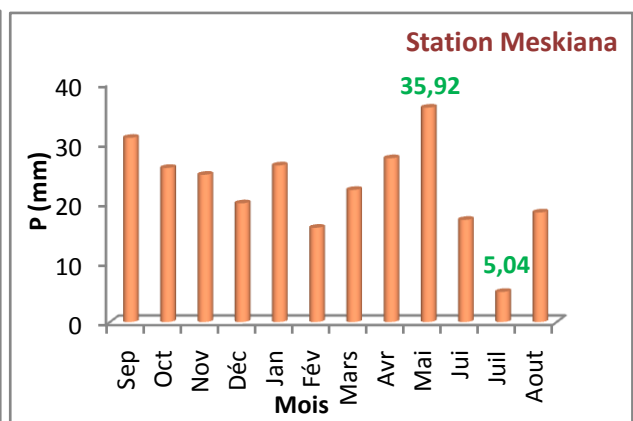
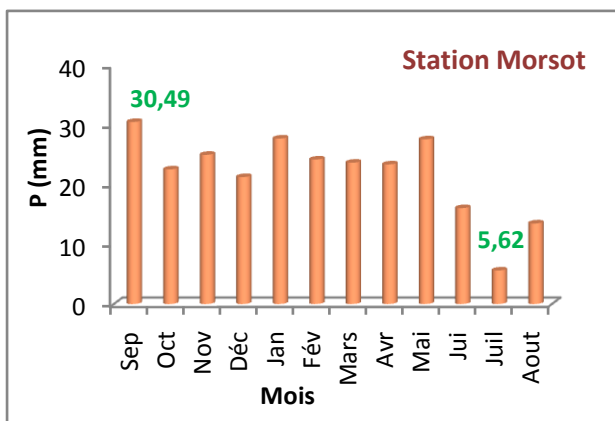
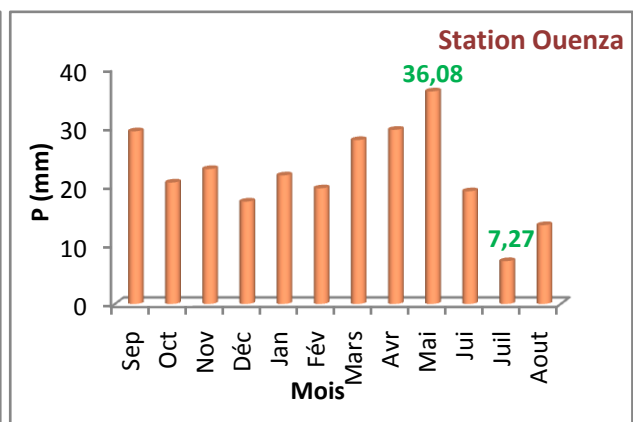
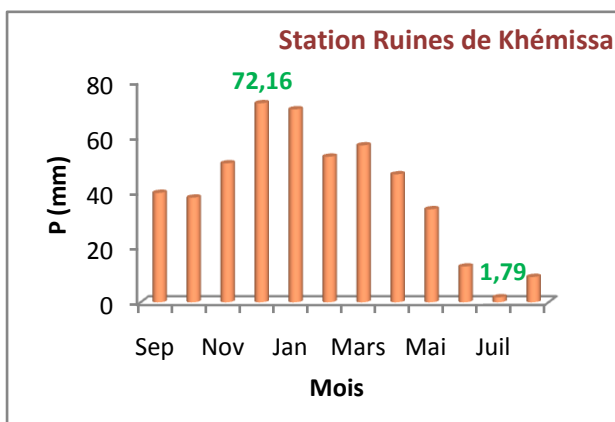
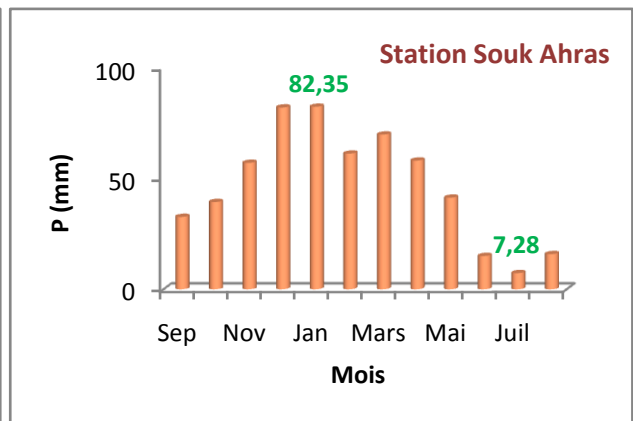
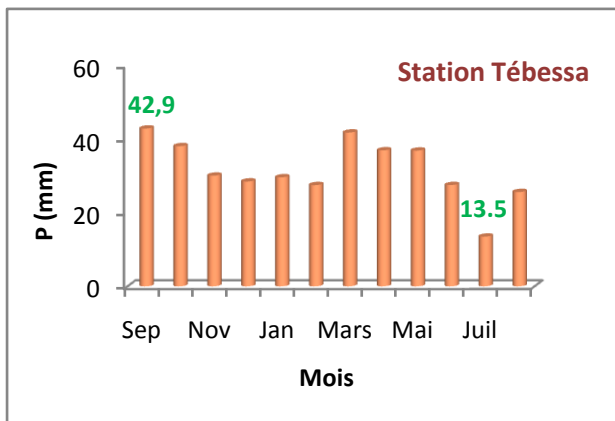


Fig n°16a : Précipitations moyennes mensuelles dans le Bassin versant de la Medjerda.

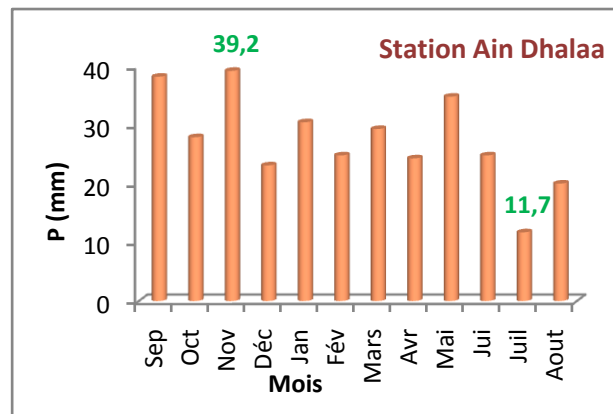
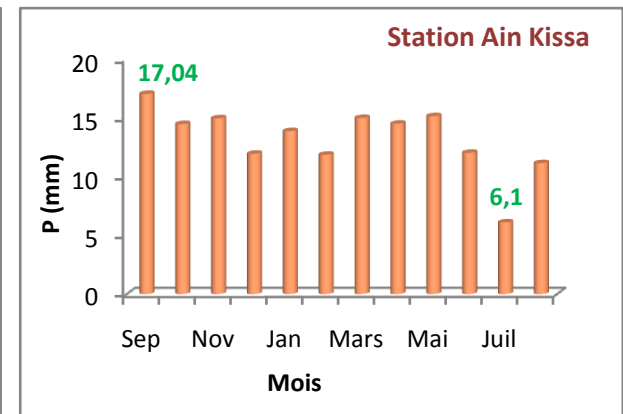
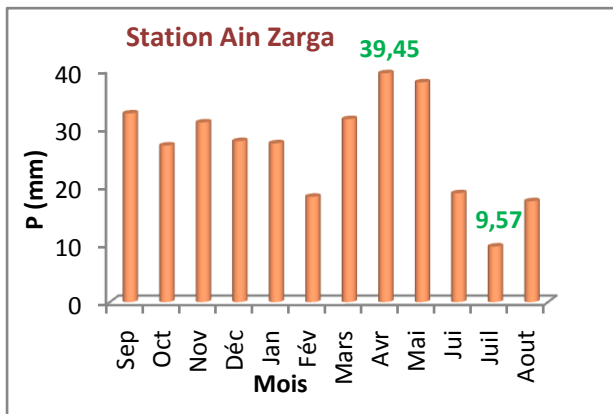
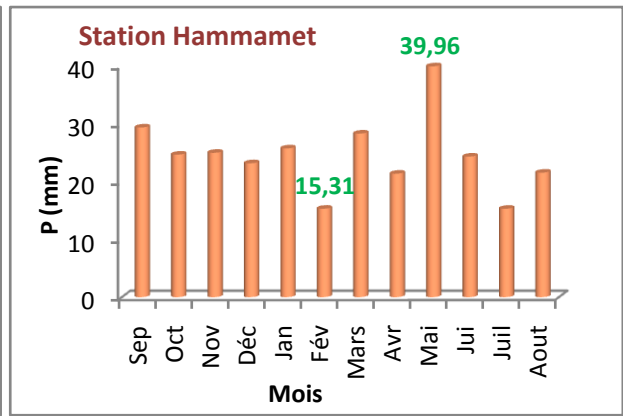
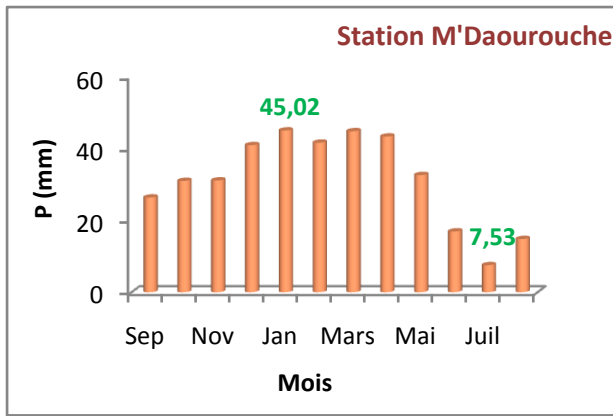


Fig n° 16b: Précipitations moyennes mensuelles dans le Bassin versant de la Medjerda.

L'histogramme de la variation mensuelle des précipitations au niveau du bassin versant de la Medjerda (*Fig n°16 a et 16 b*) révèle deux périodes distinctes :

- Une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué.
- Une période humide qui correspond au reste de l'année ; remarque, cette période pluvieuse est caractérisée elle aussi par une succession d'un mois humide qui se situe soit en hiver (décembre ou février) ou au printemps pendant le mois de mars. L'autre mois relativement secs sont représentés par les mois de juillet et Août.

a- Variation saisonnière des précipitations :

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles
 automne : (Septembre, Octobre, Novembre), l'hiver :(Décembre, Janvier Février), printemps :
 (Mars, Avril, Mai), été : (Juin, Juillet, Aout). (*Tabl n° 13*).

Tabl n° 13: Variations saisonnières des précipitations dans le bassin de la Medjerda.

Stations	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Souk Ahras	129.1	21.28	225.6	37.2	56.6	9.3	38.2	6.3
R .Khemissa	127.9	26.45	194.9	40.28	136.9	28.31	23.9	4.94
Ain Dhalaa	105.3	35.1	78.4	26.17	88.4	29.47	56.5	18.83
Meskiana	81.4	30.22	61.9	22.99	85.5	31.74	18.4	6.81
Tébessa	111.1	29.3	85.7	22.59	115.7	30.51	66.7	17.58
Hammamet	79.1	26.87	64.2	21.84	89.6	30.48	61.2	20.79
Ain Kissa	46.5	29.39	37.7	23.83	44.6	28.23	29.3	18.51
Morsott	78.02	29.03	73.2	27.22	74.6	27.76	35.2	13.08
Ouenza	72.8	27.49	58.8	22.2	93.53	35.28	39.8	15.02
M'Daourouche	88.5	23.52	42.5	11.31	120.8	32.1	39.3	10.44
Ain Zarga	90.5	28.42	73.3	23.02	108.9	34.2	45.7	14.36

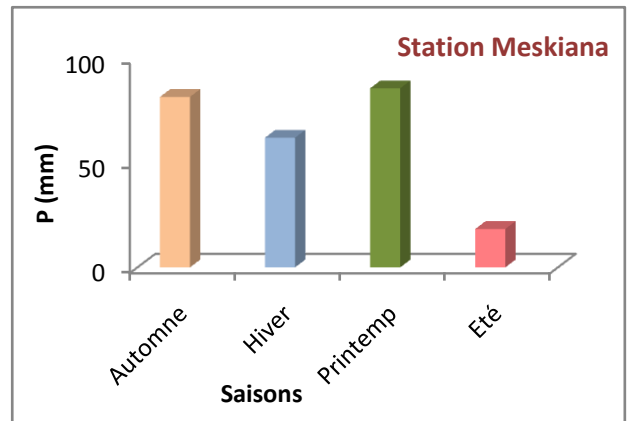
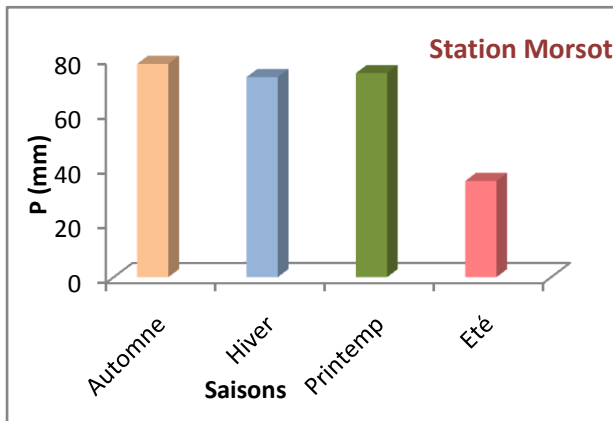
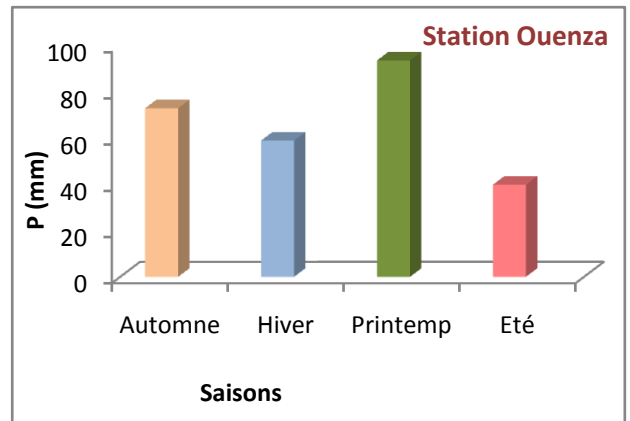
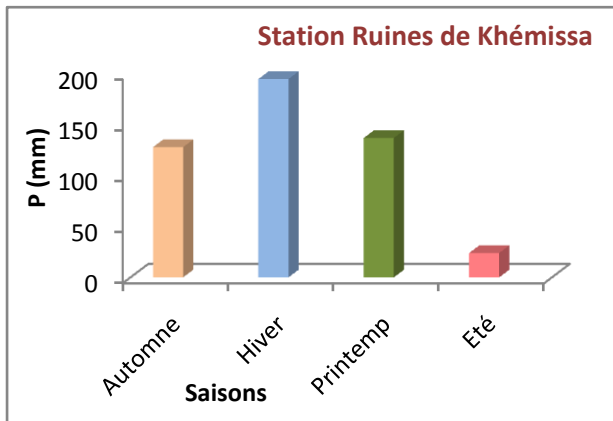
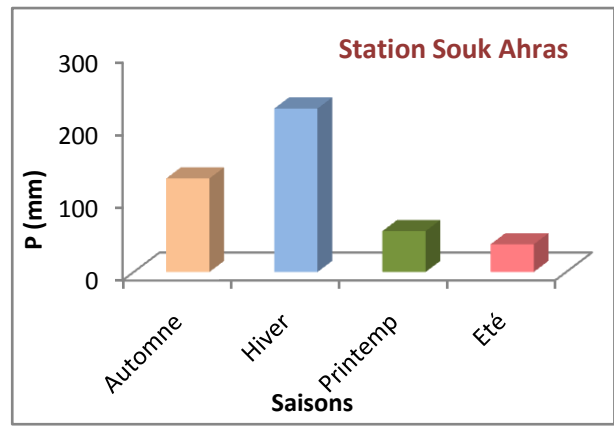
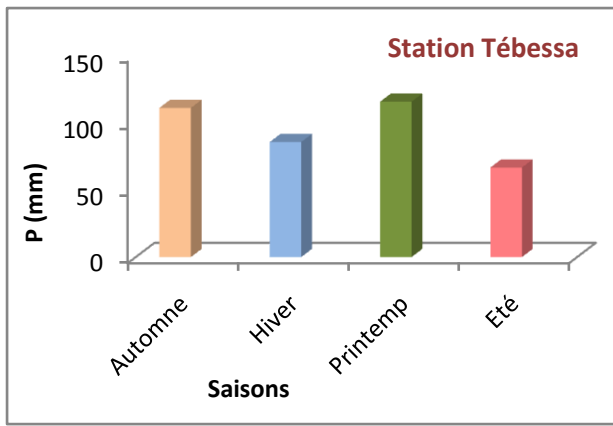


Fig n° 17 a: Variation saisonnière des précipitations dans le bassin versant de la Medjerda

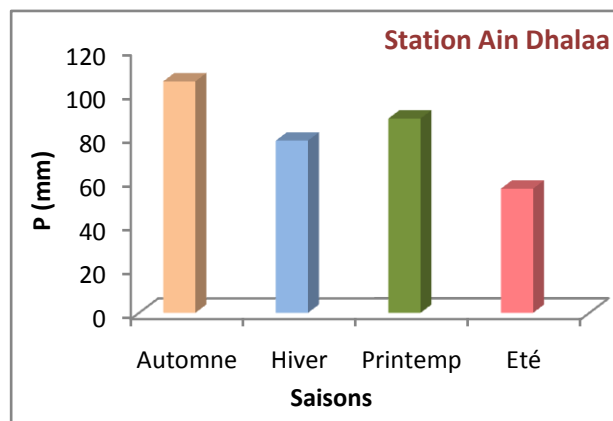
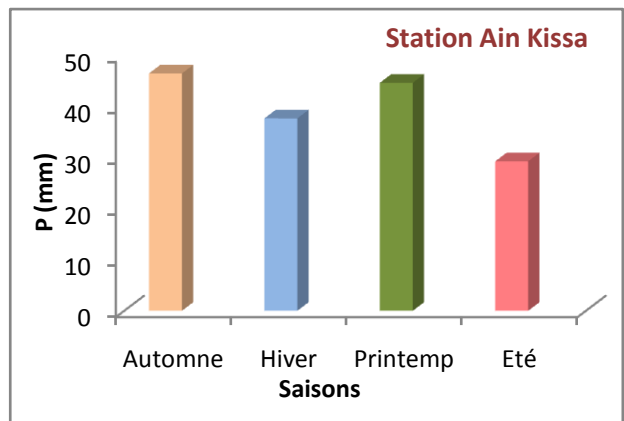
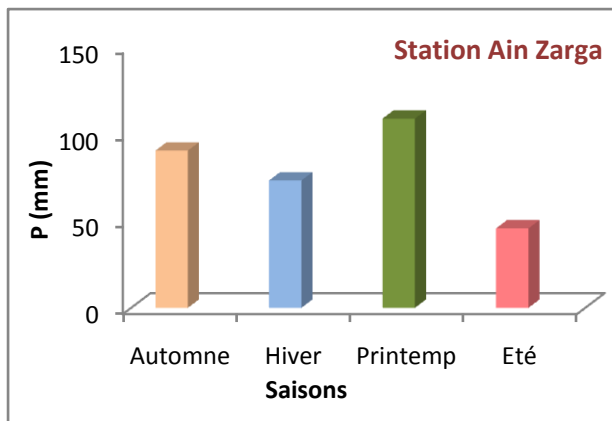
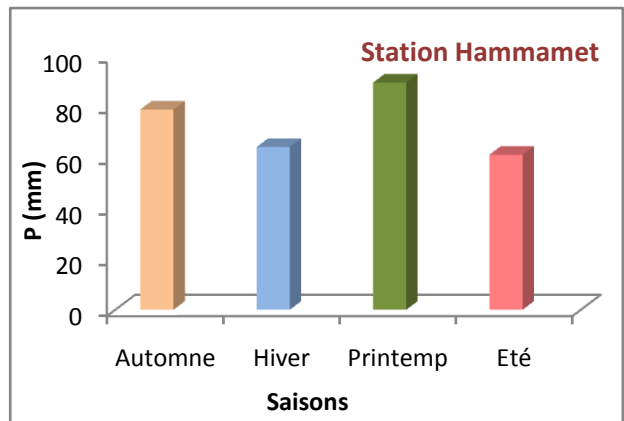
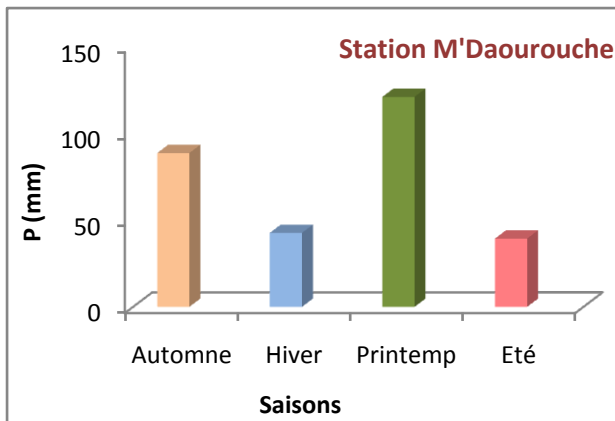


Fig n° 17 b : Variation saisonnière des précipitations dans le bassin versant de la Medjerda

L'examen des résultats obtenus de la distribution saisonnière des précipitations (Fig n°17 a et 17 b) montre que l'organisation des saisons n'est pas homogène dans la région d'étude. Cette variation saisonnière révèle que la partie septentrionale est plus arrosée (plus de 30% du total annuel) que la partie méridionale (15% du total annuel) du bassin versant de la Medjerda. Cela est dû principalement, au relief, couvert végétal et aussi au régime pluviométrique propre à chaque secteur géographique (Fig n° 18 a et 18 b).

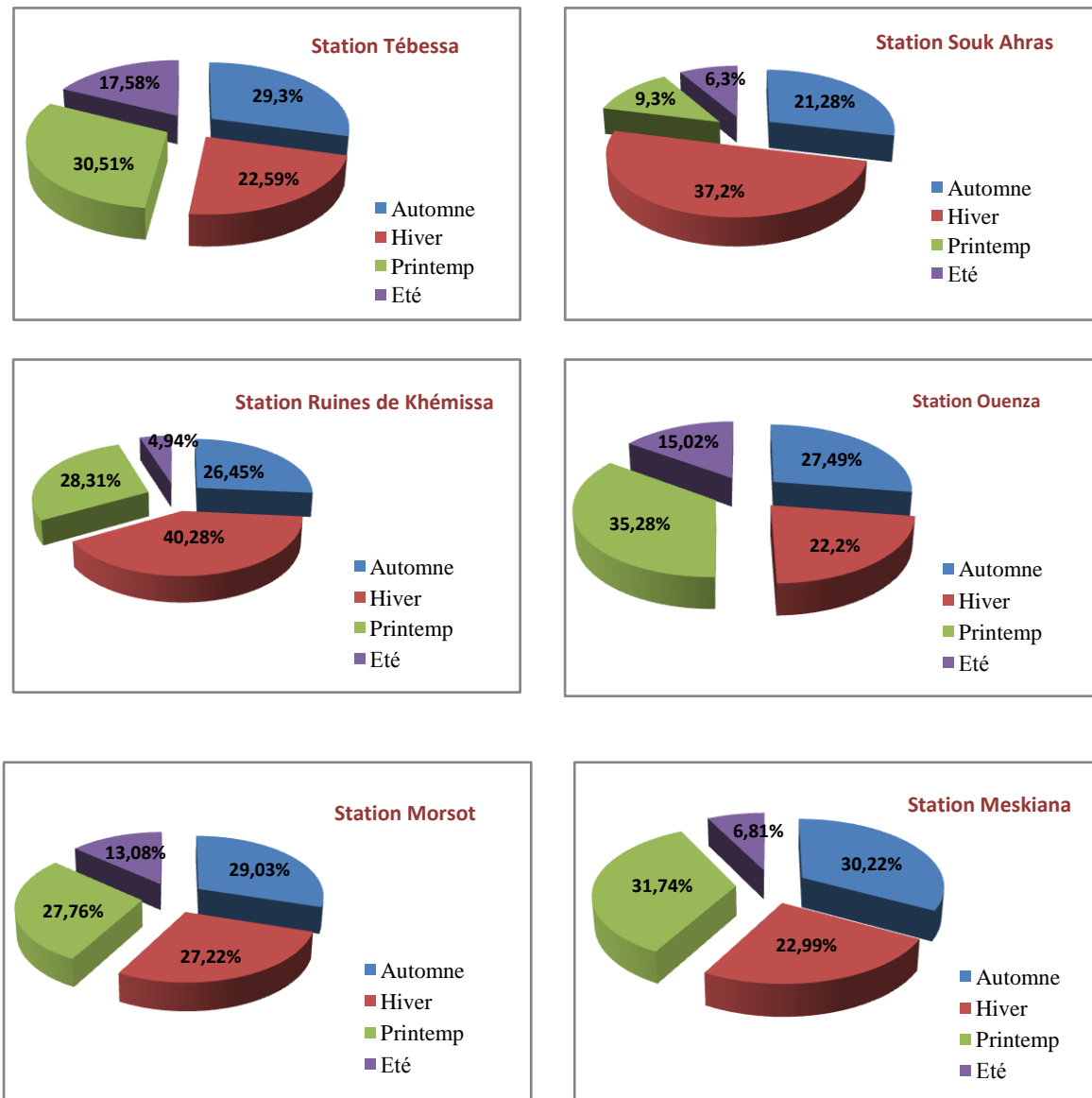


Fig n° 18 a : Répartition saisonnière des précipitations du bassin versant de la Medjerda.

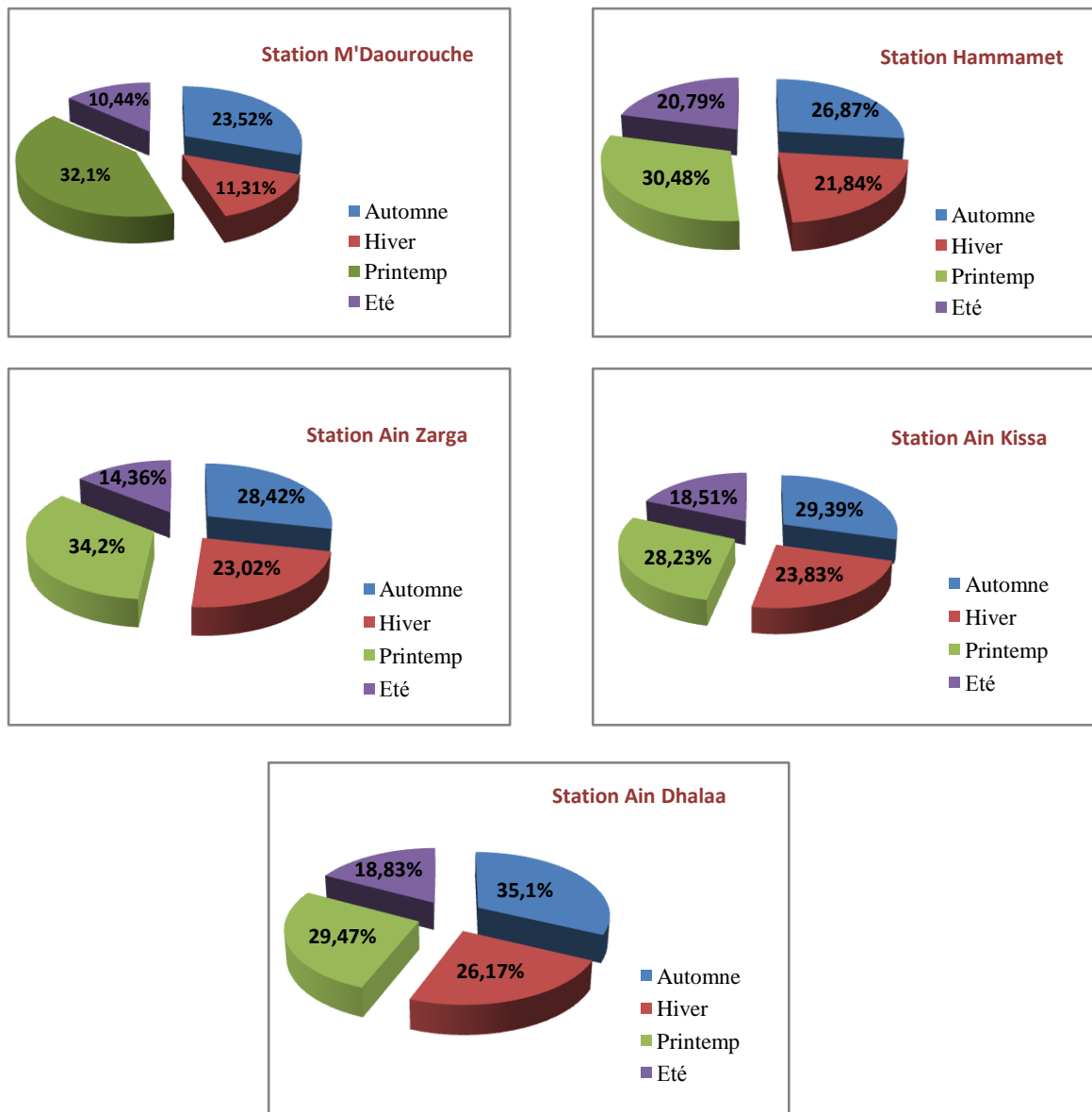


Fig n° 18 b: Répartition saisonnière des précipitations du bassin versant de la Medjerda.

a- Variation interannuelle des précipitations :

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 45 ans (1969-2014), montre que l'année (1969) est l'année la plus arrosée avec (922.8 mm/an) au niveau de la station de Souk Ahras (Partie Nord). Par contre l'année (1996) est la plus sèche avec (73.69 mm/an) au niveau de la station d'Ain Kissa (Partie sud). Cette différence réside dans l'effet de l'altitude (Tabl n°14), (Fig n°19 a, 19 b).

Tabl n° 14 : caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda.

Stations	Moyenne (mm)	Max (Année)	Min (Année)	Nbre d'années > moy	P_M/P_m
Souk Ahras O.N.M	562.30	922.8 (1969)	178.8 (1987)	20	5.16
Ruines de Khemissa	483.77	844.0 (2002)	249.8 (1989)	25	3.38
Ain Dhalaa	300.00	596.1 (2006)	95.6 (1993)	18	6.24
Meskiana	269.32	434.0 (2003)	88.6 (1996)	10	4.9
Tébessa	379.09	606.5 (1972)	142.3 (2000)	13	4.26
Hammamet	294.14	481.7 (1969)	206.7 (2009)	15	2.33
Ain Kissa	158.07	322.1 (1976)	73.69 (1996)	14	4.37
Morsott	268.80	652.6 (1999)	79.8 (1985)	19	8.18
Ouenza	264.93	498.7 (1972)	136.0 (1993)	21	3.67
M'Daourouche	376.13	596.7 (1981)	203.4 (1992)	20	2.93
Ain Zarga	318.30	433.6 (2005)	165.6 (2000)	12	2.62

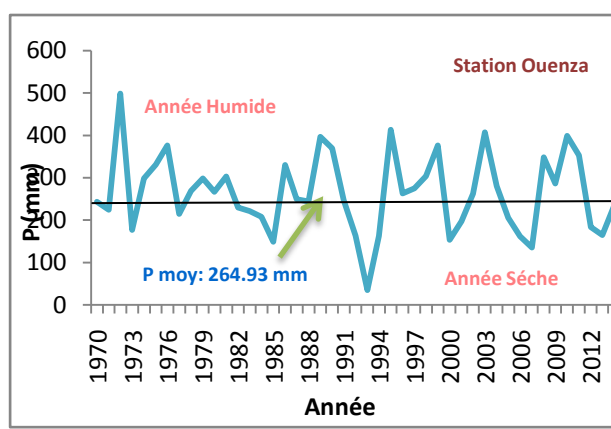
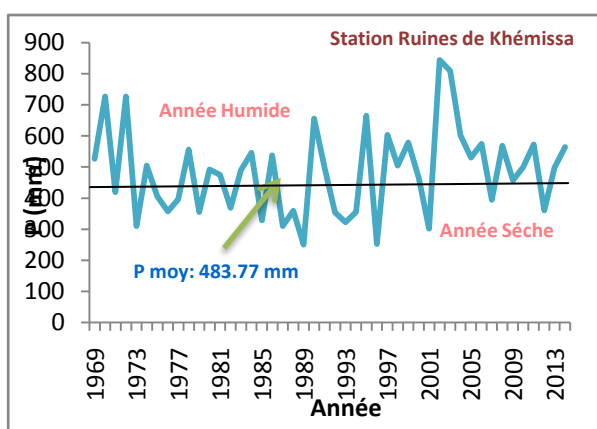
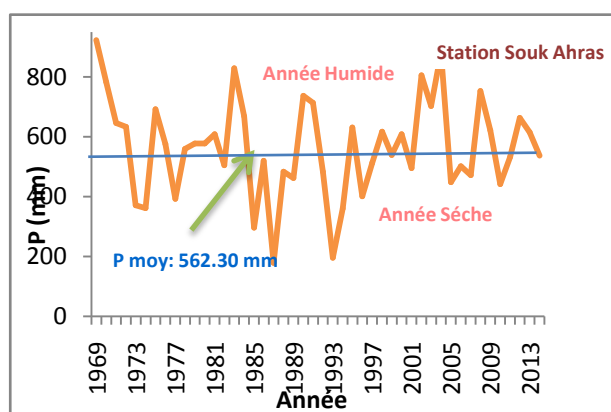
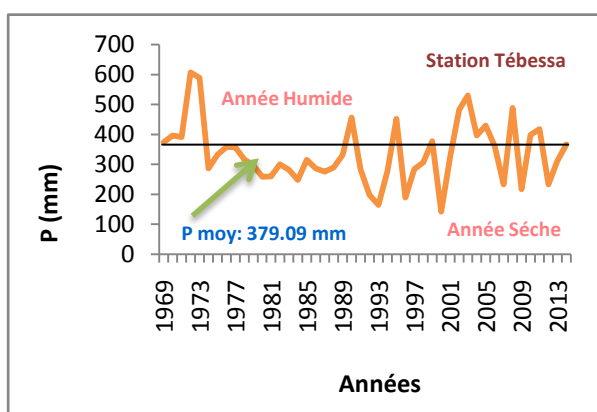


Fig n° 19 a: Variation interannuelle des précipitations bassin versant de la Medjerda.

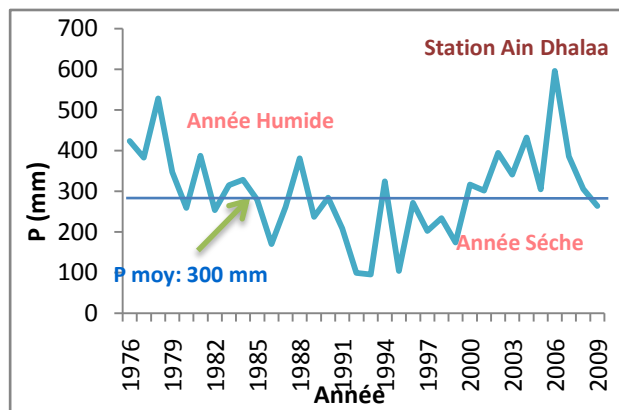
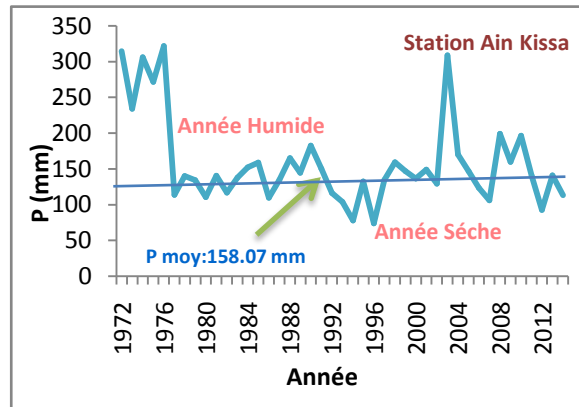
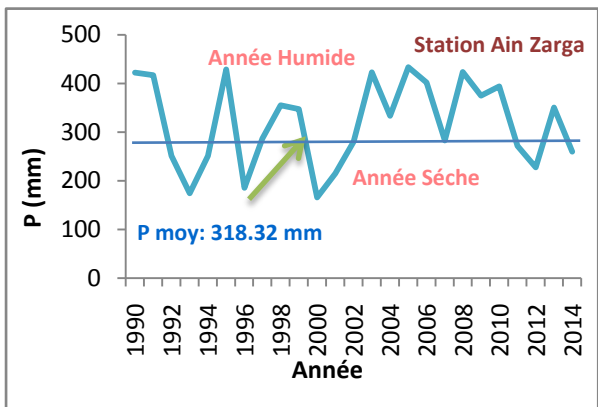
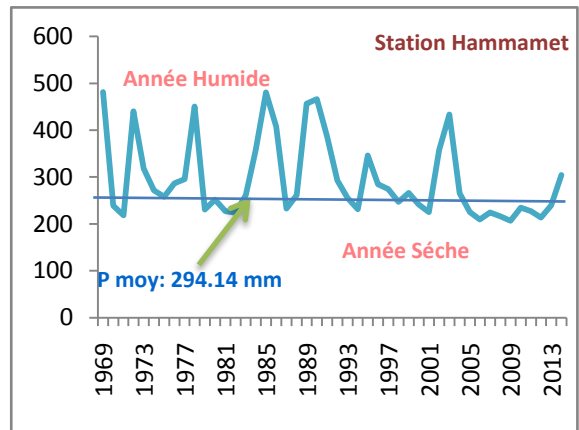
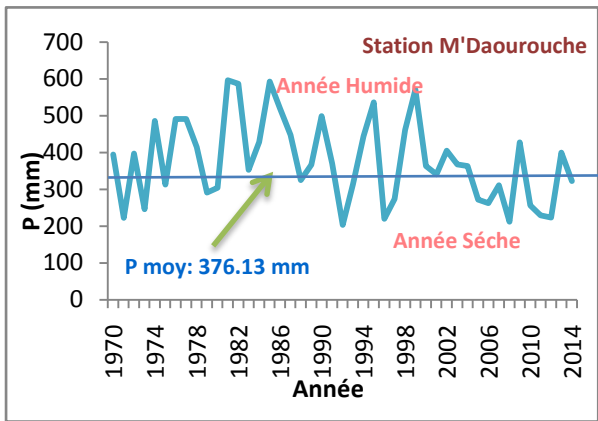
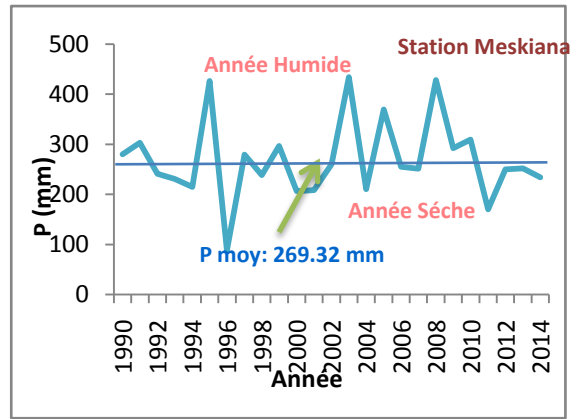
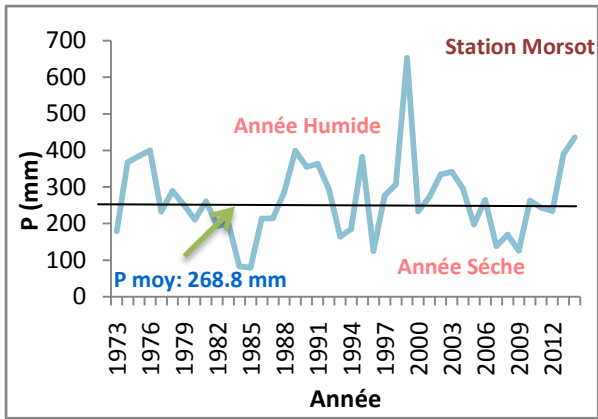


Fig n° 19 b : Variation interannuelle des précipitations bassin versant de la Medjerda.

3.4.2.3- Evaluation de précipitation moyenne dans le bassin :

Parmi les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des précipitations, à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues, à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, on peut citer la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen ou celle des d'isohyètes.

a- Moyenne arithmétique :

La méthode la plus simple qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées, s'applique uniquement si les stations sont bien réparties et si le relief du bassin est homogène (Tabl n° 15), (Fig n°20).

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{N} \text{ (mm)}$$

Avec:

P_i : précipitation moyenne annuelle à la station i.

N : nombre de station d'observation.

Tabl n°15 : Caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda.

Stations	Moyenne arithmétique (mm)
Souk Ahras O.N.M	562.3
Ruines de Khemissa	483.77
Ain Dhalaa	300.00
Meskiana	269.32
Tébessa	379.09
Hammamet	294.14
Ain Kissa	158.07
Morsott	268.80
Ouenza	264.93
M'Daourouche	376.13
Ain Zarga	318.32

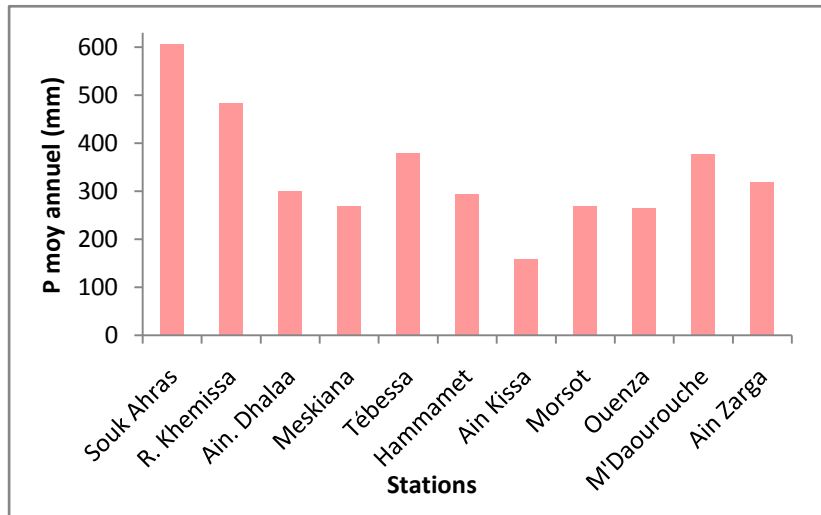


Fig n°20 : Précipitations moyennes annuelles des différentes stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda.

b- Méthode des isohyètes:

Les isohyètes sont des lignes d'égalé précipitation. Grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes, on peut tracer la carte en isohyètes (Fig n°21 et Annexe n°10). Lorsque la carte est tracée, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante (Tabl n°16) :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^k A_i P_i}{A} \quad \text{Avec :} \quad P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

P_{moy} : Précipitation moyenne sur le bassin.

A : Surface totale du bassin.

A_i : Surface entre deux isohyètes (i) et (i+1)

k : Nombre total des courbes.

P_i : Moyenne des précipitations entre deux isohyètes (i) et (i+1)

Tabl n°16 : Caractéristiques des précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda (méthode isohyète)

Isohyète	P_i	A_i (km ²)	A_i (%)	$P_i \cdot A_i$
inf 300	229.03	99.60	1.26	22811.39
300-400	350.00	5760.62	73.13	2016217.0
400-500	450.00	641.89	8.15	288850.5
500-600	550.00	487.04	6.18	267872
600-700	650.00	343.32	4.36	223158
700-800	750.00	400.43	5.08	300322.5
800-900	850.00	91.67	1.17	77919.5
sup 900	953.19	52.54	0.67	50080.6
Totale	/	7877.11	100	$P_{moy} = 412.24$

La carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin versant de la Médjerda (*Fig n°21*) représente un échantillon caractéristique au niveau de l'Est algérien. On constate aussi que la variation des précipitations à échelle du bassin versant et liée principalement à deux facteurs à savoir l'altitude et l'exposition.

Le bassin versant de la Medjerda présente diverses zones pluviométriques :

- Au Sud, une zone pluviométrique qui correspond à la partie la plus dominante du bassin versant. Sous l'effet des conditions topographiques et de l'éloignement de la mer apparaît une zone relativement homogène là où la pluie moyenne annuelle varie entre (300 mm) et (450 mm).
- Au Nord du bassin versant, l'altitude et les conditions topographiques jouent un rôle très important dans la variation des pluies moyennes annuelles remarquables (supérieur de 500 mm).

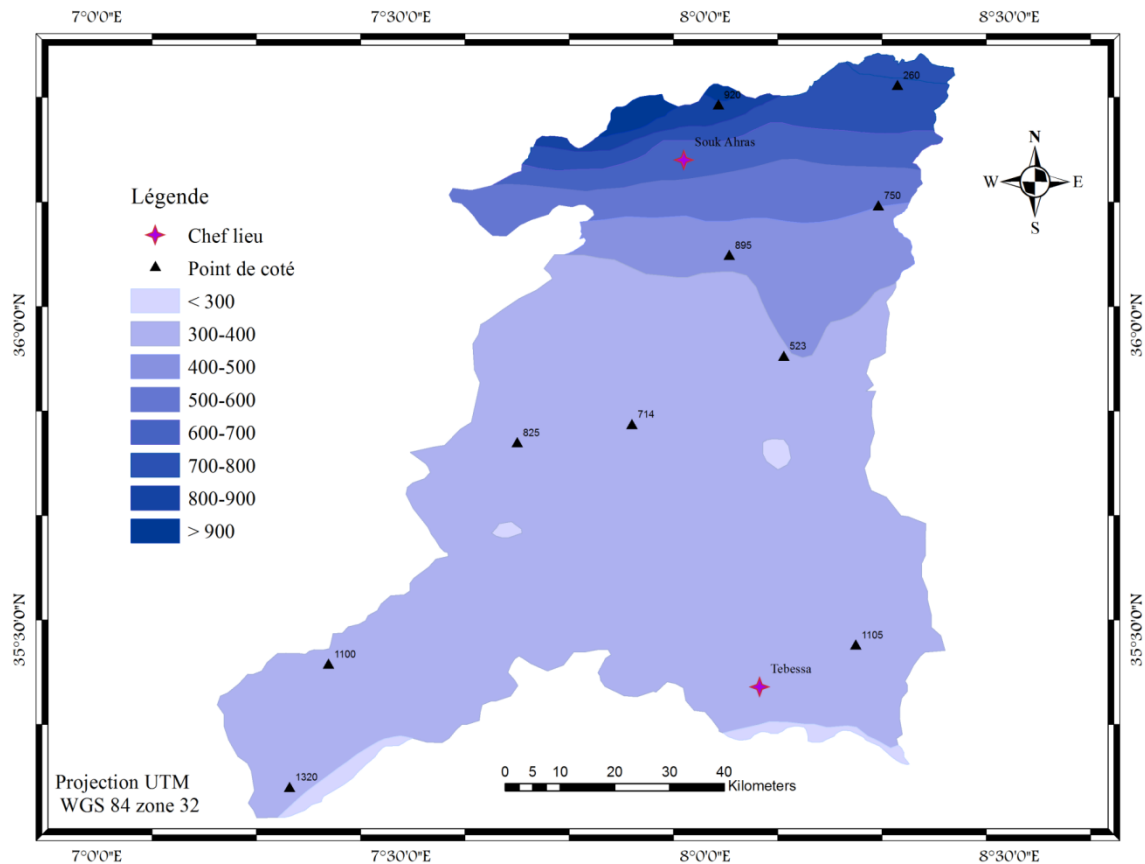


Fig n° 21: Carte des isohyète du Bassin Versant de la Medjerda.

3.4.2.4- Analyse statistique des séries pluviométriques :

a- Ajustement des précipitations annuelles :

Les séries pluviométriques utilisées dans cette analyse, sont ceux des (11) stations déjà citées dans le (Tabl n°13) L'analyse porte sur les précipitations allant de (1969 à 2014), soit 45 années d'observations. L'analyse statistique des données hydrométéorologiques vise à définir les régimes à travers certaines valeurs caractéristiques et représentatives. Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui a un rôle essentiel et décisif sur l'écoulement fluvial et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement. Les résultats de calcul de ces paramètres sont donnés dans le (Tabl n° 17).

Tabl n°17: Paramètres empiriques

Stations	Moyenne	Ecart type	CV
Souk Ahras O.N.M	562.3	162.58	0.29
Ruines de Khemissa	483.78	140.71	0.29
Ain Dhalaa	328.94	79.41	0.24
Meskiana	284.51	52.52	0.20
Tébessa	336.22	102.40	0.31
Hammamet	294.14	84.59	0.29
Ain Kissa	148.76	41.66	0.28
Morsott	287.17	83.73	0.29
Ouenza	268.74	85.83	0.32
M'Daourouche	437.34	107.55	0.24
Ain Zarga	301.96	70.66	0.23

Les valeurs du coefficient de variation ($Cv \leq 0,5$) pour les différentes stations, laissent penser que l'ajustement suit une loi normale (**Gauss**) (Fig n° 22 a et 22 b).

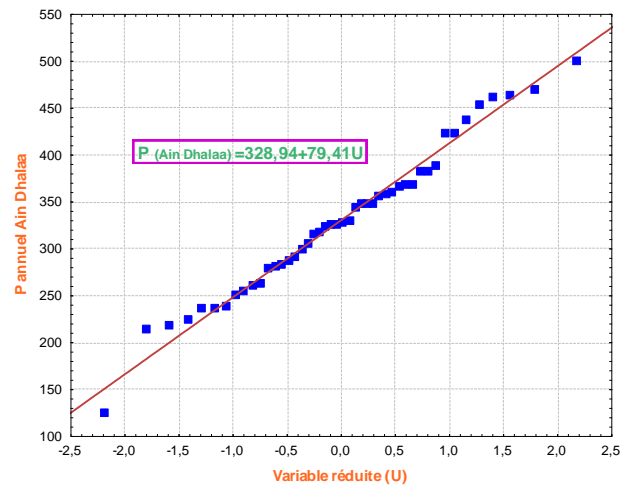
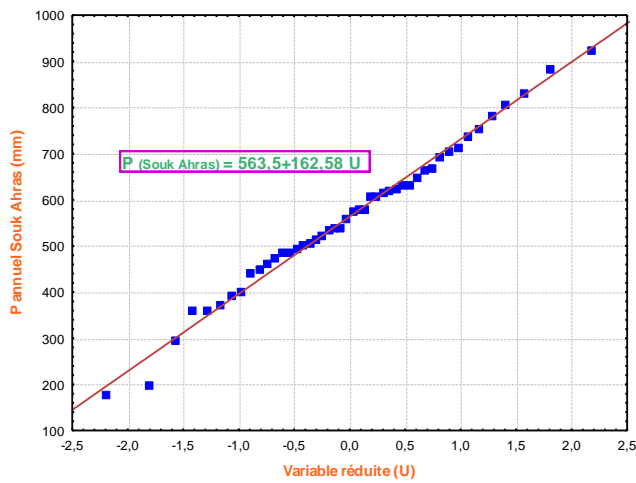
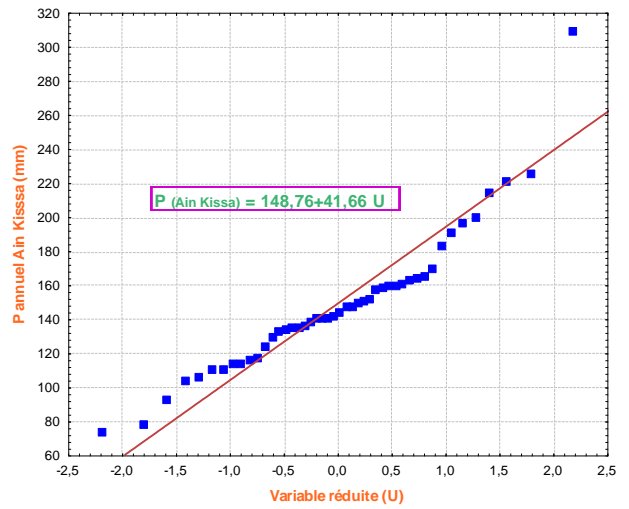
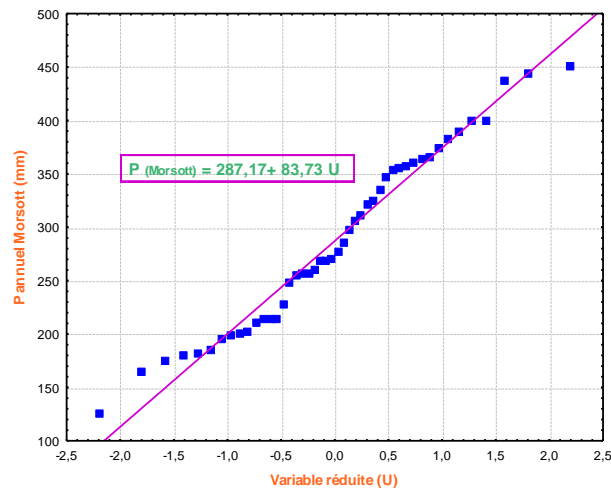
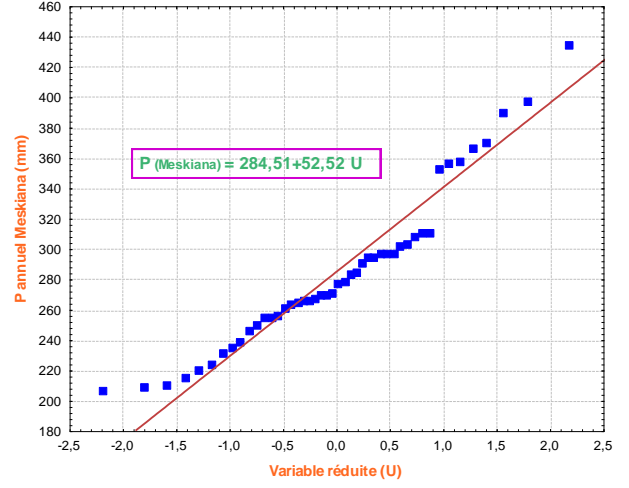
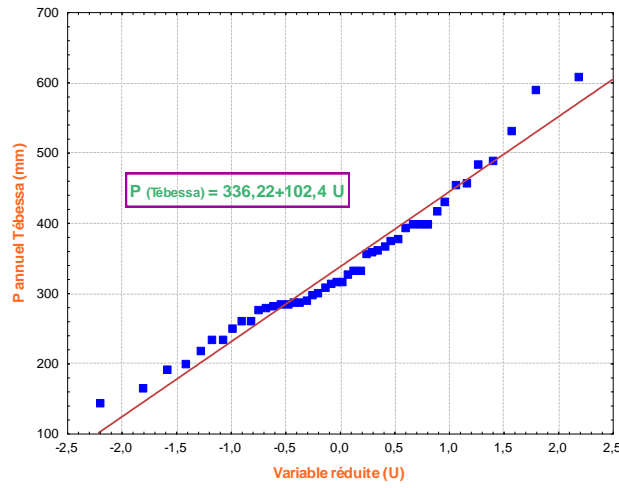


Fig n°22 a : Ajustement des précipitations moyennes annuelles des différentes stations de la Medjerda (1969-2014).

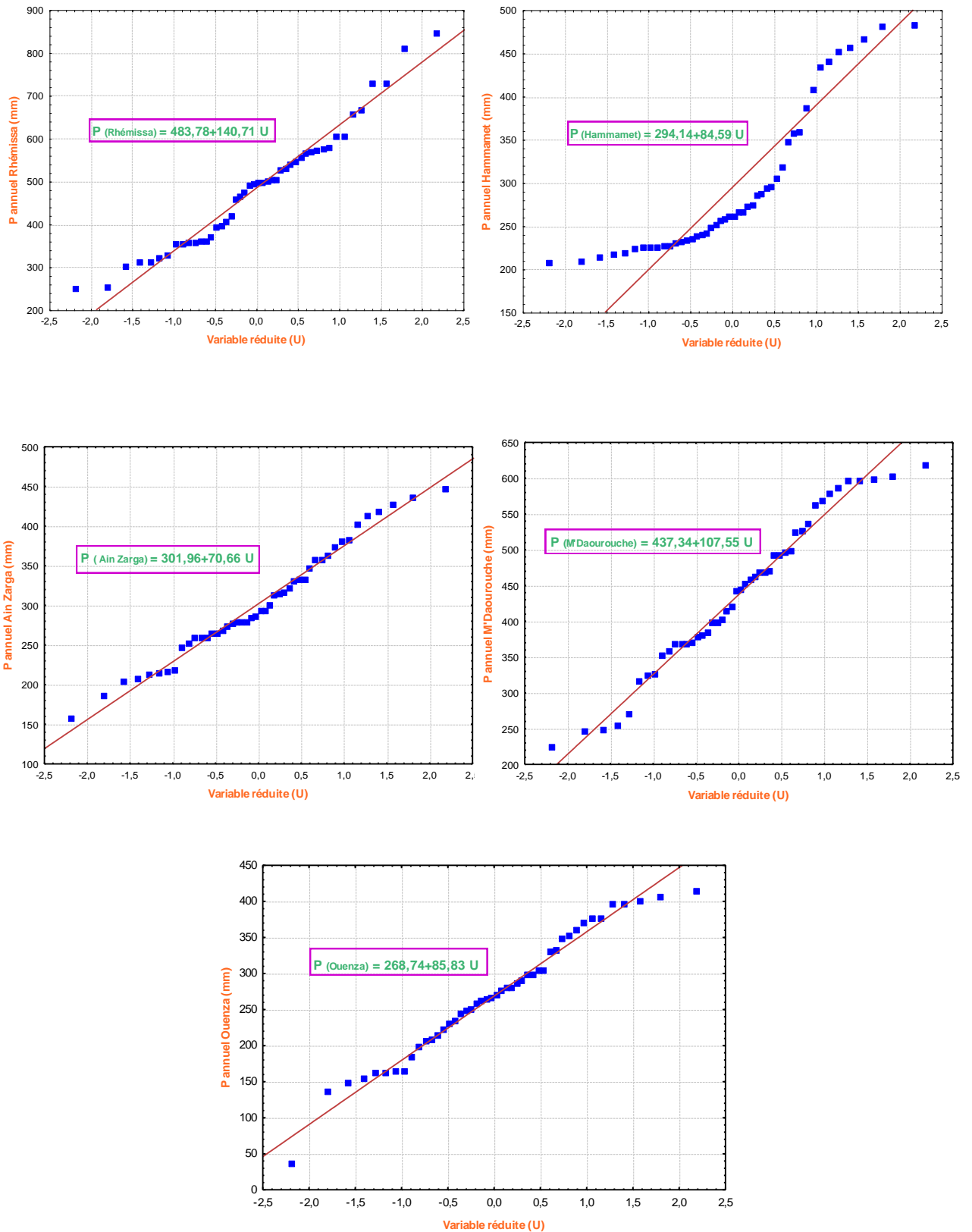


Fig n°22 b : Ajustement des précipitations moyennes annuelles des différentes stations de la Medjerda (1969-2014).

Pour confirmer encore plus cette adéquation, nous passons au test du chi deux (χ^2) de (K). Pearson considéré comme le plus pratique et le plus utilisé.

a.1 - Test d'adéquation :

L'adéquation est admise si le $P(x^2) \geq (\alpha)$ dont (α) : seuil du risque d'adéquation, choisi généralement égal à (0.05), il convient de choisir des découpages différents et de calculer le (x^2) minimal. L'adéquation est rejetée si le $P(x^2) \leq (\alpha)$.

Pour mettre en œuvre ce test, on découpe l'échantillon de n éléments, en (K) classes ($K \geq 4$), on considère (n_i), l'effectif observé et (np_i), l'effectif théorique ; on forme ainsi le terme suivant :

$$x^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

Les résultats obtenus de ce test sont présentés dans le (Tabl n°18) suivant :

Tabl n°18 : Résultat de calcul du (x^2) pour les différentes stations

Stations	Khi 2 (x^2)	P	df
Souk Ahras O.N.M	2.89	0.58	4 (ajusted)
Ruines de Khemissa	0.78	0.86	3 (ajusted)
Ain Dhalaa	0.23	0.89	2 (ajusted)
Meskiana	4.28	0.23	3 (ajusted)
Tébessa	6.59	0.08	3 (ajusted)
Hammamet	6.32	0.07	3 (ajusted)
Ain Kissa	6.81	0.15	4 (ajusted)
Morsott	3.31	0.35	3 (ajusted)
Ouenza	2.26	0.32	2 (ajusted)
M'Daourouche	6.51	0.10	3 (ajusted)
Ain Zarga	2.76	0.43	3 (ajusted)

Les valeurs du (χ^2) calculée, d'après le (Tabl n°18), sont inférieures à la valeur du (χ^2) théorique pour un degré de liberté ν (**df**) qui varie entre (2 et 4) avec un seuil a risque tolérée de (5%).Donc, on peut dire que l'ajustement d'une loi normale est confirmé pour les différentes stations de la Medjerda.

a.2- L'intervalle de confiance :

Les intervalles de confiances correspondant aux degrés de confiances (α %) sont résumés dans le (Tabl n° 19).

Tabl n° 19: Intervalle de confiance pour les différentes stations du Bassin versant.

Stations	$\alpha = 90 \%$	$\alpha = 95 \%$	$\alpha = 99 \%$
Souk Ahras O.N.M	$531.28 \leq \bar{P} \leq 593.32$ $140.65 \leq \delta \leq 184.51$	$514.81 \leq \bar{P} \leq 609.79$ $134.31 \leq \delta \leq 190.85$	$506.57 \leq \bar{P} \leq 618.03$ $122.84 \leq \delta \leq 202.32$
Ruines de Khemissa	$461.53 \leq \bar{P} \leq 506.03$ $121.73 \leq \delta \leq 159.69$	$449.18 \leq \bar{P} \leq 518.38$ $116.25 \leq \delta \leq 165.17$	$435.13 \leq \bar{P} \leq 532.43$ $106.31 \leq \delta \leq 175.11$
Ain Dhalaa	$313.79 \leq \bar{P} \leq 344.09$ $68.70 \leq \delta \leq 90.12$	$309.41 \leq \bar{P} \leq 348.47$ $65.60 \leq \delta \leq 93.22$	$301.48 \leq \bar{P} \leq 356.40$ $60.00 \leq \delta \leq 98.82$
Meskiana	$274.49 \leq \bar{P} \leq 294.53$ $45.44 \leq \delta \leq 59.60$	$271.60 \leq \bar{P} \leq 297.42$ $43.39 \leq \delta \leq 61.65$	$266.35 \leq \bar{P} \leq 302.67$ $39.69 \leq \delta \leq 65.35$
Tébessa	$316.69 \leq \bar{P} \leq 355.75$ $88.59 \leq \delta \leq 116.21$	$311.04 \leq \bar{P} \leq 361.40$ $84.60 \leq \delta \leq 120.20$	$300.82 \leq \bar{P} \leq 371.62$ $77.37 \leq \delta \leq 127.43$
Hammamet	$276.59 \leq \bar{P} \leq 311.69$ $73.18 \leq \delta \leq 96.00$	$273.34 \leq \bar{P} \leq 314.94$ $69.88 \leq \delta \leq 99.30$	$264.89 \leq \bar{P} \leq 323.39$ $63.91 \leq \delta \leq 105.27$
Ain Kissa	$140.82 \leq \bar{P} \leq 156.70$ $36.04 \leq \delta \leq 47.28$	$138.52 \leq \bar{P} \leq 159.00$ $34.42 \leq \delta \leq 48.90$	$134.36 \leq \bar{P} \leq 163.16$ $31.48 \leq \delta \leq 51.84$
Morsott	$271.20 \leq \bar{P} \leq 303.14$ $72.44 \leq \delta \leq 95.02$	$266.58 \leq \bar{P} \leq 307.76$ $69.17 \leq \delta \leq 98.29$	$258.23 \leq \bar{P} \leq 316.11$ $63.26 \leq \delta \leq 104.20$
Ouenza	$252.37 \leq \bar{P} \leq 285.11$ $74.26 \leq \delta \leq 97.4$	$247.64 \leq \bar{P} \leq 289.84$ $70.91 \leq \delta \leq 100.75$	$239.07 \leq \bar{P} \leq 298.41$ $64.85 \leq \delta \leq 106.96$
M'Daourouche	$416.82 \leq \bar{P} \leq 457.86$ $93.04 \leq \delta \leq 122.06$	$410.89 \leq \bar{P} \leq 463.79$ $88.86 \leq \delta \leq 126.24$	$400.16 \leq \bar{P} \leq 474.52$ $81.26 \leq \delta \leq 133.84$
Ain Zarga	$288.48 \leq \bar{P} \leq 315.44$ $61.13 \leq \delta \leq 80.19$	$284.59 \leq \bar{P} \leq 319.33$ $58.38 \leq \delta \leq 82.94$	$277.53 \leq \bar{P} \leq 326.39$ $53.39 \leq \delta \leq 87.93$

a.3- Calcul des précipitations pour des périodes de récurrence donnée :

On détermine les valeurs des précipitations pour les périodes de récurrence donnée (p_f)

(Tabl n° 20) a partir de l'équation de la variable réduite de Gauss selon la formule suivante :

$$p_f = \bar{p} + u_f \delta$$

D'où :

p_f : Pluie annuelle fréquentielle.

\bar{p} : Pluie moyenne annuelle.

u_f : Variable réduite de Gauss.

δ : Ecart type.

Tabl n° 20 Valeurs des précipitations pour des périodes de récurrences données.

Stations	T= 2 ans F=0.5 u= 0.00	T= 10 ans F=0.90 u= 1.28	T= 50 ans F=0.98 u= 2.05	T= 100 ans F=0.99 u= 2.32
Souk Ahras O.N.M	562.30	770.40	895.58	939.48
Ruines de Khemissa	483.78	663.88	772.23	810.22
Ain Dhalaa	328.94	430.58	491.73	513.17
Meskiana	284.51	351.73	392.17	406.35
Tébessa	336.22	467.29	546.14	573.78
Hammamet	294.14	402.41	467.54	490.38
Ain Kissa	148.76	202.08	234.16	245.41
Morsott	287.17	394.34	458.81	481.42
Ouenza	268.74	378.60	444.69	467.86
M'Daourouche	437.34	575.00	657.81	686.85
Ain Zarga	301.96	392.40	446.81	465.89

a- Analyse statistique des précipitations extrêmes :

L'étude des pluies journalières maximales permettent d'exploiter les informations recueillies pour établir toute relation de causalité par l'interprétation et l'analyse.

Dans cette étude, on s'est basé sur les données fournies par les (11) stations existant dans le périmètre de la zone d'étude, avec une durée de 45 ans (1969 -2014).

b.1- Ajustement a une loi de Gauss :

La fonction de répartition de la loi de Gauss est (Tabl n° 21) (Fig n°23 a et 23 b):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}$$

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} dz$$

Donc l'équation : $(u = \frac{x-\bar{x}}{\delta})$ est présentée sous la forme suivante :

$$x = \bar{x} + \delta u$$

D'où

$F(x)$: Fréquence au non-dépassement (FND).

u : Variable réduite de Gauss (u)

\bar{x} : Moyenne de la série des (x)

δ : Écart type de la série des (x)

Tabl n°21: Les équations d'ajustement d'une loi normal (Gauss).

Stations	\bar{x}	δ	Cv	Equation
Souk Ahras O.N.M	40.07	15.43	0.38	$P_j \max = 40.07 + 15.43 u$
Ruines de Khemissa	47.54	27.15	0.57	$P_j \max = 47.54 + 27.15 u$
Ain Dhalaa	34.27	11.84	0.35	$P_j \max = 34.27 + 11.84 u$
Meskiana	30.75	12.27	0.39	$P_j \max = 30.75 + 12.27 u$
Tébessa	40.17	17.35	0.43	$P_j \max = 40.17 + 17.35 u$
Hammamet	37.71	17.39	0.46	$P_j \max = 37.71 + 17.39 u$
Ain Kissa	32.75	12.42	0.38	$P_j \max = 32.75 + 12.42 u$
Morsott	33.14	13.23	0.39	$P_j \max = 33.14 + 13.23 u$
Ouenza	32.98	12.43	0.37	$P_j \max = 32.98 + 12.43 u$
M'Daourouche	34.79	12.81	0.37	$P_j \max = 34.79 + 12.81 u$
Ain Zarga	32.80	9.04	0.28	$P_j \max = 32.80 + 09.04 u$

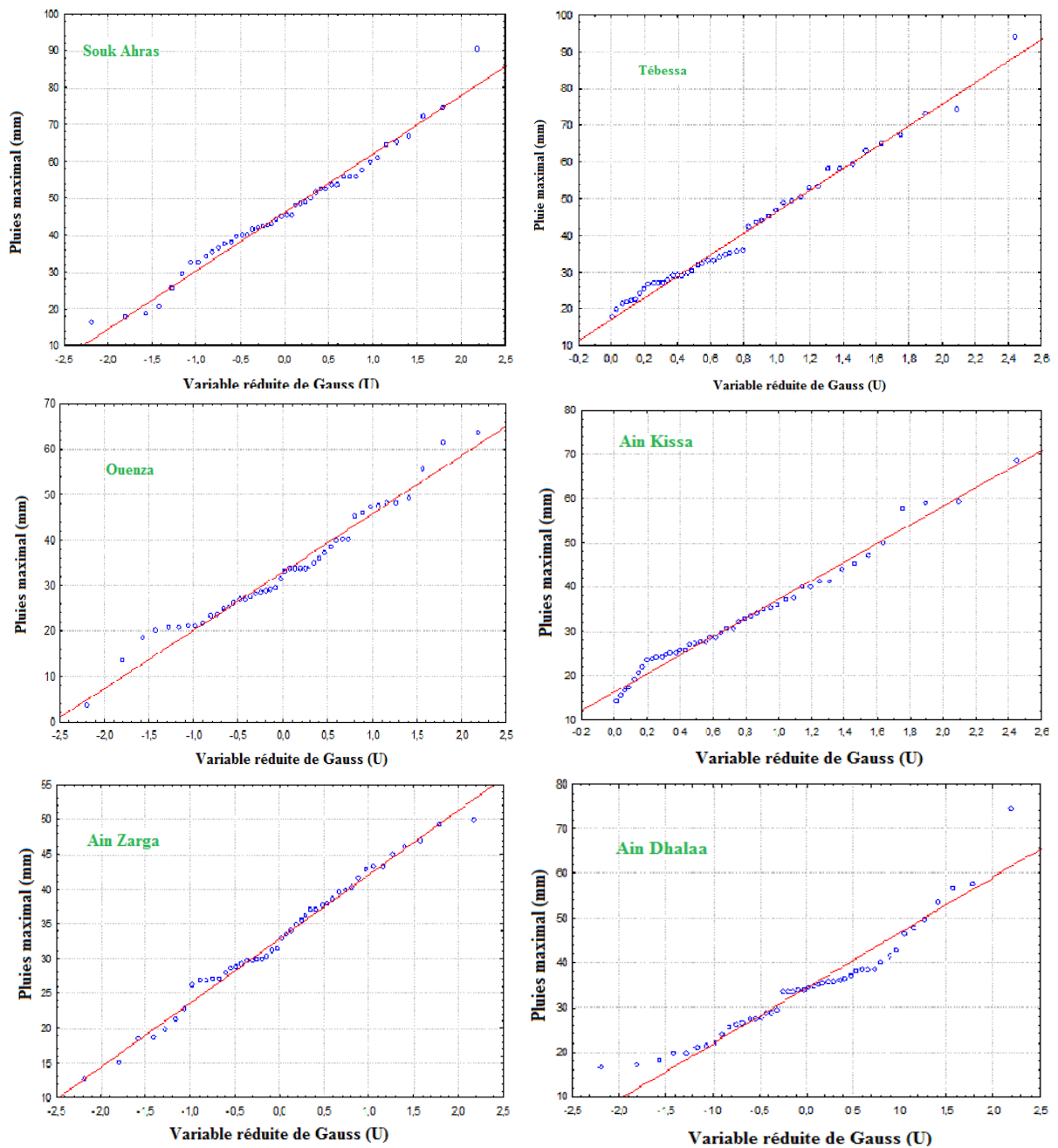


Fig n° 23 a: Ajustement des pluies journalières maximales des différentes stations de la Medjerda (1969-2014).

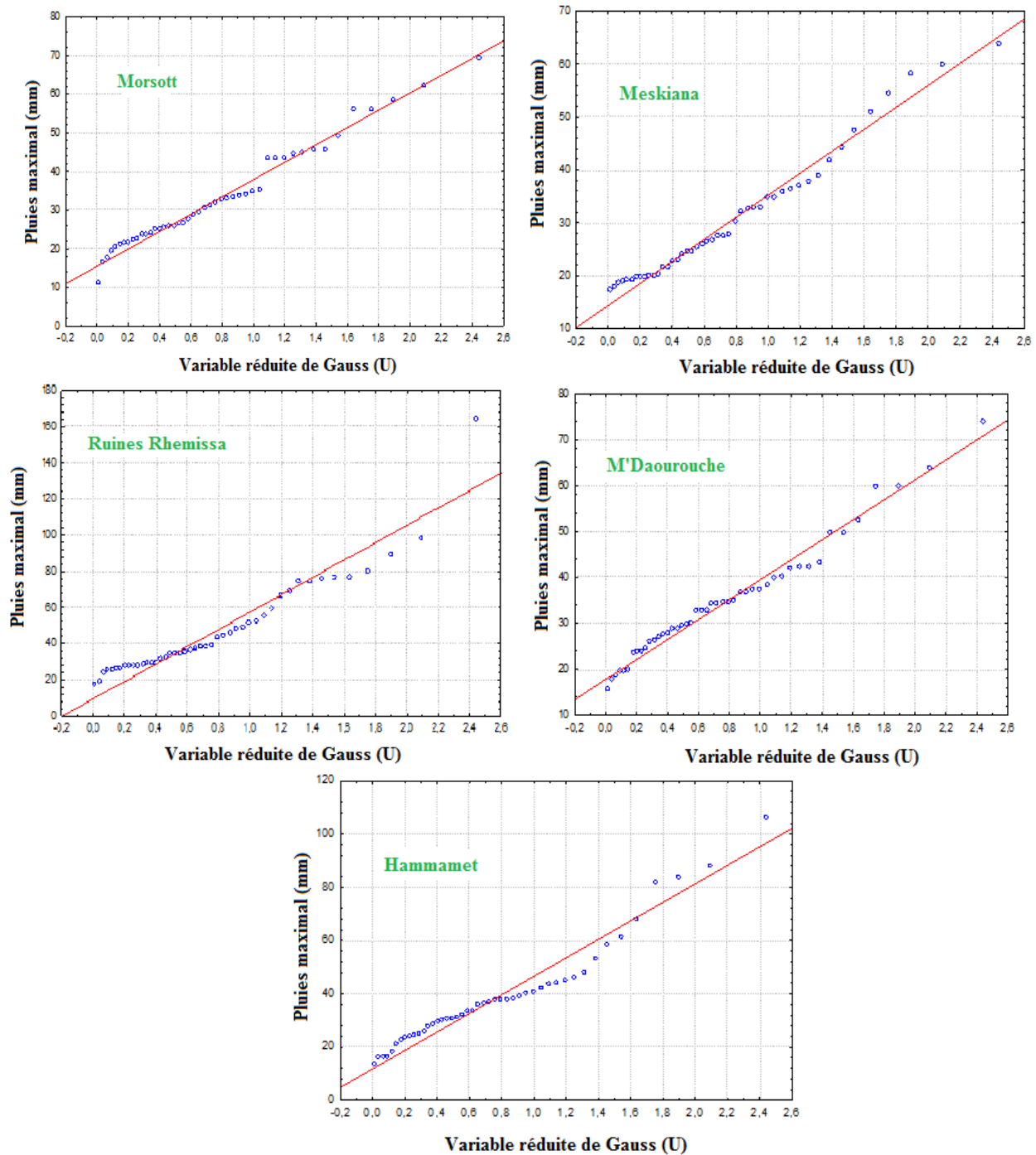


Fig n°23 b : Ajustement des pluies journalières maximales des différentes stations de la Medjerda (1969-2014).

b.2- Test d'adéquation d'une loi théorique :

Il permet de juger la qualité de l'ajustement d'une distribution théorique à une distribution expérimentale.

b.2.1- Test Kolmogorov-Smirnov:

Tabl n° 22: Test d'adéquation (Kolmogorov-Smirnov).

Stations	D	P-Value
Ruines de Khemissa	0.19	0.07
Ain Dhalaa	0.14	0.31
Meskiana	0.18	0.11
Tébessa	0.20	0.07
Hammamet	0.15	0.26
Ain Kissa	0.13	0.41
Morsott	0.15	0.25
M'Daourouche	0.13	0.40

Etant donné que la (P-Value) calculée est supérieure au niveau de la signification seuil ($\alpha = 0.05$), on ne peut pas rejeter l'hypothèse. Alors l'ajustement d'une loi normale est donc confirmé pour les stations de Ruines de Khemissa, Ain Dhalaa, Meskiana, Tébessa, Hammamet, Ain Kissa, Morsott et M'Daourouche (Tabl n°22).

b.2.2- Test du Khi 2 :

Tabl n°23 a: Résultat de calcul du (χ^2) pour la station de Souk Ahras

Classe	Intervalle des précipitations	Effective observé (ni)	Effective théorique (npi)	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(ni - npi)^2}{npi}$
1	Inf 18.15	2	1.11	0.72
2	18.15 – 26.30	3	2.87	0.005
3	26.30 – 34.45	4	5.65	0.48
4	34.45 – 42.60	10	8.41	0.79
5	42.60 – 50.75	8	9.47	0.23
6	50.75 – 58.90	9	8.06	0.11
7	58.90 – 67.05	5	5.20	0.01
8	67.05 – 75.20	2	2.54	0.12
9	75.20 – 83.35	1	0.94	0.94
10	Sup 83.35	1	0.26	2.08

Tabl n° 23 b: Résultat de calcul du (χ^2) pour la station de Ouenza

Classe	Intervalle des précipitations	Effective observé (ni)	Effective théorique (npi)	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(ni - npi)^2}{npi}$
1	Inf 6.46	1	0.53	0.41
2	6.46 – 12.92	1	1.61	1.61
3	12.92 – 19.38	2	3.73	0.80
4	19.38 – 25.84	10	6.58	1.77
5	25.84 – 32.30	9	8.87	0.14
6	32.30 – 38.76	9	9.13	0.002
7	38.76 – 45.22	3	7.17	2.43
8	45.22 – 51.68	7	4.30	1.69
9	51.68 – 58.14	1	1.96	0.47
10	Sup 58.17	2	0.68	2.51

Tabl n° 23 c: Résultat de calcul du (χ^2) pour la station de Ain Zarga

Classe	Intervalle des précipitations	Effective observé (ni)	Effective théorique (npi)	$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(ni - npi)^2}{npi}$
1	Inf 14.09	1	0.58	0.31
2	14.09 – 18.18	1	1.48	0.15
3	18.18 – 22.27	4	3.08	0.27
4	22.27 – 26.36	2	5.23	1.99
5	26.36 – 30.45	13	7.23	4.59
6	30.45 – 34.54	4	8.14	2.11
7	34.54 – 38.63	8	7.45	0.04
8	38.63 – 42.73	5	5.55	0.07
9	42.73 – 46.82	5	3.37	0.79
10	Sup 46.82	2	1.66	0.07

Tabl n°23 d: Test d'adéquation (Khi 2)

Stations	χ^2 Observé	χ^2 Critique	Alpha	P-Value
Souk Ahras O.N.M	5.48	14.07	0.05	0.60
Ouenza	11.84	14.07	0.05	0.11
Ain Zarga	10.39	14.07	0.05	0.17

D'après les résultats obtenus on constate que les valeurs du (χ^2) calculée, (Tabl n° 23 a, 23 b, 23 c, 23 d) sont inférieurs au (χ^2) tabulée qui est de (14.07) pour un degré de liberté (v) égale à (7) et un seuil à risque de (5%). Donc, l'ajustement d'une loi normale est donc confirmé pour les stations de Souk Ahras, Ouenza et Ain Zarga.

b.3- Les pluies journalières maximales fréquentielles selon la loi de Gauss :

Tabl n°24 a : Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Souk Ahras.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	40.07	59.82	65.53	71.70	75.87

Tabl n° 24 b : Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ouenza.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	32.98	48.89	53.49	58.46	61.82

Tabl n°24 c: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Meskiana.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	30.75	46.45	50.99	55.90	59.22

Tabl n°24 d : Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Tebessa.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	40.17	62.38	68.80	75.74	80.42

Tabl n° 24 e: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ain Kissa.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	32.75	48.65	53.24	58.21	61.56

Tabl n°24 f: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ain Dhalaa.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	34.27	49.42	53.81	58.54	61.73

Tabl n°24 h : Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Hammamet.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	37.71	59.96	66.40	73.36	78.05

Tabl n° 24 i: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ain Zerga.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	32.80	44.37	47.72	51.33	53.77

Tabl n°24 g: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Morsott.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	33.14	50.07	54.96	60.26	63.83

Tabl n°24 k: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station Ruines de Khemissa.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	47.54	82.29	92.34	103.2	110.53

Tabl n° 24 l: Pluie maximale journalière fréquentielle pour la station M'Daourouche.

Fréquence (%)	0.5	0.90	0.95	0.98	0.99
Variable réduite	0.0	1.28	1.65	2.05	2.32
Pjmax (mm)	34.79	51.19	55.93	61.05	64.51

3.4.3- Le régime thermique :

L'étude des températures moyennes mensuelles et annuelles est primordiale. Elle nous permet d'évaluer le déficit de l'écoulement dans le bassin versant. Elle réagit aussi en interaction avec les autres facteurs météorologiques telles que : insolation, vitesse du vent, précipitation...etc. On notera que les observations de mesures thermiques constituent un handicap sérieux dû au manque de stations. Pour réaliser notre travail, nous nous sommes basés sur les données recueillies à la station de Souk-Ahras et celle de Tébessa avec une période de 42 ans (1972-2014). Le choix porté sur ces deux stations se justifie par leurs positions intermédiaires entre l'amont et l'aval d'une part et la disponibilité d'un ensemble de données d'autre part (Tabl n° 25).

Tabl n° 25 : Coordonnées des stations météorologiques dans le bassin versant de la Medjerda.

Stations	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
Souk Ahras	7°.58'	36°.17'	680	42 ans
Tébessa	8°.07'	35°.25'	820	42 ans

3.4.3.1- Températures moyennes mensuelles :

Tabl n° 26 : Températures Moyennes mensuelle dans la station de Tébessa (1972-2014).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Tp°moy	6.7	7.83	10.52	13.43	18.71	23.49	26.3	25.5	21.53	17.2	11.2	7.91	15.85

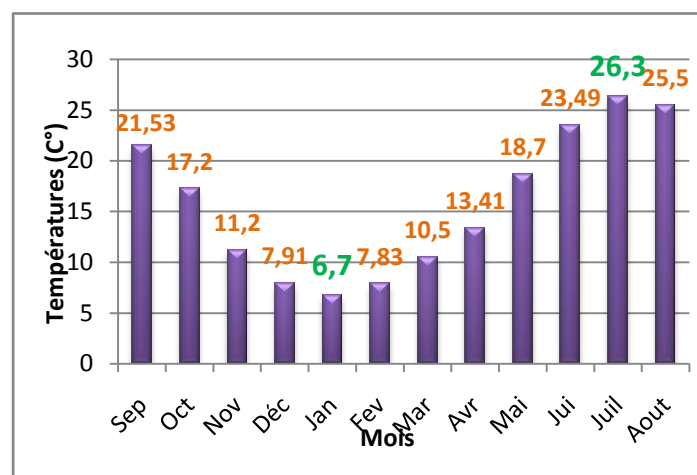


Fig n° 24 : Températures moyennes mensuelles à la station de Tébessa (1972/2014)

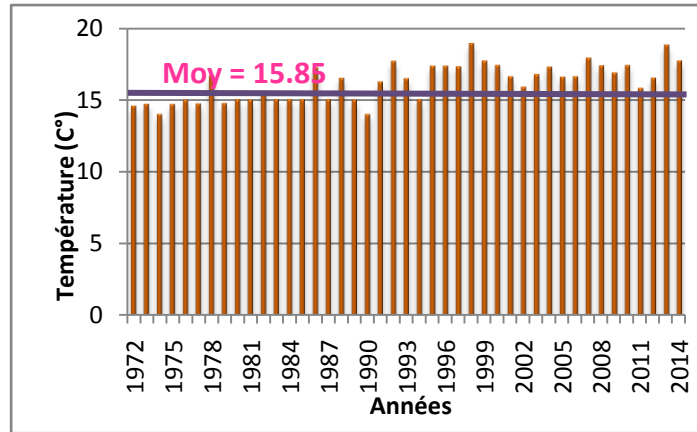


Fig n° 25 : Températures moyennes interannuelles à la station de Tébessa (1972/2014).

D'après le (Tabl n° 26) des températures moyennes et la (Fig n°24 et 25), on a constaté que:

- à l'échelle mensuelle : la saison chaude s'étend du mois de Mai jusqu'au le mois d'Octobre, avec un maximum en juillet de 26.3°C, alors que la saison froide s'étend du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril, avec un minimum en mois de janvier avec (6.7°c).

- à l'échelle annuelle : une température moyenne annuelle est de 15,85°c.

Tabl n°27 : Températures Moyennes mensuelle dans la station de Souk Ahras (1972-2014).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Tp°moy	6.71	7.84	10.52	13.43	18.71	23.43	26.32	25.60	21.6	17.2	11.19	7.93	16.23

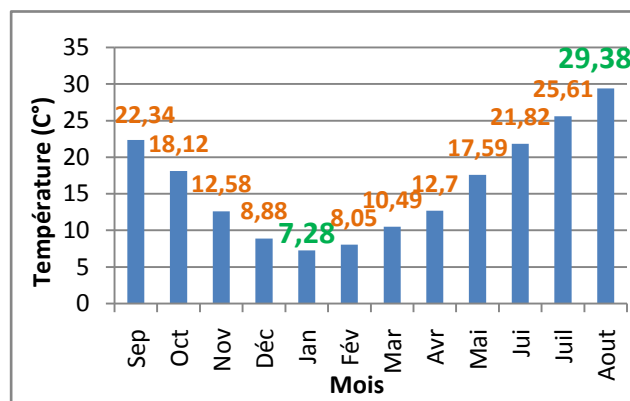


Fig n° 26 : Températures moyennes mensuelles à la station de Souk Ahras (1972/2014)

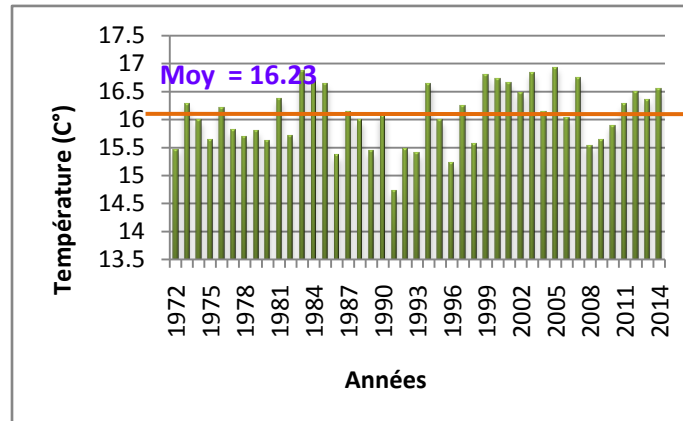


Fig n° 27 : Températures moyennes interannuelles à la station de Souk Ahras (1972/2014).

D'après le (Tabl n° 27) des températures moyennes et la (Fig n° 26 et 27), on a constaté :

- à l'échelle mensuelle : la saison d'hiver est très froide et humide avec un enregistrement de température minimale de (7,28°c) au mois de janvier. Alors que, la saison d'été chaude et sèche où la température maximale enregistrée est de (29.38 °c) au mois d'Août.
- à l'échelle annuelle, une fluctuation thermique de faible amplitude donnant une certaine constance de l'allure générale, avec des valeurs moyennes annuelles de (16.23°c).

Les valeurs de la température maximales, minimales et moyennes sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (Tabl n°28).

Tabl n° 28 : Température moyenne mensuelle (c°) à la station de Tébessa (1972-2014).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Tmin	-1.2	1.4	1.4	5	7.5	13.6	15.6	15.9	13.7	8.7	4.7	1	7.28
Tmax	14	17.7	22.6	23.2	30.2	34.8	37.6	37.2	31.3	27.8	23.6	19.8	26.65
Tmoy	6.7	7.83	10.52	13.43	18.71	23.49	26.3	25.5	21.53	17.2	11.2	7.91	15.85
A	15.2	16.3	21.2	18.2	22.7	21.2	22	21.3	17.6	19.1	18.9	18.8	19.37

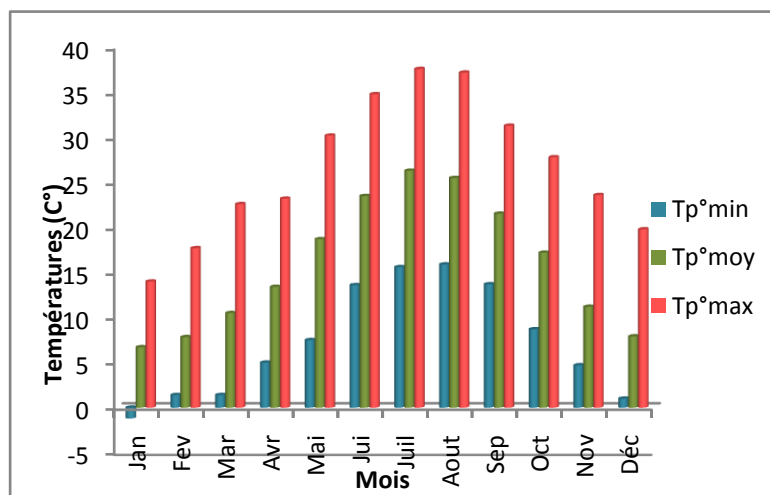


Fig n° 28 : Histogramme des températures (station de Tébessa)

Tabl n°29 : Température moyenne mensuelle (c°) à la station de Souk Ahras (1972-2014).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Tmin	1	2.4	3.2	5.3	7.1	12.3	15.2	16.6	14	9.9	6.3	2.7	8.00
Tmax	13.7	17.1	21	20.9	28.9	32.7	36.6	36.7	31.3	27.5	26	18.6	25.91
Tmoy	6.71	7.84	10.52	13.43	18.71	23.43	26.32	25.60	21.6	17.2	11.19	7.93	16.23
A	12.7	14.7	17.8	15.6	21.8	20.4	20.0	20.1	17.3	17.6	19.7	15.9	17.8

Tmin : Moyenne mensuelle des températures minimales.

Tmax : Moyenne mensuelle des températures maximales.

Tmoy : température moyenne mensuelle.

A : Amplitude thermique ($A = T_{max} - T_{min}$).

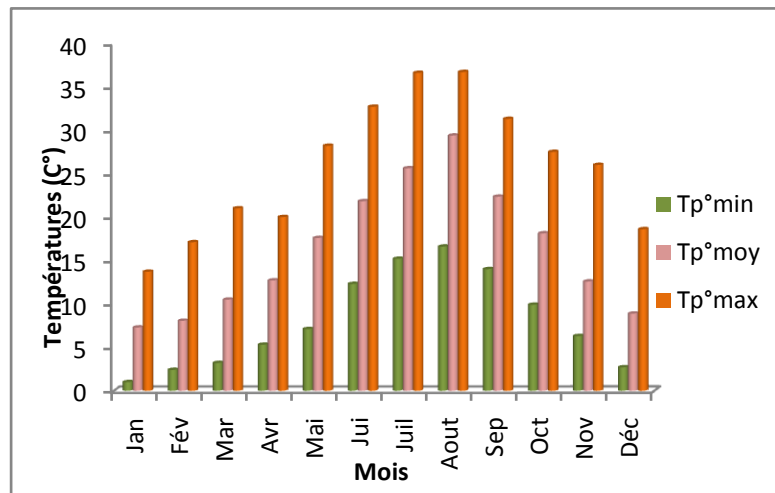


Fig n° 29 : Histogrammes des températures (station de Souk Ahras).

L'examen des (Tabl n° 28 et 29), montre que le grand bassin versant de la Medjerda subit durant l'année deux grandes saisons, qui semblent partager le cycle climatique en deux grandes périodes nettement égales mais irrégulières (Fig n° 28 et 29).

- Un semestre continental très froid, s'étend du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril, dont la température minimale est de (-1.2 °c) pour la station Tébessa et (1°c) pour la station Souk Ahras.
- Un semestre sec et chaud avec une moyenne des maxima de (25.91°c) (Souk Ahras) et (26.65°c) (Tébessa). Durant la période hivernale et sous l'influence continentale, les températures saisonnières, s'abaissent parfois en dessous de (0°c), d'où l'apparition de phénomène de la gelée. A la lumière de ces résultats, on peut dire que notre zone d'étude connaît des hivers assez froids et des étés assez chauds.

3.4.3.2- Relation Température – Précipitation (Diagramme Ombrothermique) :

Les valeurs des précipitations et des températures enregistrées au niveau de la station de Souk-Ahras et Tébessa sur une période de (42 ans), permettent l'établissement du diagramme (Fig n° 30 et 31), ce dernier montre la succession de deux saisons l'une sèche et l'autre humide. La première s'étale du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre, la seconde va du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril compris. Les deux saisons durent en moyenne six mois par an.

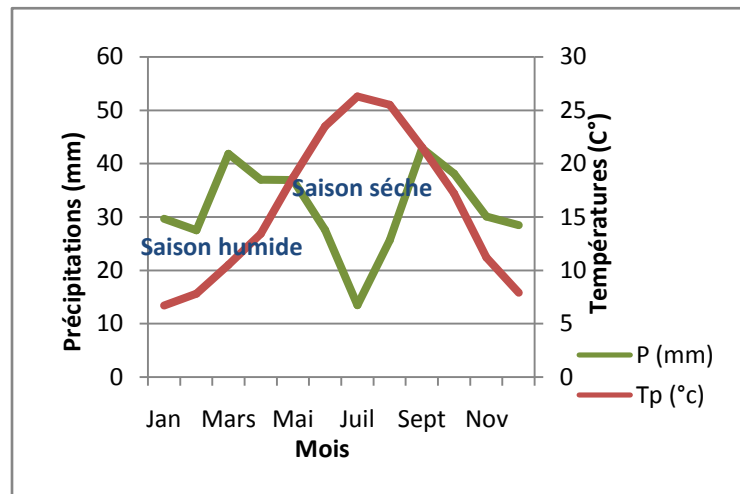


Fig n° 30: Diagramme Ombrothermique station Tébessa (1972/2014).

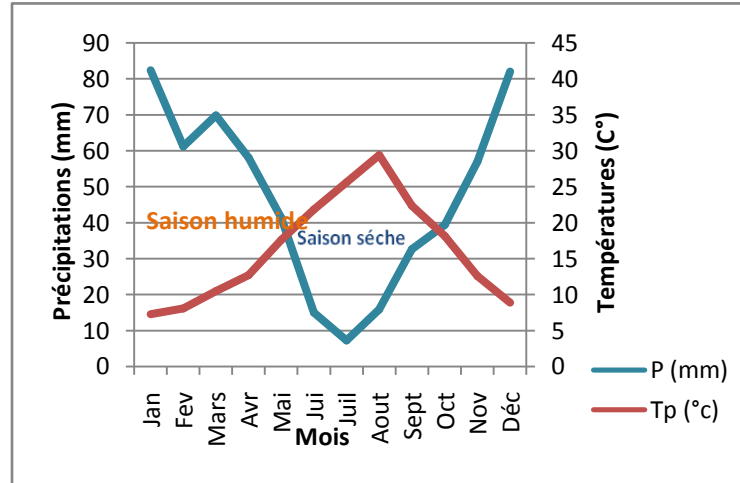


Fig n° 31 : Diagramme Ombrothermique station Souk Ahras (1972/2014).

3.4.4- Les autres facteurs climatiques :

L'analyse du climat du bassin versant de la Medjerda est basée sur les données climatiques de la station de Tébessa et Souk Ahras. Parmi les facteurs climatiques intervenant dans le processus d'évaporation sont : l'insolation, la vitesse du vent, l'humidité...ect.

3.4.4.1- L'humidité relative de l'air:

L'air contient de l'eau sous forme de vapeur. Cette humidité est limitée et dépend essentiellement de la température de l'air. On appelle humidité relative de l'air le pourcentage de vapeur d'eau qui existe réellement dans l'air par rapport à la quantité maximale que pourrait contenir l'atmosphère dans les mêmes conditions de température et de pression. Les valeurs mensuelles de l'humidité relative de la station Tébéssa ont été reportées dans le (Tabl n° 30).

Tabl n° 30: L'humidité relative de l'air (%) à la station de Tébéssa (1985-2013)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuel
Hr %	77.4	71.7	65.5	63.9	56.9	48.9	42.1	45.6	57.6	64.0	71.7	77.6	743.0

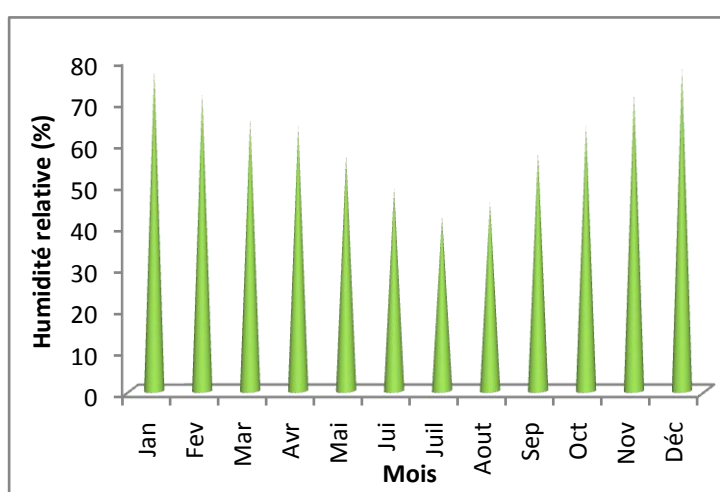


Fig n° 32 : Humidité relative moyenne mensuelle (%) (Station de Tébéssa)

A partir des résultats du (Tabl n°30) on constate que l'humidité relative dépasse les 50% pendant huit (08) mois, du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai, avec un maximum de (77.6%) en décembre, alors qu'elle est inférieure à (50%) pendant quatre (04) mois de Mai jusqu'au mois d'Aout, avec un minimum en juillet (42.1%), (Fig n° 32).

3.4.4.2- La vitesse du vent:

Le vent joue un rôle essentiel sur les processus d'évaporation car c'est lui qui permet, par le mélange de l'air ambiant, de remplacer au voisinage de la surface évaporant, l'air saturé par de l'air plus sec. En effet, l'air au voisinage de la surface évaporant va se saturer plus ou moins rapidement et par conséquent stopper le processus d'évaporation. La variation mensuelle de la vitesse du vent a été reportée dans le (Tabl n° 31).

Tabl n° 31: La vitesse moyenne du vent (m/s) à la station de Tébéssa (1985-2013)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuel
V(m/s)	2.8	3.3	3.4	3.8	3.5	3.1	3.1	2.5	2.7	2.4	2.9	3.1	3.0

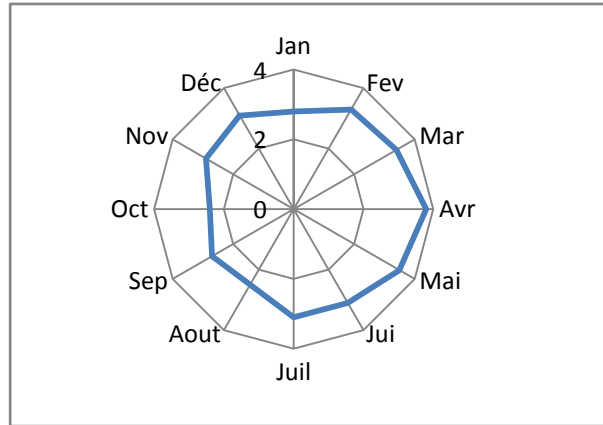


Fig n° 33 : Vitesse du vent moyen mensuel (m/s) station de Tébessa.

Dans notre zone d'étude, les vents qui sont dominants sont ceux provenant d'Ouest-Nord-Ouest (Novembre - Avril) et du Sud plus significatifs (Mai - Juillet). Les vents sont actifs (fréquent) pendant la période hivernale, leurs vitesse moyenne maximale (3.8 m/s) au mois d'Avril. Ils sont reliés par les vents du sud pendant toute la saison estivale, remarque, les vents chauds et secs provoquent un abaissement simultané de l'humidité atmosphérique et une augmentation brutale de la température ce qui indique une augmentation de l'évaporation (Fig n° 33).

3.4.4.3- Le rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie reçue directement par la surface du sol. L'évolution de ce paramètre a été consignée dans les (Tabl n° 32).

Tabl n° 32 : Insolation moyenne (h/j) Station de Tébessa (1985-2013).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Annuel
Insolation (h/j)	5.1	6.3	7.3	8.2	9.3	9.7	11.2	10.1	8.2	7.4	6.1	5.3	94.2
%	5.5	6.8	7.8	8.7	9.9	10.4	12.0	10.8	8.8	7.9	6.6	5.7	100

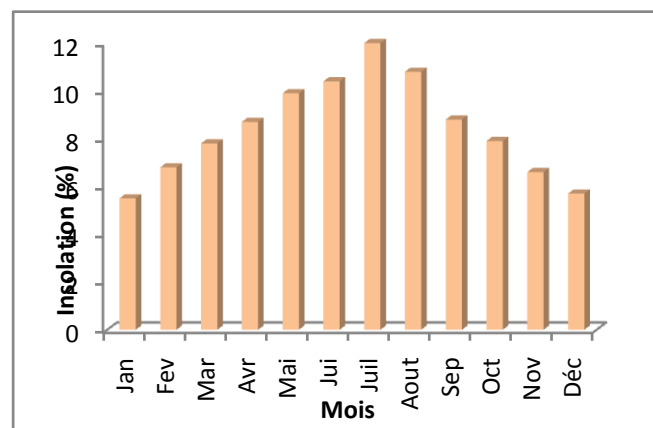


Fig n° 34 : Insolation moyenne mensuelle (%) station de Tébessa

La moyenne mensuelle de l'insolation est de (12 jours), avec un maximum qui est enregistré au mois de Juillet de (14 jours) (11.2 heures /jour) et le minimum environ de (9 jours) en Janvier avec (5.1 heures /jour) (Fig n° 34).

3.4.4.4- La neige :

Les sommets de la bordure sud du sous bassin de Tébessa sont enneigés en ligne droite (Est-Ouest) depuis le djebel Bouroumane (1545m) au djebel Meteguinaro (1712m). La surface du sous bassin susceptible d'être enneigée est relativement faible, mais elle joue un rôle important car elle se situe sur des affleurements calcaires. Ce qui constitue un apport assez important à la nappe souterraine. D'après *Seltzer (1946)* cette région se situe dans la zone d'enneigement moyen au sol de (5) à (10 jours/an).

3.4.4.5- Coefficient pluviométrique :

Pour déterminer le coefficient pluviométrique on utilise la formule suivante :

$$C_p = 365 \times P_i / Pn$$

C_p : Exprime le caractère plus ou moins pluvieux du mois.

P_i : Précipitation du mois du rang.

P : Précipitation (mm).

n : Nombre de jours par mois.

On peut écrire la formule précédente sous la forme :

$$C_p = (365/n_i) \cdot (P_i/P) = K \cdot (P_i/P)$$

K : Coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré.

Si : $n=31$ jours $k= 365/31=11.77$.

Si : $n=30$ jours $k=365/30=12.16$.

Pour le mois de février 28 jours tous les trois ans et une fois 29 jours,

$k= 365/ (28 \text{ jours} \cdot 3 \text{ ans} + 29) /4=12.92$. (Tabl n° 33)

Tabl n° 33 : Coefficient pluviométrique station Souk-Ahras (1969-2014)

Mois	Saison humide						Saison sèche					
	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct
K	12.16	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77
Pi	35.8	97.35	75.60	61.15	61.15	57.70	66.99	23.30	8.50	28.05	35.05	64.29
Cp	0.67	1.75	1.36	1.21	1.10	1.07	1.21	0.43	0.15	0.51	0.65	1.16

Saison humide : Cp (saison humide) = 7.16

Saison sèche : Cp (saison sèche) = 4.11

R = Cp (saison humide) / Cp (saison sèche)

D'où : R = 1.74 d'où $1 < R < 1.75$ (Climat semi-aride).

Tabl n° 34 : Coefficient pluviométrique station Tébessa (1969-2014)

Mois	Saison humide						Saison sèche					
	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct
K	12.16	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77
Pi	30.09	28.47	29.64	27.52	41.81	36.97	36.9	27.54	13.49	25.64	42.87	38.11
Cp	0.96	0.88	0.92	0.94	1.29	1.19	1.14	0.88	0.42	0.79	1.37	1.18

Saison humide : Cp (saison humide) = 6.18

Saison sèche : Cp (saison sèche) = 5.78

R = Cp (saison humide) / Cp (saison sèche)

D'où : R = 1.06 d'où $1 < R < 1.75$ (Climat semi-aride)

Selon ces normes, la région d'étude est soumise à un climat, semi-aride caractérisé par deux saisons; l'une humide marquée par une moyenne de pluviosité allant du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril et par une température moyennement faible l'autre sèche de forte température atteignant le maximum au mois de Juillet (Tabl n° 33 et 34).

3.4.5- Détermination des indices climatiques :

3.4.5.1- Climagramme d'Emberger :

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique (Q). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds (Fig n° 35).

$$Q = \frac{P}{\frac{(M + m)(M - m)}{2}} 1000$$

P: Précipitation moyenne annuelle (mm)

M: moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés kelvin).

m: moyenne des minima du mois le plus froid (degré kelvin).

Partant de ces données, il a établi un Climagramme où chaque station intéressée figure suivante ses coordonnées avec en abscisse (m) (minima en (c°) du mois le plus froid et en ordonnées le quotient pluviométrique (Q).

Le calcul de ce dernier donne les valeurs suivantes :

- Station de Souk-Ahras : (Q = 42,74) D'après cette valeur, on peut dire que la région de Souk-Ahras possède un climat semi-aride.

- Station de Tébessa : (Q = 39,89) D'après cette valeur, on peut dire que la région de Tébessa possède un climat semi-aride.

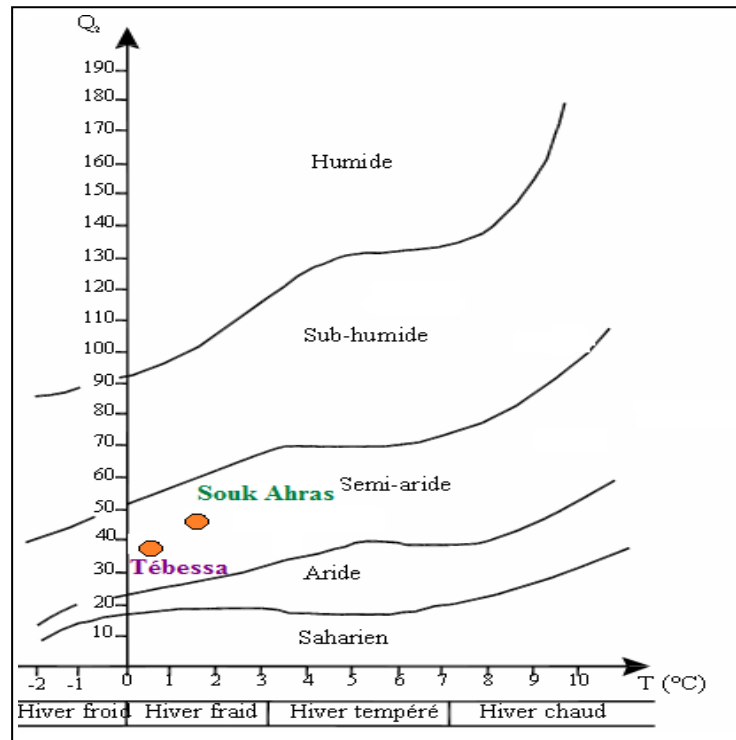


Fig n° 35 Climagramme d'EMBERGER

3.4.5.2- Indice d'aridité de Martonne :

En 1948 *DE. Martonne* avait établi un indice en fonction des températures et des précipitations (*Fig n° 36*). Il est calculé par les relations suivantes :

$$I = P / (T + 10)$$

P : précipitation annuelle moyenne (mm). T : température annuelle moyenne (°C).

Suivant les valeurs de I obtenues, *DE. Martonne* a établi la classification suivante :

- I < 5 : Climat hyper aride. 5 < I < 7.5 : Climat désertique
- I > 10 : Climat semi-aride. 7.5 < I < 10 : Climat steppique.

Souk-Ahras : $I = 21.43$

Tébessa : $I = 14.7$

D'après les résultats obtenus on peut dire que le climat annuel des deux régions Tébessa et Souk Ahras est de type semi-aride (Fig n° 36).

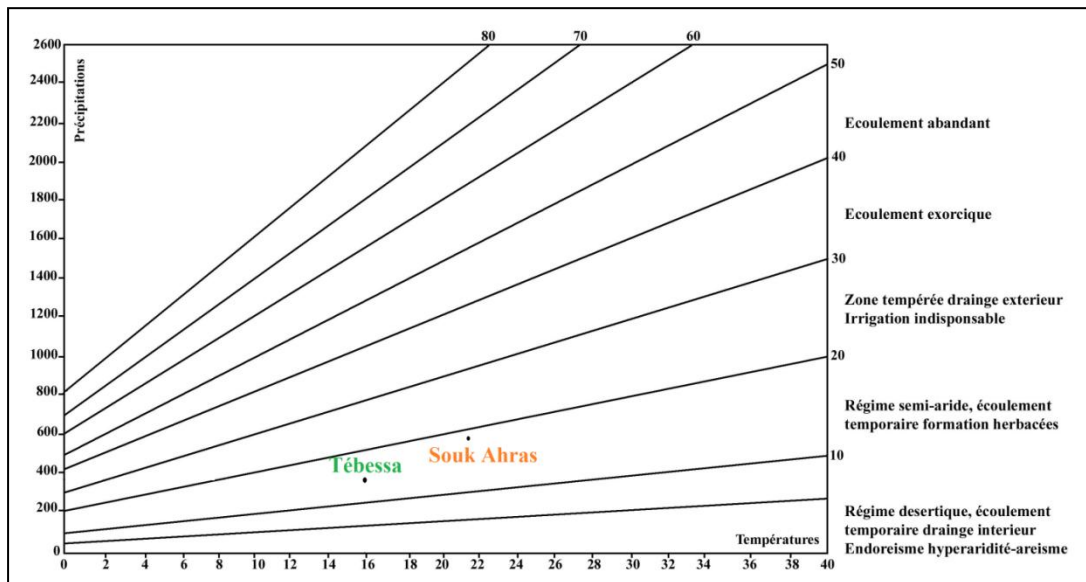


Fig n° 36 : Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923.

3.4.5.3- Indice d'aridité mensuelle:

L'indice d'aridité mensuel (I) donné par la formule:

$$I = 12 P / (T + 10)$$

P : précipitation mensuelle moyenne (mm). T : température mensuelle moyenne (°c).

Tabl n°35 : Indice d'aridité mensuel (Tébessa).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
I	15.5	16.0	18.9	19.1	19.0	18.1	25.8	16.8	16.3	9.6	4.3	9.9

D'après les résultats présentés dans le (Tabl n° 35), le mois de juillet présente un climat hyperaride, les mois de novembre, décembre, et mars jouissent d'un climat tempère. Le mois de juin présente un climat steppique alors que le climat semi-aride marque le reste des mois de l'année.

Tabl n° 36 : Indice d'aridité mensuel (Souk Ahras).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout
I	13.01	15.28	34.19	61.96	69.31	50.27	35.86	35.41	25.15	8.79	2.87	9.26

D'après les résultats présentés dans le (Tabl n° 36). , on remarque qu'aux mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril le climat est humide, au mois de Mai le climat est tempéré, que les mois de Septembre et Octobre, le climat est sec alors qu'au mois de Juin et Août le climat est très sec, contrairement le mois de Juillet est Hyper aride.

3.4.6- Le Bilan hydrique :

Le bilan hydrique exprime le processus qui suivi une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de se retourner à l'atmosphère.

Le bilan hydrologique naturel peut être calculé selon la formule suivante *Castany (1982)* :

$$P = ETR + R + I$$

P : précipitation, ETR : l'évapotranspiration annuelle (mm), R : ruissellement, I : infiltration.

3.4.6.1- Etude de l'évapotranspiration :

C'est un terme important du cycle hydrique qui résulte de deux phénomènes, l'un physique (l'évaporation), l'autre biologique (la transpiration) ; l'évapotranspiration est fonction de plusieurs facteurs (l'humidité, la température, l'insolation et la couverture végétale.

a- Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évaluation de l'évapotranspiration potentielle est une opération complexe ; de nombreux chercheurs ont mené des travaux sur ces questions, leurs méthodes différentes les unes des autres en fonction des paramètres introduits dans l'évaluation telles que la température, l'humidité relative, l'insolation et aussi la vitesse du vent. Certaines méthodes s'appliquent assez bien à nos régions, d'autres sont peu conformes. Pour notre cas, on utilise les formules de *Turc* et de *Thornthwaite*. Les données climatiques utilisées sont celles de la station de Tébessa et la station de Souk Ahras.

a.1- Estimation de l'ETP par la formule de Thornthwaite :

La méthode de *Thornthwaite* reste la plus utilisée en hydrologie. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$ETP(mm/mois) = 16(10T/I)^a \cdot K$$

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$I = \sum i \quad a = (1.6/100)I + 0.5$$

ETP : Évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm.

T : Température moyenne du mois considère en (c°)

K : coefficient de correction de la latitude.

i : indice thermique mensuel, I : indice thermique annuel.

Tabl n° 37 : Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la station de Souk Ahras

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	7.28	8.05	10.49	12.7	17.59	21.82	25.61	29.38	22.34	18.12	12.58	8.88
i	1.83	2.76	3.04	3.79	6.67	9.76	11.1	12.6	9.85	6.9	4.14	2.44
C	0.86	0.85	1.03	1.2	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.98	0.86	0.84
ETP	13.12	15.36	29.13	46.9	82.7	119.9	159.8	188.6	104.5	69.7	33.1	17.9

$$a = 1.69$$

$$I = \sum i = 74.88$$

$$ETP = 880.71 \text{ mm}$$

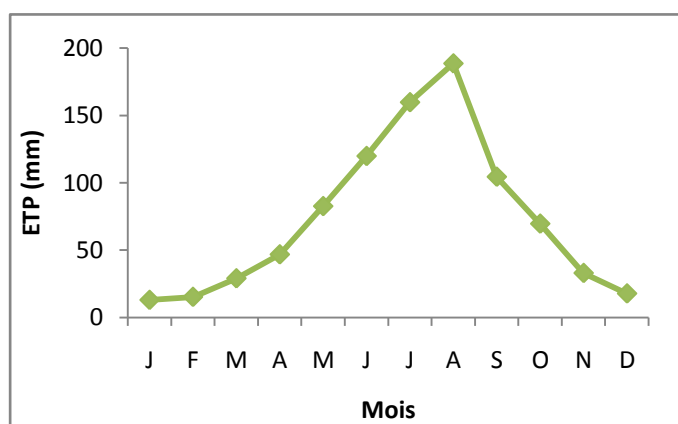


Fig n° 37 : Evolution de l'ETP (mm) de Thornthwaite à la station de Souk Ahras.

Tabl n° 38 : Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la station de Tébessa

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	6.7	7.83	10.5	13.41	18.7	23.49	26.3	25.5	21.53	17.2	11.2	7.91
i	1.53	2.7	3.19	4.36	7.3	10.88	11.85	12.31	9.76	6.74	3.71	2.1
C	0.87	0.85	1.02	1.09	1.21	1.23	1.24	1.16	1.03	0.97	0.87	0.85
ETP	11.1	14.2	28.2	45.9	90.2	135.7	166.2	147.4	97.8	62.6	26.9	14.4

$$a = 1.72$$

$$I = \sum i = 76.43$$

$$ETP = 840.60 \text{ mm}$$

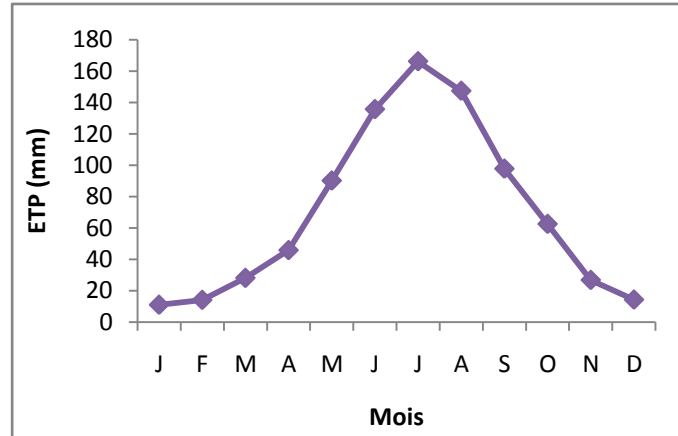


Fig n° 38 : Evolution de l'ETP (mm) de Thornthwaite à la station de Tébessa.

D'après les résultats du (Tabl n° 37 et 38) on constate que les valeurs d'ETP calculées par la formule de *Thornthwaite* sont supérieures aux précipitations moyennes annuelles (Station Souk Ahras avec 606.38 mm) et (Station de Tébessa avec 379.09 mm).

a.2- Estimation de l'ETP par la formule de TURC :

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$ETP = 0.40(Ig + 50) \frac{t}{t + 15}$$

L'application de cette méthode aux différentes stations a permis d'obtenir les résultats dans le (Tabl n° 39) est reportée dans les (Fig n° 39a et 39b).

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

Iga : La radiation maximale théorique donnée par des tables exprimée en cal/cm2/jour.

t : Température moyenne mensuelle (°C).

h : Durée moyenne d'insolation (heures).

H : Durée astronomique du jour (heures).

Ig : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale (calories/cm2/jour).

Hr : Humidité relative (%)

C : terme correctif si Hr < 50%

$$C = 1 + \frac{50 - Hr}{70}$$

Tabl n° 39 a : Calcul de l'ETP selon la formule de TURC à la station de Souk Ahras.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Iga	412.1	541.4	695	848	945.6	986	965	884.5	750.3	594.8	447.6	378.1
T	7.28	8.05	10.49	12.7	17.6	21.8	25.6	29.38	22.34	18.12	12.58	8.88
h	4.9	5.6	6.4	7.3	9.5	9.9	11.4	10.8	8.2	6.8	5.8	4.9
H	9.8	10.8	11.8	13.1	14.1	14.5	14.3	13.6	12.5	11.4	10.1	9.7
h/H	0.5	0.52	0.54	0.56	0.67	0.68	0.80	0.79	0.66	0.59	0.57	0.51
Ig	199	282.9	356.9	446	560	598	651	590	436.2	331.1	236	188
Hr	79.4	75.1	73.5	72.8	64.9	58.4	49.4	51.7	59.8	66.9	72.8	77.6
ETP	32.87	46.61	68.36	91.3	131.8	153	179	168.96	116.7	83.8	52.62	35.22
C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ETP corrigé	32.9	46.6	68.36	91.3	131.8	153	183	168.96	116.7	158.2	52.6	35.2

ETP annuel = 1238.62 mm.

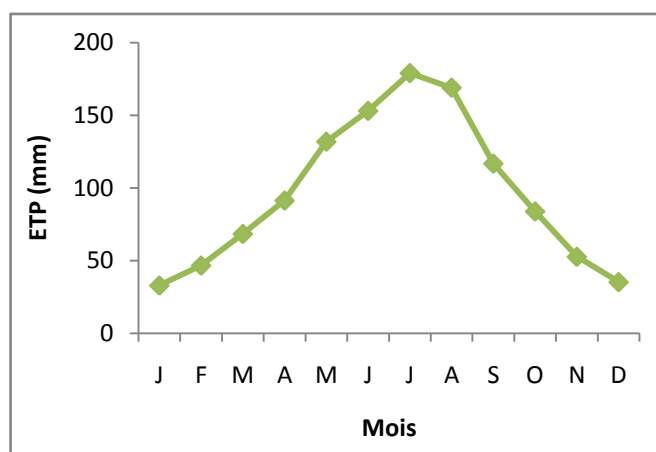


Fig n° 39 a: Evolution de l'ETP (mm) de TURC à la station de Souk Ahras.

Tabl n°39 b : Calcul de l'ETP selon la formule de TURC à la station de Tébessa.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Iga	426	554.1	704.1	851	947.4	984	964	887.3	757.6	603.7	461.5	391.2
T	6.7	7.83	10.5	13.4	18.7	23.5	26.3	25.5	21.53	17.2	11.2	7.91
h	5.2	6.6	6.9	7.7	9.4	9.9	11.3	10.2	7.9	7.4	6.3	5.4
H	9.8	10.7	11.8	13	13.1	14.5	14.3	13.5	12.5	11.2	10.1	9.6
h/H	0.53	0.62	0.58	0.59	0.72	0.68	0.79	0.75	0.63	0.66	0.62	0.56
Ig	213.7	312.3	381	466	565.6	598	651	577.3	436.2	354.2	260.6	205.6
Hr	77.4	71.7	65.5	63.9	56.9	48.9	42.1	45.6	57.6	64.0	71.7	77.6
ETP	32.69	49.3	72.41	97	135.43	161	179.5	158.1	114.7	85.69	53.42	35.78
C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.03	1.08	1.14	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00
ETP corrigé	32.69	49.3	72.41	97	139.49	174	204.63	166.0	114.7	85.69	53.42	35.78

ETP annuel = 1225.11 mm.

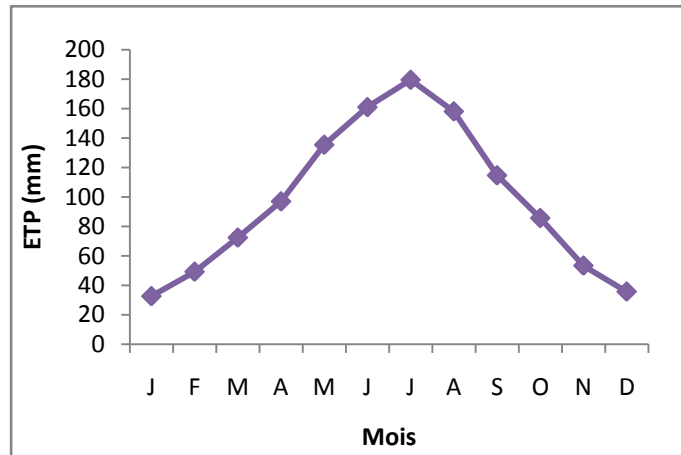


Fig n° 39 b : Evolution de l'ETP (mm) de TURC à la station de Tébessa.

D'après les résultats du (Tabl n° 39 a et 39 b) on constate que les valeurs d'ETP calculées par la formule de *Turc* dépasse largement les valeurs des précipitations moyennes annuelles (l'ETP \cong 2 P) pour la station de Souk Ahras, tandis que pour la station de Tébessa (l'ETP \cong 3 P).

A la lumière des résultats des deux méthodes, on constate que les valeurs d'ETP calculées par la formule de *Turc* sont trop exagérées par rapport à celles de *Thornthwaite*.

b- Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si elles sont supérieures ou égales au stock d'eau de la (RFU). En cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle *G. Castany*. Cette estimation se fera à partir des formules de *Turc*, de *Coutagne*, et de *Thornthwaite*.

b.1- Formule de Turc :

Cette formule permet d'évaluer directement l'ETR annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle (Tabl n° 40).

$$ETR = P / (0.9 + P^2 / L^2)^{1/2} \text{ (mm/ ans)}$$

$$L = 300 + 25T + 0.005T^3$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

L : facteur qui tient compte des échanges de chaleur.

T : Température moyenne annuelle en (c°).

Tabl n°40 : Estimation d'ETR d'après Turc

Stations	P(mm)	T(c°)	L(m)	ETR(mm)
Souk Ahras	606.38	16.23	727.13	477.46
Tébessa	373.09	15.85	716.16	342.29

3.4.6.2- Bilan Hydrique selon Thornthwaite :

Pour l'établissement du bilan mensuel on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne par la méthode de *C.W. Thornthwaite*. Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante :

- La satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.
- Le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :

1er cas $P > ETP$: $ETR = ETP$ on a alors un excédent.

2emecas $P < ETP$: $ETR = P + RFU$.

a- Estimation des réserves facilement utilisables (RFU) :

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- la nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle.
- la profondeur du niveau piézoélectrique de la nappe aquifère.
- le climat de la région.
- le type de la couverture végétale.

J.Ricard à évalué la RFU pour la région de Tébessa, on tenant compte de la nature du sol et le type de cultures : $RUF \leq 25$ mm. La quantité dépassant (25 mm) constitue l'excédent. Tendis que la région de Souk Ahras RFU serait ≤ 46 mm.

Les résultats obtenus par la méthode de *Thornthwaite* sont reportés sur le (Tabl n°41 a et 41 b)

Tabl n° 41 a : Bilan hydrique de Thornthwaite à la Station de Tébessa.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
P(mm)	42.87	38.11	30.09	28.47	29.64	27.52	41.81	36.97	36.9	27.54	13.49	25.64	379.05
ETPc (mm)	97.8	62.6	26.9	14.4	11.1	14.2	28.2	45.9	90.2	135.7	166.2	147.4	840.6
ETR (mm)	42.87	38.11	26.9	14.4	11.1	14.2	28.2	45.9	52.97	27.54	13.49	25.64	341.32
P-ETP	-54.93	-24.49	3.19	14.07	18.54	13.32	13.61	-8.93	-53.3	-108.16	-152.71	-121.76	-
RFU (mm)	0	0	3.19	17.26	25	25	25	16.07	0	0	0	0	111.52
Ex (mm)	0	0	0	0	10.8	13.32	13.61	0	0	0	0	0	37.73
DA (mm)	54.93	24.49	0	0	0	0	0	0	37.23	108.16	152.71	121.76	499.28

Tabl n°41 b : Bilan hydrique de Thornthwaite à la Station de Souk Ahras.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
P(mm)	32.7	39.4	57.1	82.1	82.3	61.2	69.8	58.1	41.3	15.1	7.3	15.9	562.30
ETPc (mm)	104.5	69.7	33.1	17.9	13.12	15.36	29.13	46.9	82.7	119.9	159.8	188.6	880.71
ETR (mm)	32.7	39.4	33.1	17.9	13.12	15.36	29.13	46.9	82.7	19.7	7.3	15.9	353.21
P-ETP	-71.8	-30.3	24	64.2	69.18	45.84	40.67	11.2	-41.4	-104.8	-152.5	-172.7	-
RFU (mm)	0	0	24	46	46	46	46	46	4.6	0	0	0	258.6
Ex (mm)	0	0	0	42.2	69.18	45.84	40.67	11.2	0	0	0	0	209.09
DA (mm)	71.8	30.3	0	0	0	0	0	0	0	100.2	152.5	172.7	527.5

Les résultats du bilan hydrique obtenus (Tabl n° 41 a et 41 b), montrent un déficit annuel de (499.28 mm) (station Tébessa) .Ce déficit débute du mois de Mai pour atteindre son maximum au mois de Juillet avec (156.29 mm). Pendant la période qui s'étale du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril, les précipitations jouent un rôle très important pour reconstituer la réserve annuelle (RFU=111.52 mm). Les réserves sont saturées au mois de Janvier, Février, Mars (EX = 37.73 mm). Remarque, pour la station de Souk Ahras, présente un déficit annuel de (527.5 mm) et début au mois de Juin avec un maximum de (172.7 mm) enregistré au mois d'Aout. Les réserves sont saturées au mois de Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril (Ex = 209.09 mm) pendant la période qui s'étale du mois de Novembre, jusqu'au mois d'Avril la réserve annuel est de (RFU = 258.6).

b- Calcul du ruissellement :

Le ruissellement (R) peut être calculé par la formule suivante d'après (Tixeront Berkallof):

$$R = P^3 / 3(ETP)^2 \quad \text{Si } P < 600 \text{ mm.}$$

R : ruissellement en mm, P : précipitation moyenne mensuelle en mm, ETP : évapotranspiration potentielle en mm.

Souk Ahras : R = 76.40 mm , Tébessa : R = 25.69 mm

Pour une précipitation (station Souk Ahras) (P = 562 mm), une évapotranspiration potentielle de (881 mm), la lame d'eau ruisselée obtenue est de l'ordre de (76.40 mm), représentant (13.59%) des précipitations. La station de Tébessa a enregistré des précipitations (P=379 mm) et une évapotranspiration potentielle de (841 mm), la lame d'eau ruisselée obtenue est de l'ordre de (25.69 mm) qui représente (6.8%) des précipitations.

c- Calcul de l'infiltration :

Ce paramètre dont l'importance conditionne la reconstitution des réserves du sol, est évalué par différence entre les apports en eau et les pertes.

$$I = P - (ETR + R)$$

P: précipitations moyennes annuelles en mm, ETR: évapotranspiration réelle en (mm),

R: ruissellement moyen annuel en mm, I: infiltration moyenne annuelle en (mm)

D'où : $I = 132.69$ mm, (station de Souk Ahras) représentant (23.6%) des précipitations.

$I = 12.04$ mm, (station de Tébessa) représentant (3.21%) des précipitations.

On enregistre que le bilan hydrologique établi sur la base des valeurs déterminées par les différents paramètres est équilibré tout en vérifiant l'égalité : $(P = E + R + I)$

Conclusion

L'étude climatologique nous a permis de conclure ; que le bassin versant de la Medjerda est caractérisé globalement par un climat typiquement semi-aride de type continental (hiver froid et été chaud). Les précipitations moyennes annuelles, sur une période de 45 ans (1969 –2014), sont estimées à (413 mm) (D'après la méthode des isohyets). La température moyenne annuelle estimée est de (15.85 °c) (station Tébessa) et (16.23°c) (station Souk Ahras). L'évapotranspiration réelle (ETR) calculée selon les méthodes de *Turc* et de *Thornthwaite* est de l'ordre de (353.21 mm/ an), représentant (62.82 %) des précipitations (station Souk Ahras), alors que pour la (station Tébessa) ETR a enregistré un taux de (341.32 mm/an), représentant (90.05 %) des précipitations. Le ruissellement estimé par la formule empirique de *Tixeront* et *Berkaloff*, ne bénéficie que de (13.59%) des précipitations ce qui représente une lame d'eau annuelle de (76.40 mm / an) (Souk Ahras) et, (6.8 %) des précipitations (Tébessa) avec une lame d'eau annuelle de (25.69 mm). D'autre part, l'infiltration calculée par la formule de bilan, serait de (132.69 mm) pour Souk Ahras et (12.04 mm) pour Tébessa.

Chapitre 4

Etude Hydrologique

4. 1- Introduction

Le comportement hydrologique d'un cours d'eau, dépend essentiellement de plusieurs facteurs physico-géographiques influençant l'écoulement : le régime des précipitations, la nature du bassin versant, sa situation géographique, l'infiltration etc... Une estimation précise des ressources en eau passe donc par la prise en compte des pluies journalières, les débits moyens annuels et mensuels, la variation saisonnière des débits et l'intensité des débits des crues. Dans notre analyse nous sommes basés sur les données des stations qui se trouvent à l'intérieur du bassin versant : c'est le cas pour les stations d'Ouenza, station de Morsott, station de Souk-Ahras et la station d'El Aouinet. Les caractéristiques de ces stations hydrométriques sont consignées au (Tabl n° 42).

4.2- Stations hydrométriques:

Le bassin versant de la Medjerda compte (04) stations hydrométriques. Toutes ces stations appartiennent au réseau hydrologique de l'A.N.R.H (Fig n° 11)

Tabl n° 42: Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin versant de la Medjerda

Station	Code	Commune	Coordonnées		Période d'observation
			X	Y	
Souk Ahras	120101	Hennencha	7,902	36,267	1975-2010
Morsott	120309	Morsott	8,008	35,593	1973-2010
Ouenza	120401	Ouenza	8,129	35,991	1972-2010
El Aouinet	120404	El Aouinet	7,876	35,863	1972-2010

4.3- Choix de l'année hydrologique :

l'abondance moyenne de l'écoulement a pour unité chronologique de référence" l'année moyenne", mais, nous savons que pour des variables considérées comme aléatoire telles que les débits, cette notion d'année moyenne est sujette à caution du fait qu'elle conduit à une "régularisation artificielle" du régime hydrologique par compensation des années humides et sèches *G.Rémeniéras (1980)*. C'est pourquoi, elle est généralement substituée par la détermination des fréquences traduisant la distribution effective des modules dans le temps et leurs durées de récurrence. Cependant, pour établir un bilan moyen de l'écoulement conforme à un cycle hydrologique complet, on est tenu de se fonder sur une année hydrologique de référence comprise entre deux étiages annuels successifs *A. Ghachi (1982), Bouanani (2004)*. Le choix des limites de ce cadre temporel de base est délicat, car il faut tenir compte de la combinaison des principaux termes du cycle annuel de l'eau : les précipitations, l'évapotranspiration et l'écoulement (superficiel et souterrain).

Ce choix est à justifier par des critères aussi bien physiques que statistiques. En Algérie, l'année hydrologique adoptée par les services de l'Hydraulique correspond à l'année climatique définie précédemment (septembre - août). Cette année hydrologique est assez bien adaptée au régime thermique qui se traduit par une saison froide de novembre à avril et par une saison chaude de mai à octobre. Cependant, les réserves en eaux souterraines épuisées en saison estivale ne sont en voie de reconstitution qu'en novembre *Belloula.M (2008)*. Il en est de même pour l'écoulement de surface, car les précipitations de septembre et octobre ne provoquent pas efficacement le ruissellement, non seulement en raison de l'évapotranspiration encore élevée en cette période *Bouanani (2004)*. Mais aussi de la dessiccation profonde des sols se traduisant par une forte capacité de rétention capillaire.

4.4- Débits moyens annuels :

L'écoulement moyen annuel ou l'abondance annuelle est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en (365) jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m^3/s et le module spécifique se traduit en $(L.s.km^2)$.

En notera que tous les types d'écoulement sont intégrés par l'écoulement pluvial concentré et qui s'enchaînent dans le temps et dans l'espace. Il traduit le comportement hydrologique du bassin versant selon l'observation du volume global de l'eau qui s'écoule à l'exutoire. Nous n'effectuerons pas une extension des données hydrométriques (maximisation intronisée que de l'information au sens qu'il semble préférable de baser notre analyse sur des données réellement observées et non théoriquement extrapolées, d'autant plus que l'étendue des échantillons et la forte irrégularité du régime hydrologique des bassins ne justifient guère une telle opération *P. Dubreuil (1974), A.Musy et al (1998), Belloula. M (2008)*. Dans notre analyse on dispose une série de données hydrométriques qui varie entre 36 à 39 ans d'observation (Les données sont fournies par les services de l'A.N.R.H) (*Tabl n° 43*).

4.4.1- Variations des débits annuels moyens bruts (m^3/s) :

La variation annuelle des débits au niveau des quatre stations (*Tabl n° 43*), montre une fluctuation importante des débits d'une année à l'autre. Cette variation annuelle des modules nous a permis de dire que l'oued Chabro débite ($2.34 m^3/s$) avec une aire de réception de ($3445 km^2$), l'oued Mellegue à transité un débit de ($3.48 m^3/s$) pour une surface drainée de ($1513 km^2$), l'oued Medjerda à Souk Ahras, qui est un bassin de montagne abrite une superficie de ($1519 km^2$) présente un débit de ($3.19 m^3/s$), (*Fig n°40*).

Tabl n° 43 : Variations des débits moyens annuels, Débits spécifiques (Medjerda-Algérie).

Bassin	Oued		Chabro		Oued Mellegue		Oued Medjerda	
Stations	Morsott		El Aouinet		Ouenza		Souk Ahras	
Année	Q m ³ /s	q(l/s/km ²)	Q m ³ /s	q(l/s/km ²)	Q m ³ /s	q(l/s/km ²)	Q m ³ /s	q(l/s/km ²)
1972	-	-	18.24	5.76	5.73	1.97	-	-
1973	0.18	0.06	3.16	0.99	0.88	0.30	-	-
1974	0.19	0.07	1.04	0.33	2.14	0.74	-	-
1975	0.23	0.08	1.81	0.57	2.07	0.71	0.47	0.31
1976	0.3	0.09	2.63	0.83	2.92	1.01	1.72	1.13
1977	0.13	0.04	1.87	0.59	1.49	0.51	1.34	0.88
1978	0.13	0.04	0.84	0.26	1.81	0.62	2.16	1.42
1979	0.24	0.07	1.21	0.38	3.13	1.08	3.62	2.38
1980	0.09	0.03	0.89	0.28	1.24	0.47	0.43	0.28
1981	0.3	0.09	1.56	0.49	2.36	0.81	1.03	0.68
1982	0.11	0.04	34.4	10.86	5.24	1.81	0.77	0.51
1983	0.27	0.08	0.61	0.20	1.99	0.68	1.83	1.20
1984	0.06	0.02	0.7	0.22	2.4	0.82	0.5	0.33
1985	0.16	0.05	1.03	0.32	1.9	0.65	0.88	0.58
1986	0.13	0.04	0.28	0.09	2.05	0.71	0.56	0.37
1987	0.22	0.07	1.14	0.36	3.32	1.14	1.48	0.97
1988	0.12	0.04	1.21	0.38	2.4	0.82	1.01	0.66
1989	0.58	0.18	2.66	0.84	6.5	2.24	3.4	2.24
1990	0.71	0.23	3.26	1.03	6.27	2.16	3.19	2.09
1991	0.32	0.11	1.2	0.37	1.78	0.61	5.8	3.82
1992	0.28	0.09	0.47	0.15	1.49	0.51	17.11	11.26
1993	0.0	0.0	1.77	0.56	0.45	0.15	0.5	0.33
1994	0.04	0.01	1.65	0.52	2.03	0.70	7.75	5.10
1995	0.46	0.16	0.97	0.31	11.99	4.13	3.62	2.38
1996	0.0	0.0	2.14	0.67	13.8	4.75	8.93	5.88
1997	0.29	0.09	0.88	0.28	2.33	0.80	5.31	3.49
1998	0.34	0.11	1.06	0.34	2.68	0.92	0.73	0.48
1999	0.37	0.12	0.3	0.09	4.75	1.63	4.54	2.98
2000	0.12	0.04	0.55	0.17	1.5	0.52	3.39	2.23
2001	0.67	0.22	2.63	0.83	2.41	0.83	3.06	2.01
2002	0.92	0.29	0.67	0.21	4.14	1.42	1.5	0.98
2003	0.74	0.23	2.62	0.83	5.6	1.93	1.13	0.74
2004	1.46	0.46	0.78	0.25	11.99	4.13	3.19	2.09
2005	0.19	0.06	1.83	0.58	5.73	1.97	1.48	0.97
2006	1.55	0.50	3.27	1.03	0.88	0.30	3.01	1.98
2007	1.06	0.34	1.04	0.33	2.68	0.93	4.54	2.98
2008	1.13	0.36	1.08	0.34	1.24	0.43	3.4	2.23
2009	0.49	0.15	1.56	0.49	2.14	0.74	0.73	0.48
2010	0.33	0.10	2.09	0.66	2.4	0.82	7.88	5.19
Moyenne	0.40	0.13	2.34	0.74	3.48	1.10	3.19	2.09
Ecart type	0.38	0.12	5.41	1.70	3.10	1.05	3.29	2.13
Cv	0.95	0.94	2.31	2.28	0.89	0.88	1.03	1.02

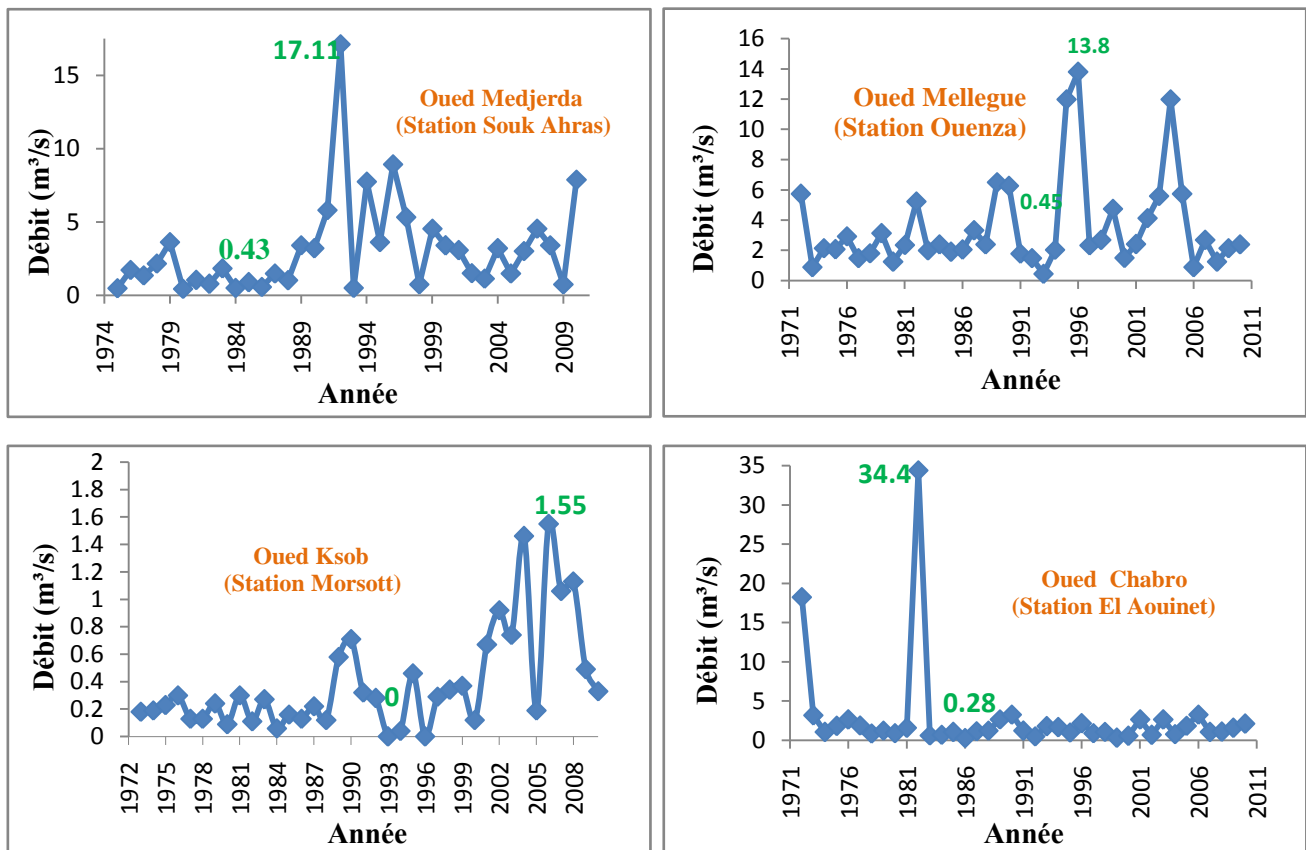


Fig n° 40 : Variation interannuelle des débits moyens annuels des différentes stations (1972/2010)

4.4.2- Variations des débits annuels moyens spécifiques (l/s/km²) :

Afin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans les différents sous bassins, nous utiliserons les modules spécifiques. L'abondance spécifique des bassins versant varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et aussi en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque sous bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal ; c'est donc un élément purement géographique. Par ailleurs, le bilan hydrologique suppose l'unification des différentes unités utilisées dans ce bilan, l'unité adéquate la plus utilisée est la lame d'eau.

Tabl n°44 : Débits spécifiques et lames d'eau écoulées.

Bassins	Station	E (mm)	q (l/s/km²)	A(hm³)
Oued Ksob	Morsott	15.3	0.13	10.23
Oued Chabro	El Aouinet	8.50	0.74	55.42
Oued Mellegue	Ouenza	15.35	1.10	100.08
Oued Medjerda	Souk Ahras	75.91	2.09	106.09

E : lame d'eau écoulée (mm) ; q : débit spécifique (l/s/km²) ; A : apport moyen annuel (hm³).

Le bassin versant de la Medjerda (Souk Ahras) s'étend sur une superficie de (1519 km²), avec un débit spécifique est de (2.09 l/s/km²) qui correspondant à une lame d'eau écoulée de (75.91 mm). Par contre, le bassin versant de l'oued Chabro son débit spécifique est de (0.74 l/s/km²), soit une lame d'eau écoulée de (8.50 mm).

Le bassin versant de Mellegue présente une superficie de (1513 km²) avec un débit spécifique et de (1.10 l/s/km²), une lame d'eau écoulée de (15.35 mm). A partir de ces résultats. De ce fait, on peut dire que ces résultats plus au moins importante sont influencés principalement par la forme, la surface aussi la lithologie des sous bassins versants.

4.4.3- L'irrégularité inter annuelle des modules :

L'irrégularité inter annuelle de l'écoulement peut être mesurée par les variations de l'hydraulicité, c'est à dire le rapport du débit d'une année particulière (Qi) au débit moyen d'une longue série d'observation (Qmoy). Elle peut être complétée par d'autres critères statistiques simples tels que, le coefficient de variation, ainsi que le coefficient d'immodération (R) donné par le rapport des modules extrêmes (*Tabl n° 45*).

Tabl n° 45 : valeurs caractéristiques des modules au niveau des bassins versants.

Stations	Moyenne (m ³ /s)	Max (m ³ /s) (M)	Min (m ³ /s) (m)	Nbre d'années > moyenne	Coeff. Immodération R = QM/Qm	Coefficient Variation
Morsott	0.40	1.55 (2006)	0.0 (1996)	11	1.55	0.94
El Aouinet	2.34	34.4 (1982)	0.28 (1986)	09	122.85	2.28
Ouenza	3.48	13.8 (1996)	0.45 (1993)	11	30.66	0.88
Souk Ahras	3.19	17.11 (1992)	0.43 (1980)	15	39.79	1.02

4.4.3.1- Coefficient d'immodération (R):

Les coefficients d'immodération illustrée dans le (*Tabl n° 45*) sont plus au moins élevés, ils varient entre (1.55 et 122.85). Cette valeur maximale (122.8) montre une irrégularité des débits interannuels.

4.4.3.2- Coefficient de variation :

Les valeurs du coefficient de variation (Cv) sont élevées (*Tabl n° 45*) On remarquant les plus fortes valeurs au niveau de Souk Ahras et d'El Aouinet. Cette variabilité s'explique par la présence d'une période Sèche et aussi l'alimentation pluviale irrégulière des cours d'eau.

4.4.3.3- L'hydraulicité :

Les courbes de variations interannuelles des débits (Fig n° 40), montrent une forte variabilité des débits d'une année à l'autre, et les valeurs de l'hydraulicité qui sont en majorité inférieures à la moyenne annuelle des débits (Tabl n° 46) ; donc plus de 50% des années hydrologiques sont déficitaires. Remarque, certaines valeurs des modules annuels sont élevées, conséquence aux fortes crues qu'avait subie le bassin.

Tabl n° 46 : Hydraulicité des différentes stations de la Medjerda.

Station	Souk Ahras	Morsott	Ouenza	El Aouinet
Année	Qi/Qm	Qi/Qm	Qi/Qm	Qi/Qm
1972	-	-	1.64	7.79
1973	-	0.45	0.25	1.35
1974	-	0.47	0.61	0.44
1975	0.15	0.57	0.59	0.77
1976	0.54	0.75	0.84	1.01
1977	0.42	0.32	0.43	0.79
1978	0.68	0.32	0.52	0.36
1979	1.13	0.60	0.89	0.52
1980	0.13	0.22	0.36	0.38
1981	0.32	0.75	0.68	0.67
1982	0.24	0.27	1.51	14.71
1983	0.57	0.67	0.57	0.26
1984	0.16	0.15	0.69	0.29
1985	0.27	0.40	0.54	0.44
1986	0.17	0.75	0.59	0.65
1987	0.46	0.55	0.95	0.49
1988	0.32	0.30	0.69	0.52
1989	1.06	1.45	1.87	1.14
1990	1.0	1.77	1.80	1.39
1991	1.82	0.80	0.51	0.51
1992	5.36	0.70	0.43	0.20
1993	0.16	0.0	0.13	0.75
1994	2.3	0.1	0.58	0.71
1995	1.13	1.15	3.45	0.41
1996	2.79	0.0	3.96	0.91
1997	1.66	0.72	0.67	0.38
1998	0.23	0.85	0.77	0.45
1999	1.42	0.92	1.36	0.19
2000	1.06	0.30	0.43	0.23
2001	0.96	1.67	0.69	1.12
2002	0.47	2.3	1.19	0.29
2003	0.35	1.85	1.61	1.12
2004	1.0	3.65	3.45	0.33
2005	0.46	0.47	1.65	0.78
2006	0.94	3.87	0.25	1.39
2007	1.42	2.65	0.77	0.44
2008	1.06	2.82	0.36	0.46
2009	0.23	1.22	0.61	0.66
2010	2.47	0.82	0.69	0.89
Max	5.36	3.87	3.96	14.71
Min	0.13	0.0	0.13	0.19

4.4.4- Ajustement des débits annuels :

Dans ce travail, nous essayons de trouver une loi d'ajustement de la distribution des débits annuels. La variabilité des débits sur la période considérée, mise en évidence par les coefficients de variation, nous laisse penser à un ajustement de type Log-normal. Pour vérifier cette adéquation, nous passons à l'ajustement graphique puis au test d'adéquation.

4.4.4.1- Ajustement graphique :

Pour mieux apprécier le phénomène d'irrégularité, il est nécessaire de faire une analyse statistique des apports liquides, et pour appréhender la place dynamique du régime hydrologique on utilisera la loi de Galton pour essayer de les ajuster à notre échantillon.

La loi de Galton est représentée par la formule suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

D'où : $u = a \log(x - x_0) + b$

u : Variable transformée qui s'apparente à la variable réduite de Gauss.

x : Variable d'origine.

x_0 : Paramètre de position.

Tabl n° 47 : Les paramètres empiriques (loi log normal (Galton)).

Stations	\bar{x}	δ	Cv	Droite d'Henry
Souk Ahras	3.19	3.29	1.02	Log Q = 3.19 + 3.29 u
Ouenza	3.48	3.10	0.88	Log Q = 3.48 + 3.10 u
El Aouinet	2.34	5.41	2.28	Log Q = 2.34 + 3.41 u
Morsott	0.40	0.38	0.94	Log Q = 0.40 + 0.38 u

Le test graphique (Fig n° 41) montre que les débits moyens annuels s'ajustent bien à la loi Log-normal.

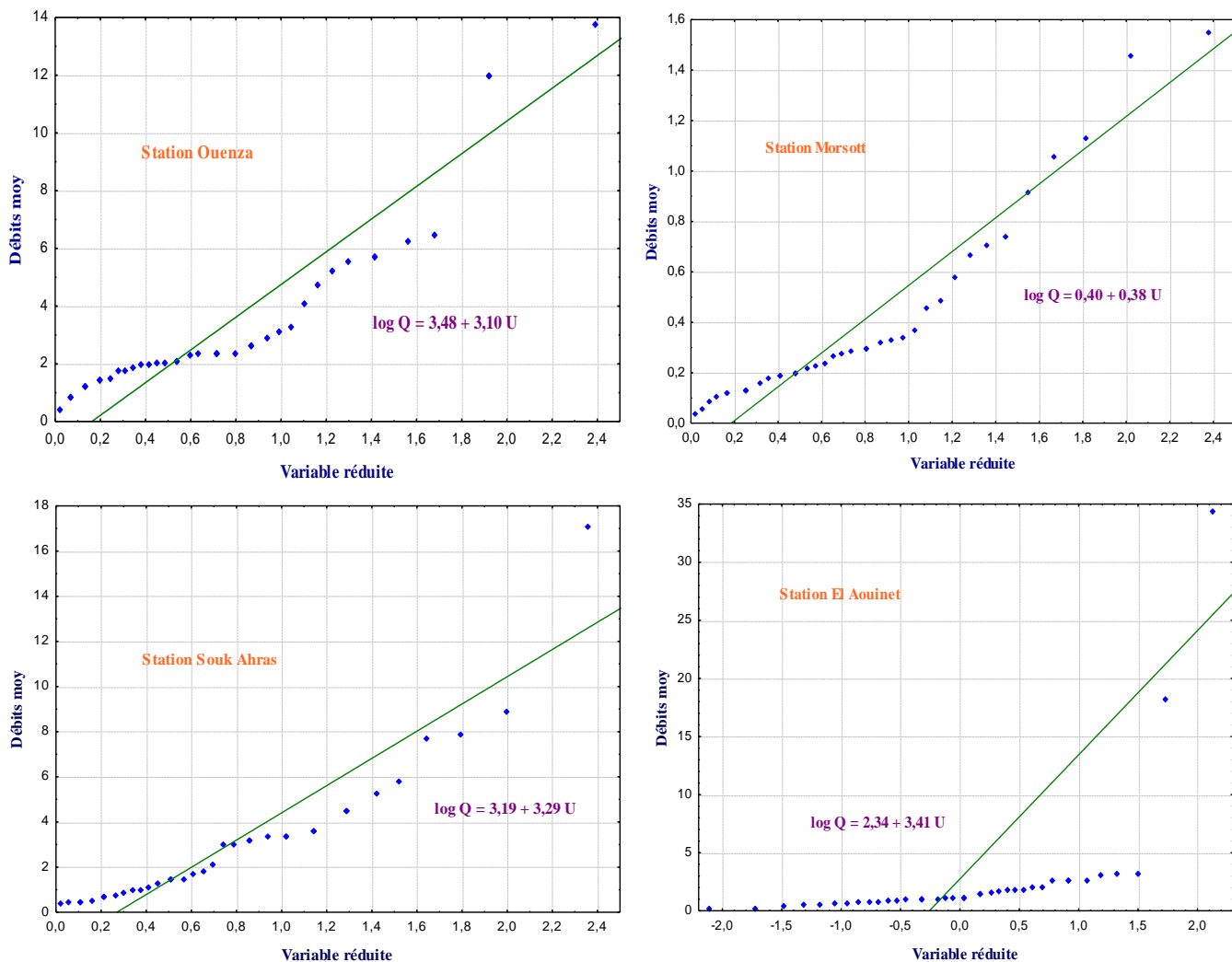


Fig n° 41: Ajustement des débits moyens annuels d'oued Medjerda à une loi log-normale (différentes stations de la Medjerda 1972-2010).

4.4.4.2- Test d'adéquation d'une loi théorique

Il permet de juger la qualité de l'ajustement d'une distribution théorique à une distribution expérimentale. Dans notre cas, l'adéquation à la loi log normal a été testée par le test de Kolmogorov - Smirnov.

a- Test Kolmogorov-Smirnov:

Tabl n°48: Test d'adéquation (Kolmogorov-Smirnov).

Stations	P-Value
Souk Ahras	0.50
Ouenza	0.30
Morsott	0.86
El Aouinet	0.20

Etant donné que la P-Value calculée est supérieure au niveau de la signification $\alpha = 0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse. Alors l'ajustement d'une loi log normal (Galton) est donc confirmé pour les stations de Souk Ahras , Ouenza , El Aouinet et Morsott.

4.5- Modules caractéristiques :

Les modules caractéristiques, pour les périodes de récurrence données sont consignés dans le (Tabl n° 49)

Tabl n° 49 : Modules caractéristiques en (m^3/s) pour les périodes de récurrence.

Station\période	02 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Souk Ahras	0.04	1.64	5.53	20.63	46.95
Morsott	0.001	0.03	0.3	0.41	0.43
Ouenza	0.03	1.72	5.40	18.68	40.54
El Aouinet	0.01	0.82	2.89	11.28	26.45

4.6- Bilan moyen annuel de l'écoulement :

Nous exprimons par (P) la tranche d'eau précipitée et par (E) la lame d'eau écoulée équivalente en mm. La différence de ces deux notions (P-E) donne ce qu'on appelle : déficit moyen annuel de l'écoulement (D) en (mm). Le rapport (E / P) est appelé, coefficient moyen annuel de l'écoulement (C). Pour cette étude, nous retiendrons l'année hydrologique correspondant à l'année climatique (septembre- août) adoptée par l'A.N.R.H , (Tabl n° 50).

Tabl n° 50 : Bilans moyens annuels de l'écoulement des différentes stations.

Bassins	Station	période	P (mm)	E (mm)	D (mm)	C (%)
Oued Medjerda	SoukAhras	1975-2010	545.07	75.91	469.16	13.93
Oued Ksob	Morsott	1973-2010	284.66	15.30	269.36	5.37
Oued Mellegue	Ouenza	1972-2010	319.78	15.35	304.43	4.80
Oued Chabro	El Aouinet	1972-2010	275.02	8.50	266.52	3.09

D'après les résultats du (Tabl n°50) on constate que les valeurs du déficit annuel moyen (D) calculé augmentent avec l'accroissement de la pluviométrie moyenne annuel (P).

4.7- Débits moyens mensuels et saisonniers :

L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence les régimes des cours d'eau et leurs variations inter annuelles ou inter saisonnières. Ces régimes peuvent être traduits par divers critères numériques et graphiques parmi lesquels on retiendra, principalement les coefficients mensuels de débits (C.M.D).

4.7.1- Coefficient mensuel de Débits :

Les coefficients mensuels ou rapports des débits moyens mensuels au module de la période considérée, pris pour l'unité, ont l'avantage de permettre la comparaison des variations saisonnières du régime des cours d'eau de débits très différents. Les (CMD) inférieurs à l'unité correspondent aux mois de basses eaux et les (CMD) supérieures à l'unité représentent les mois de hautes eaux (Tabl n° 51)(Fig n°42).

Tabl n° 51 : Répartition des débits mensuels des différents bassins versant :

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
Oued Medjerda													
M (m ³ /s)	0.98	1.97	2.44	3.22	9.61	4.36	5.31	3.98	3.63	1.16	1.86	1.83	3.19
CM D	0.31	0.62	0.76	1.01	3.01	1.37	1.66	1.25	1.14	0.36	0.58	0.57	-
Max	33.3	19.5	32.2	33.2	32.23	35.68	16.6	17.6	33.3	12.5	3.26	2.41	22.65
Min	0.02	0.03	0.03	0.1	0.16	0.31	0.38	0.1	0.04	0.03	0.02	0.0	0.10
δ	5.54	7.45	7.69	5.73	11.67	11.28	8.35	7.37	8.83	5.51	7.47	7.48	3.29
CV	5.65	3.78	3.15	1.78	1.21	2.58	1.57	1.85	2.43	4.75	4.01	4.09	1.02
Oued Mellegue													
M (m ³ /s)	8.5	5.2	3.3	2.5	1.9	1.8	2.9	2.7	4.2	3.5	0.6	2.3	3.48
CM D	2.44	1.49	0.95	0.72	0.55	0.52	0.83	0.77	1.21	1.01	0.17	0.66	-
Max	91.2	21.7	30.4	28.5	19.3	12.8	29.0	13.9	32.4	18.4	3.5	36.7	28.15
Min	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03
δ	20.3	6.44	5.96	5.23	4.01	3.19	6.55	3.71	6.62	4.40	1.02	6.72	3.10
CV	2.39	1.24	1.81	2.09	2.11	1.77	2.26	1.37	1.57	1.26	1.7	2.92	0.88
Oued Ksob													
M (m ³ /s)	0.70	0.29	0.66	0.51	0.38	0.33	0.2	0.29	0.46	0.40	0.22	0.26	0.40
CM D	1.75	0.73	1.65	1.27	0.95	0.83	0.50	0.72	0.15	1.00	0.55	0.65	-
Max	3.25	1.90	4.70	9.36	3.90	3.70	1.26	3.60	3.61	2.60	4.41	6.79	4.09
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
δ	0.83	0.42	1.25	1.54	0.79	0.69	0.29	0.61	0.81	0.66	0.73	1.11	0.38
CV	1.18	1.45	1.89	3.02	2.08	2.09	1.45	2.1	1.76	1.65	3.32	4.27	0.94
Oued Chabro													
M (m ³ /s)	2.7	4.8	2.9	2.2	1.4	2.1	1.5	0.9	1.3	1.4	0.8	0.7	2.34
CM D	1.15	2.05	1.24	0.94	0.60	0.89	0.64	0.38	0.56	0.59	0.34	0.30	-
Max	33.3	33.3	33.3	32.2	32.2	35.7	13.7	5.9	9.7	5.4	4.7	3.2	17.53
Min	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
δ	5.54	10.1	5.88	5.35	5.23	6.01	2.81	1.43	1.88	1.83	1.49	1.09	5.41
CV	2.05	2.1	2.03	2.43	3.73	2.86	1.87	1.58	1.44	1.30	1.86	1.56	2.28

M : débit moyen (m³/s), **CMD** : coefficient mensuel de débit, **Max** : débit maximum du mois, **Min**: débit minimum du mois, **δ**: écart type, **Cv** : coefficient de variation.

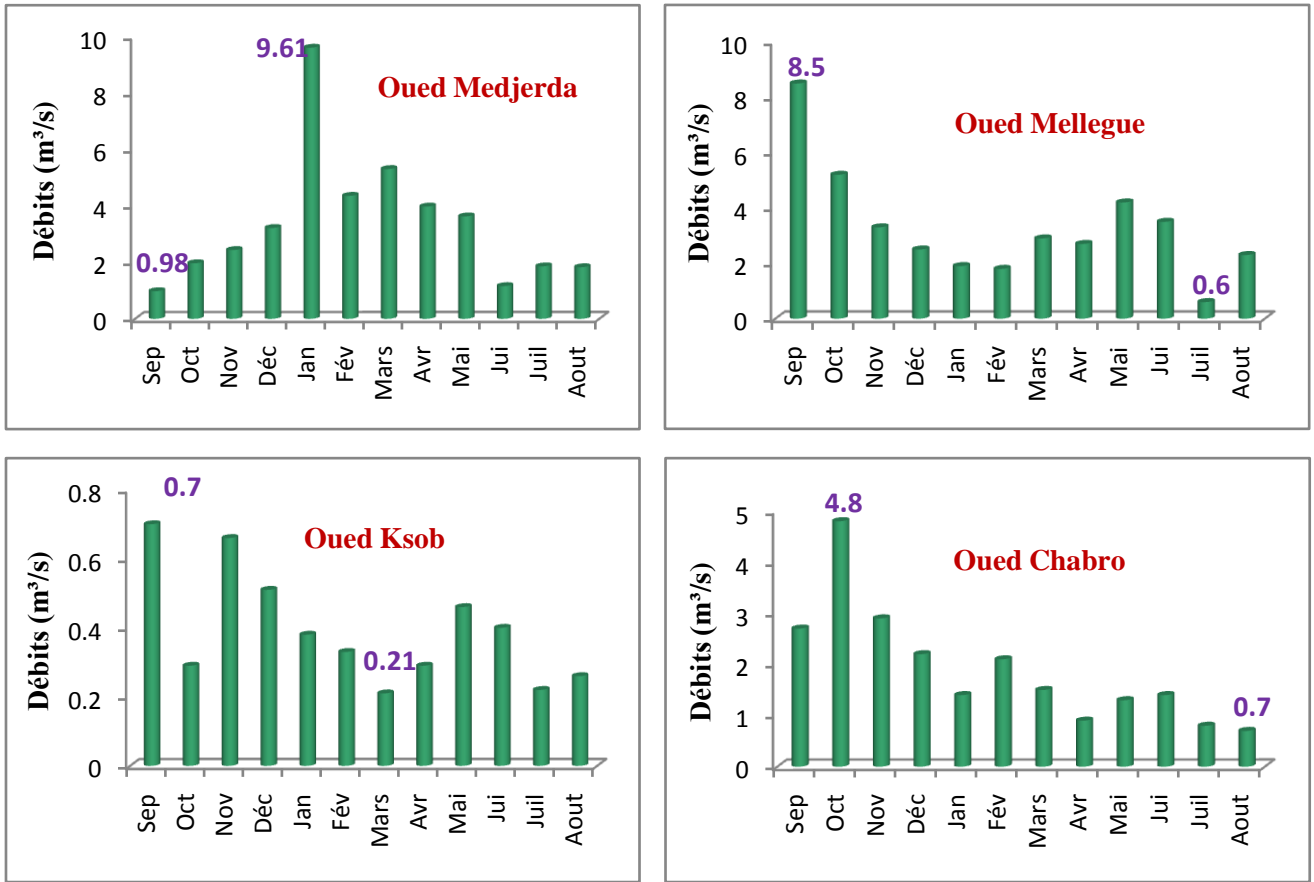


Fig n° 42 : Variations des débits moyens mensuels des différents oueds de la Medjerda

D'une manière générale Le régime moyen de notre bassin versant est pluvial. Celui-ci comporte essentiellement deux périodes : Période de hautes eaux (saison froide) qui s'étale du mois de Janvier au mois de Mai et la période de basses eaux (saison chaude) qui s'étale du mois de Juin jusqu'au mois de Septembre. D'après les résultats obtenus (Fig n° 42) on constate :

- 1- Pour le bassin de Medjerda (Souk Ahras), la période des hautes eaux commence du mois de Janvier avec un maximum de débit (9.61 m³/s) jusqu'au mois de Mai ; sachant que les pluies du début de l'année climatique n'interviennent pas aux écoulements superficiels. La période des basses eaux commence au mois de juin, avec un minimal de débit enregistré au mois de septembre (0.98 m³/s).
- 2- Pour les bassins d'Oued Ksob, Oued Chabro et Oued Mellegue , la période des hautes eaux est nettement marquée au cours des trois mois successifs (Septembre, Octobre, Novembre). La période de basses eaux commence en Mai, il en est de même pour la moyenne mensuelle minimale qui est enregistrée durant les mois de juillet et Aout. Cette variation saisonnière s'explique par l'importance du paramètre de l'évapotranspiration.

4.8- Etude des débits extrêmes :

L'étude des crues permet de mettre en évidence la réaction du bassin versant pendant un pas de temps réduit à une averse ou séquence pluvieuse donnée. Cette réaction ou réponse du bassin est en fonction des caractéristiques propres des précipitations (hauteur, intensité et durée). On se limitera dans l'étude des crues, à leurs caractères généraux tels que, leur genèse, leur puissance, leur fréquence en précisant par ailleurs, le potentiel hydrologique énorme qu'elles représentent. L'étude des étiages, phénomènes moins brutaux dans leur apparition, permet de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement et surtout de préciser les restitutions des nappes aquifères à l'écoulement fluvial. Ils seront envisagés du point de vue de leur genèse et leur évolution dans le temps.

4.8.1- Les crues :

Les crues représentent un des traits fondamentaux du régime d'un cours d'eau, et l'étude de crues des oueds de l'Algérie reste un domaine inconnu, seules quelques indications sont données dans les annuaires hydrologiques algériens. Il convient de distinguer crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison froide (période de hautes eaux), qu'en saison chaude (période de basses eaux) *R. Frécaut (1971)*. Pour certains auteurs les crues sont des débits égaux ou supérieurs à un certain multiple du module annuel (03 à 05 fois le module). Une crue annuelle est le débit le plus fort observé dans l'année *G.Remenieras(1980)*.

4.8.2- Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles :

Dans la plus part des études consacrées à l'hydrologie des bassins versants Sud Ouest méditerranéens, les séries des pluies annuelles sont distribuées généralement selon une loi normale de Gauss *S.M. Hayane (1983)*, *A. Mebarki (1984)*, *A. Ghachi (1986)*, *A. Megnounif (1999)* et *All, k. Baba Hamed (2002)*, *Bouannani (2004)*, les modules à une loi dissymétrique log-normale de Type Galton, *A. Mebarki (1984)*, *A. Ghachi (1986)*, *R. Taïbi (2000)*, *N. Khalil (2002)* la distribution des débits maximum de crues reste mal déterminée, hormis quelques études fragmentaire où les auteurs ont utilisé soit la loi de Gumbel *S.M. Hayane (1983)* soit celle de Frechet *A. Ghachi (1986)* . En effet, la distribution statistique d'un échantillon maximum annuel n'est jamais normale. Il semblerait assez logique qu'elle suive une loi de Gumbel ou de Jenkinson *M. Roche, (1963)*. D'autres lois ont été utilisées notamment en régime tropical, en particulier celles de Goodrich, de Gibrat-Gauss ou de la loi de *Pearson III Roche(1963)*. En régime fluvial Nord méditerranéen, les débits maximums annuels suivent une loi de Galton, Gumbel ou *PearsonIII Dubreuil (1974)*, *Laborde (1997)*.

4.8.2.1- Méthodologie :

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné, afin d'en définir les probabilités d'apparition future *Bobée et Ashkar, (1991)*. L'analyse fréquentielle fait appel à diverses techniques statistiques et constitue une filière complexe qu'il convient de traiter avec beaucoup de rigueur. La validité des résultats d'une analyse fréquentielle dépend du choix du modèle fréquentiel et plus particulièrement de son type. Diverses lois peuvent contribuer à faciliter ce choix, mais il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible. Il est en effet peu probable que les crues suivent une loi particulière *Bobée (1999)*. Le choix d'un type de modèle probabiliste est souvent basé sur des habitudes locales, qui, à la longue, deviennent de véritables coutumes. Un tel choix résulte fréquemment de l'expérience d'un ou de plusieurs auteurs, constituant peu à peu des écoles. L'attitude du praticien, suivant telle ou telle école, est légitime dès lors qu'elle le fait bénéficier d'une grande somme d'expérience, mais elle a aussi ses dangers *A.Musy (2001)*. En effet elle peut conduire à perpétuer un choix, parfois mal fondé, dans des situations, où il peut se révéler inadéquat. Dans certains pays, ou dans certaines administrations, il existe en effet des règles ou normes qui fixent la méthodologie d'une analyse fréquentielle. Pour l'étude des débits maximums, par exemple, la loi *log-Pearson III* est recommandée aux Etats-Unis.

La loi normale s'applique généralement bien à l'étude des modules annuels des variables hydro-météorologiques en climat tempérée. La loi log-normale est préconisée par certains hydrologues dont *V. T. Chow (1987)*, qui la justifient en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. *E-J. Gumbel* postule que la loi double exponentielle, ou loi de *Gumbel*, est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de (n) valeurs. Aussi et pour plus de détails théoriques sur les lois utilisées dans l'analyse fréquentielle des débits extrêmes, on se référera particulièrement à la thèse *R. Naulet (2002)*. Notre échantillon (différentes stations) est soumis à un ajustement selon un ensemble de lois statistiques et une analyse comparative, on a choisi la meilleure adéquation qui fait l'objet de cette analyse statistique, on remarque que l'intervalle de confiance est à (95 %). Les résultats du traitement statistique sont présentés dans (*Fig n° 43*) et (*Tabl n°52, Tabl n° 53*).

Tabl n° 52 : Ajustement des séries des débits maximums instantanés correspondant aux différents bassins étudiés.

Bassin	Loi d'ajustement	Moyenne	Ecart type	Coef. de variation
Oued Medjerda	$Q= 70.23+73.94U$	70.23	73.94	1.05
Oued Chabro	$Q=39.73+35.26U$	39.73	35.26	0.89
Oued Mellegue	$Q=107.60+86.35U$	107.6	86.35	0.80
Oued Mellegue	$Q=473.7+339.32U$	473.7	339.32	0.72

Tabl n° 53 : Estimation des Quantiles de crue des différents oueds.

Période	2	10	20	50	100
O.Medjerda	70.23	164.87	192.23	221.81	240.29
O.Chabro	39.73	84.86	97.91	112.01	120.83
O.Mellegue	107.6	218.13	250.07	278.47	306.21
O.Mellegue	473.7	908.03	1033.6	1169.3	1253.9

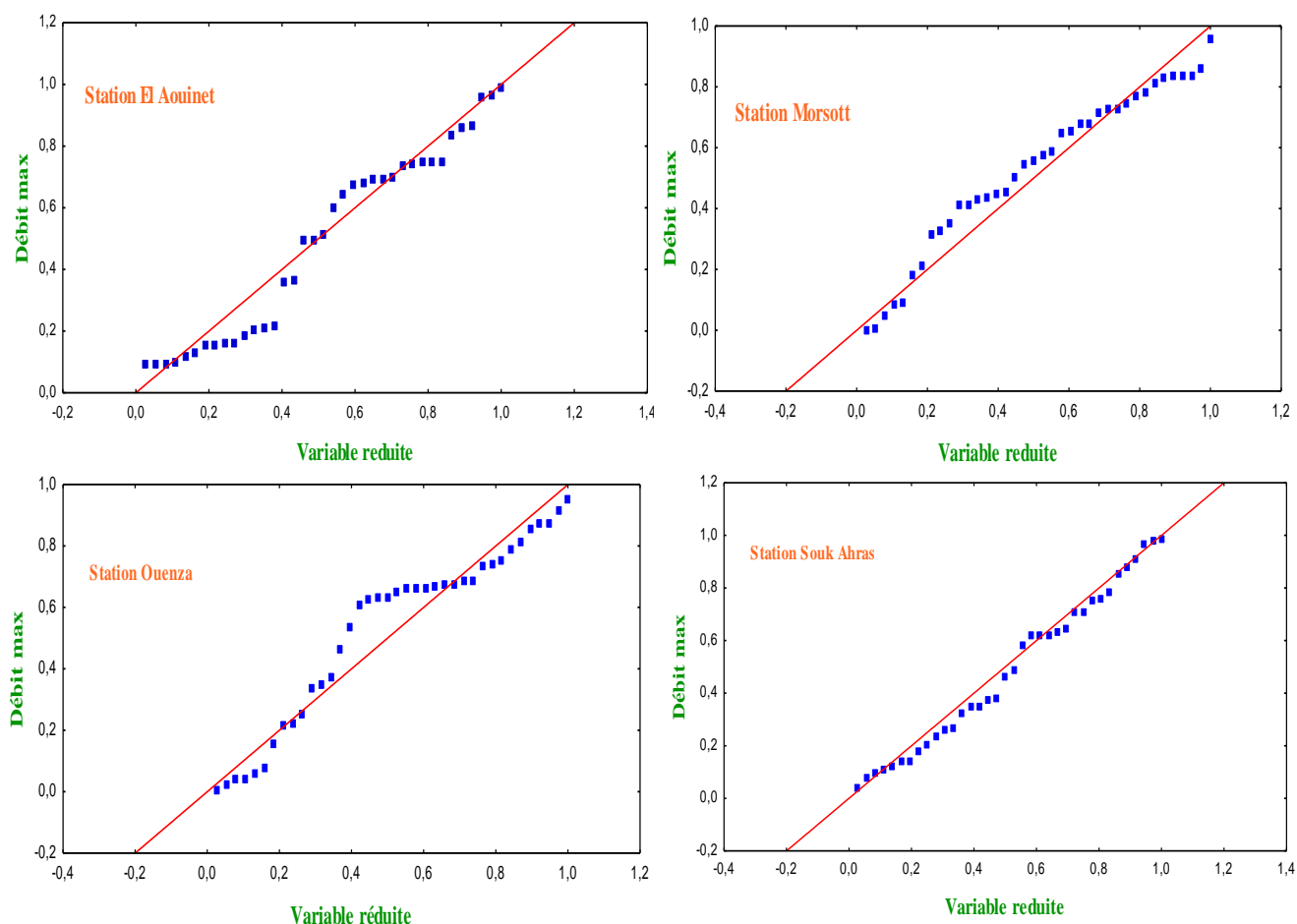


Fig n°43: Ajustement graphique des séries des débits maximums du bassin versant de la Medjerda

D'après les graphiques ci dessous (Fig n° 44), il ressort que l'utilisation des lois d'ajustement pour l'étude des débits extrêmes dans les zones semi-arides doivent pris avec prudence *Bouanani (2004)*. En effet, nous constatons que le régime d'écoulement est régit par les caractéristique physico-géologique du bassin versant, ainsi l'irrégularité des précipitations. Cette dernière, malgré leur faiblesse quantitative d'une manière générale peut avoir une très forte intensité en fréquence rare. Cette intensité croissante peut provoquer des crues de grande ampleur, ceci est expliqué par les résultats du (Tabl n° 49).

Conclusion

L'analyse statistique des données hydrologique nous a permis de saisir les variations spatiales de l'écoulement superficiel. Le régime saisonnier du bassin versant de la Medjerda est essentiellement pluvial qui se traduit par des crues plus au moins violentes, ces débits de crue permettent de mettre en évidence la réaction du bassin pendant un laps de temps réduit à une averse ou séquence pluvieuse donnée. De ce fait, la dynamique des cours d'eau doit être accrue et doit s'accompagner d'effets érosifs de plus en plus marqués et que notre zone d'étude demeure un milieu sensibilité.

TROISIEME PARTIE

MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE ET IDENTIFICATION DES ZONES VULNERABLE A L'EROSION HYDRIQUE

Chapitre 5

Erosion et Transport Solide

5.1- Introduction :

En raison de son climat semi-aride, de la présence de relief et de la pauvreté de la végétation, le grand bassin versant de la Medjerda (Confin Algéro-Tunisien) est l'une des régions les plus vulnérables à l'érosion des sols. Ce dernier est un processus qui tend à réduire à la surface des continents l'épaisseur des sols et des roches, en arrachant physiquement les particules solides qui sont exportées en suspension par le ruissellement superficiel vers les oueds où elles peuvent être transportés jusqu'aux mers et aux océans *Probst (1992)*. L'érosion est caractérisée par trois étapes, qui correspondent d'abord au détachement de particules de sols puis au transport, par différents agents ; de leur emplacement d'origine à un endroit de dépôt en aval, qui est l'ultime étape de l'érosion.

Un grand nombre de chercheurs ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes du transport solide et de quantifier les volumes des sédiments transportés. Dans ce contexte, on notera les travaux de *Tixeront (1960)*, *Heusch (1982)*, *Milliman et Meade (1983)*, *Sogreah (1983)*, *Walling (1984)*, *Lahlou (1990)*. D'autre part *Ghorbel et Claude (1977)*, *Demmak (1982)*, *Rais et Abidi (1989)*, *Snoussi et al (1990)*, *Merzouki (1992)*, *Bourouba (1996,1998)*, *Albergel et al (1998)*, *Moukhchane et al (1998)*, *Meddi (1999)*, *Chibanni, R et al (1999)*, *Ghnim (2001)*, *Megnounif et al (2003)*, *Bouanani (2004)*, *Khanchoul et al (2007)* et *Ghanim et al (2007,2008)* ont présenté en conclusion de leurs travaux des informations significatives sur le flux des sédiments transportés par les cours d'eau de quelques bassins Algériens Tunisiens, et Marocains.

Le présent travail a pour objectif de s'intéresser à l'étude du phénomène de l'érosion hydrique et du transport solide en suspension et leur dynamique par l'Oued Medjerda-Mellegue situé au nord-est de l'Algérie (partie amont du grand bassin versant de la Medjerda).

5.2- Les principaux agents de l'érosion hydrique :

5.2.1- Intensité des pluies :

Les pluies, lors de l'impact des gouttes, provoquent un détachement des matières et une destruction des agrégats lors de la conversion de l'énergie cinétique en efforts de cisaillement. Les premières gouttes de pluies qui arrivent au sol y pénètrent proportionnellement à son ameublissement et sa porosité. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement de particules et d'un tassement du sol.

Puis la couche superficielle s'humidifie, et l'on assiste au développement quasi simultané de trois processus : la désagrégation de la structure, la formation d'une pellicule de battance et l'érosion par « splash » *Benkhadra, H (1997)*. Et d'après *Feodoroff et al (1965)*, donnent des valeurs de (15 tonnes) de terre remuées par hectare pour une averse de (25 mm) et de (300 tonnes) par hectare pour une averse de (100 mm).

L'agressivité des pluies qui est fortement corrélée à la perte en terre dépend des milieux. Ainsi, en zone tempérée, elle varie entre (20 à 150) *Pihan (1978)* ; en zone méditerranéenne, elle varie entre (50 et 350) *Masson (1971)* ; en zone tropicale sèche, varie entre (200 et 500) *Roose (1973)* et en zone équatoriale, elle peut aller jusqu'à (1500-2000) *Roose (1980)*. L'évaluation de l'énergie cinétique des gouttes reste un bon critère d'évaluation de l'agressivité des pluies. Les recherches sur l'érosion ont abouti à la mise au point de différents indices d'érosivité du climat dont nous distinguons :

- L'indice (C) de Fournier qui montre qu'au niveau des grands bassins versants, il existe une bonne corrélation entre les transports solides et l'indice de la forme :

$$C = P^2 / P$$

P^2 : Précipitation moyenne du mois le plus humide (mm)

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

- La *F.A.O (1977)* a modifié l'indice de Fournier, en introduisant le calcul de la somme des 12 indices mensuels :

$$C = \sum P^2 / P$$

P^2 : Précipitations moyennes de chaque mois (mm).

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

- L'indice d'agressivité climatique *R Wischmeier (1959)*, qui présente un grand intérêt. Il reflète les relations entre la perte en terre et les caractéristiques des pluies :

$$R = (Ecq \times I_{30} \times 12,9) / 1000$$

Ecq : énergie cinétique globale d'une pluie unitaire (kg/m²).

I_{30} : intensité maximale en 30 min (mm/h).

(**Ecq**) est la somme des énergies cinétiques (Ec) calculées pour chacune des phase de l'averse et (Ec) correspond au produit de l'énergie unitaire par la hauteur d'eau précipitée (kg/m²/mm) :

$$Ec = (1,214 + 0,89 \log_{10} I) \times H$$

I : intensité de la phase pluviométrique (mm/h).

H : hauteur d'eau de la tranche de la phase pluviométrique considérée (mm).

Une goutte d'eau d'un diamètre donné, en tombant d'une hauteur suffisante, acquiert une certaine vitesse. Lorsqu'elle atteint le sol, elle dépense la plus grande partie de son énergie (due à sa masse et à sa vitesse) à écraser le sol et ensuite rejaillit sous forme d'une couronne de petites gouttelettes chargées de particules en suspension. La pluie agit mécaniquement sur le sol par son énergie cinétique E_c selon *Roose (1967)*.

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Où, m est la masse de la goutte (kg) et (v) la vitesse en (m/s), (E_c) est l'énergie cinétique en (joules).

Wischmeier et al, (1958), travaillant sur des pluies d'intensités homogènes, a établi une corrélation étroite entre l'énergie cinétique et l'intensité d'une pluie, selon la relation suivante :

$$E_c = 916 + 331 \log IP$$

(E_c) est l'énergie cinétique en j/m²/mm et IP : intensité de pluie en mm/h.

Jusqu'à présent on ne peut pas parler du transport, il faut que le ruissellement démarre pour qu'il y ait une prise en charge des particules détachées par la mise en suspension ou par charriage.

5.2.2- Ruissellement :

Le ruissellement consiste en un écoulement d'eaux de pluie ou de fusion, nivale ou glaciaire, plus ou moins durable et rapide, à la surface des versants. L'action morphogénique du ruissellement s'exprime par l'ablation, le transport et l'accumulation. L'ablation résulte de l'enlèvement des éléments des roches meubles et des formations superficielles. Avec le ruissellement concentré elle s'exerce linéairement, de sorte qu'elle crée des ravineaux, des ravines ou des ravins, suivant la profondeur de l'entaille.

Le ruissellement apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol *Horton (1993)*. Les plus faibles ruissellements se produisent lorsque les pluies tombent après une période sèche. Par contre, les ruissellements les plus élevés et active sur les sols nus ont lieu à une époque où le sol est déjà très humide dans le cas des pluies exceptionnelles *Chebbani, R et al (1999)*.

Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm *Laouina, A (1998)* sur sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur un sol humide et compact *Chibbani R et al (1997)*. Ces seuils de hauteur dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, mais aussi du volume de pluie tombant après saturation du sol) et surtout de l'état de surface du sol (plus le sol est dégradé plus le ruissellement est très rapide).

Aujourd'hui, la vitesse de ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel *Meyer et Monke (1965)*. Ce dernier a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse :

$$Vr = (I^{0.33} \cdot Qr^{0.33}) / n^{0.66}$$

Vr : Vitesse de ruissellement. **I** : Pente du terrain. **Qr** : Débit du ruissellement. **n** : Rugosité du sol.

5.2.3- L'infiltration :

La plupart des sols sont plus ou moins perméable et le coefficient de perméabilité représente la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol qui dépend essentiellement de la porosité de ce dernier. L'infiltration joue un rôle important contre l'érosion car elle renforce la résistance au cisaillement des sols. La compaction des sols, résulte de l'action des différents agents climatiques et aussi de l'activité de l'homme. Elle conduit à une réduction de la porosité du sol et donc la conductivité hydraulique. La diminution de la capacité d'infiltration constitue ainsi un facteur défavorable générateur de ruissellement et de transport de sédiments *Bouanani, A (2004)*.

5.2.4- Erodibilité des sols:

La notion d'état de surface nous renvoie directement vers la notion d'érodibilité, ce qui signifie la sensibilité d'un sol nu à l'érosion pluviale qui dépend de ses qualités intrinsèques : texture, structure, teneur en matière organique, la perméabilité *Lageat (2004)*. *Wischmeier* a proposé d'étudier l'érodibilité du sol au champ, dans des conditions standards qui servent de référence en tous points du globe. Il a utilisé pour cela l'indice d'érodibilité du sol (K), déterminé selon la forme suivante :

$$K = \frac{E}{R \times 2,24}$$

E : érosion en t/ha/an **R** : indice d'agressivité climatique.

Wischmeier et al (1971) a établi un nomographe qui permet de calculer l'érodibilité du sol en fonction de la texture, la structure, la perméabilité du terrain.

5.2.5- Le couvert végétal :

Le couvert végétal est l'un des éléments les plus importants qui s'adaptent le mieux pour diminuer le risque d'érosion *Valentin (1981)*. L'expérience montre que l'efficacité d'un couvert végétal à l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément récepteur est bas *Ruiz-Figuero (1983)*.

Cette efficacité intervient au niveau du sol par :

- L'interception nette : une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation, dans ce cas elle ne participe ni à l'infiltration ni au ruissellement.
- La dissipation de l'énergie cinétique, une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol et l'énergie cinétique des gouttes se trouve modifiée.

Cette protection peut être aussi assumée par des débris végétaux. Ceux-ci augmentent les forces de frottements, favorisent l'infiltration et diminuent ainsi la vitesse du ruissellement. D'après *Meyer et Mannering (1971)*, *Ludwing (1992)* entre un sol nu et un sol couvert par (2.5 t.ha-1) de résidus, la réduction du ruissellement est de l'ordre de (40%) alors que celle des pertes en terre atteint (90%). L'efficacité de cette protection dépend de la nature des résidus et de leur taux de recouvrement. Sous un couvert végétal naturel qui dépasse (40%) et sur fortes pentes, les pertes de terre peuvent être très réduites *Roose et al (1993)*. Dans les régions méditerranéennes semi-arides, les sols sous forêts bien entretenues sont considérés comme non sensibles à l'érosion hydrique *Delhoume (1981)*, *Martin (1975)*, car les végétations basses favorisent l'infiltration. Ainsi, beaucoup de ravines apparaissent sous pins d'Alep de 20 ans dont le recouvrement est inférieur à 40%. On observe l'apparition de nombreuses ravines qui proviennent des eaux de ruissellements non retenues par les forêts sur pâturées. En effet, le sol soumis au pâturage intensif devient plus compact, sa perméabilité diminue et le ruissellement de l'eau s'accroît ce qui entraîne des pertes de terres considérables. Ce fort ruissellement aboutit à la formation de profondes ravines lorsqu'il atteint des terres cultivées *Laouina et al (2000)*.

5.2.6- Pente et longueur de pente :

La topographie influence l'énergie du ruissellement superficiel et le développement de l'érosion, du moins lorsque le sol est nu ou peu couvert par la végétation *Corbel (1959)*, *Hadley et Schumm (1961)*, *Ahnert (1970)*. Les principaux éléments topographiques qui interviennent dans les phénomènes de l'érosion sont l'inclinaison et la longueur de la pente. L'inclinaison de la pente favorise le déplacement des particules détachées par le splash vers l'aval et également le ruissellement et le transport des particules, surtout sur sol nu *Fiandino (2004)*. Sur des versants fortement inclinés, le ruissellement se concentre et peut devenir la cause principale de l'érosion, surtout en zone méditerranéenne *Heusch (1970)*. *Zingg (1940)* a utilisé à partir d'un nombre d'expériences élaborées aux USA l'équation qui définit l'érosion comme :

$$X_c = 0,065 S^{1,49}$$

X_c : Perte en sol

S : Pente en %.

Il a trouvé qu'en doublant la valeur de la pente, la perte en terre augmente de 2,8 fois. En ce qui concerne la longueur des versants, plus le versant est long, plus le ruissellement superficiel s'accumule, se concentre et atteindre une vitesse d'écoulement suffisante pour transporter des matériaux du sol. *Wischmeier et Smith (1960)* ont proposé un abaque qui traduit les influences de la longueur et la pente selon la formule suivante :

$$SL = \frac{\sqrt{L}}{100} (0,76 + 0,93 S + 0,076 S^2)$$

L : longueur de la pente exprimée en pieds (1 pied=0,3048 m). **S** : pente en (%)

Dans les milieux semi-arides, le gradient de la pente est corrélé positivement avec le recouvrement du sol par les fragments de roches qui agissent en diminuant le ruissellement et la perte des sols *Abrahamas et Pearsons (1991)*, *Cooke et al (1993)*, *Simonton et Toy (1994)*. Ils s'accumulent sur une pente longue un plus grand volume d'eau *Mutcher et Greer (1980)* et le temps d'absorption par le sol de l'eau de ruissellement est plus grand sur les parcelles longues que sur les parcelles courtes *Duley et Ackerman (1934)*.

En Algérie, l'influence de la pente sur l'ampleur de l'érosion est très significative car l'érosion augmente avec la pente d'où 85% des superficies cultivables sont situées dans les régions montagneuses dont 63% sont à plus de 800m de hauteur et le quart présente des pentes supérieures à 25% *Ferchouhe (1998)*. D'autre part, la longueur des pentes influe aussi sur la naissance des rigoles qui dépend de l'interaction avec la perméabilité, la rugosité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal.

5.2.7- Etat hydrique initial:

L'état hydrique du sol a une très forte influence sur la dégradation au moment d'une pluie, la formation de croûtes et la réduction de l'infiltration résultante *Lebissonnais Y (1992)*. Les agrégats secs sont plus sensibles à l'éclatement. En effet l'intensité de ce processus croit avec le volume d'air piégé en particulier sous des pluies de forte intensité qui peuvent former des croûtes très rapidement, *Boiffin J (1984)*. Lorsque le sol en surface est argileux sensible à la dispersion par l'effet de l'impact des gouttes de pluie à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation, il y a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies *Chibbani R et al (1997)*.

5.3- Les différentes formes de l'érosion:

Plusieurs approches sont utilisées depuis de nombreuses années pour étudier la complexité de l'érosion et mieux cerner les mécanismes de ce phénomène. Par ailleurs L'évolution des formes d'érosion hydrique est souvent rapide et s'accompagne par une instabilité de certains versants. Ces formes ont été décrites par plusieurs chercheurs, notamment par *Noni et al (1997)*, sur versant volcaniques cultivés, où ils mettent en corrélation les dynamiques et les formes d'érosion *Daoudi et al (2009)*, sur le processus de ravinement à l'échelle de bassin versant. *Roose et al (2001)*, ont étudié les formes d'érosion, tout en mettant un accent particulier sur le ravinement et sa typologie en Algérie.

5.3.1- Erosion en nappe:

La dégradation du sol par érosion, du fait de l'impact des gouttes de pluie sur le sol et le transport des éléments détachés par le ruissellement en nappe *Roose (1994)*. Ce type d'érosion, entraîne des conséquences morphologiques et pédologiques suite à un décapage de l'horizon superficiel diminuant sa réserve en éléments fertilisants et un entrainement des particules les plus fines, de la matière organique et du carbonate de calcium. En Algérie, les chercheurs de *l'INRF* et de *l'OROSTOM* ont évalué les pertes en terres par l'érosion en nappe de (0,10 à 20 t/ha/an) d'après *Chebban R et al (1999)*.

5.3.2- Erosion par ravinement:

L'érosion par ravinement a déplacé (90 à 300 t/ha/an) en Algérie ce qui correspond à une vitesse d'altération des versants de (8 à 17 mm/an) *Chibbani R et al (1999)*. Lorsque le sol est peu perméable, saturé et peu couvert, le ruissellement est abondant. Ce dernier creuse des ravines qui suivent la ligne de la plus grande pente des versants et augmente les pointes de crue des oueds, ce qui favorise le sapement des berges et les glissements de terrain.

5.3.3- Erosion par sapement des berges:

L'érosion par sapement des berges se manifeste lors des crues de grande ampleur, où le cours d'eau est balayé de long en large. Ce type de dégradation des sols se manifeste surtout au niveau de la partie moyenne et aval des bassins versant.

5.4- Transport solide:

Le transport solide dans les cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. Il relève essentiellement du ruissellement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature *Hug M (1975)*. Il peut s'effectuer à travers de deux manières différentes :

- Par charriage la ou les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesse est inférieure à celle de l'écoulement. Il correspond aux alluvions de type grossiers, des sables jusqu'aux blocs, d'un diamètre supérieur à 1mm. Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très complexes à cause des perturbations de l'écoulement. L'évaluation de ce type de transport sont difficiles à cause de l'absence de bases de données, On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total *Couvert B (1994) et al.*

- Par suspension, les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide. Ce mode de transport concerne les particules fines tels que les argiles, limons et parfois sables sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement, remarque les sédiments fins se déplacent sur de grandes distances *Graf (1971)*.

Il existe même un troisième mode de transport caractéristique intermédiaire, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant le charriage (lorsque le ratio est supérieur à 0,1) et la suspension (lorsque le ratio supérieur à 0,4) *Probst J L et al (1989) et Cardoso A H (1994)*. Donc, le mode de transport dépend d'un paramètre essentiellement : conçu selon la taille du sédiment transporté.

5.4.1- Quelques données sur le transport solide en Algérie :

La majorité des bassins versants du Nord Algérien sont caractérisés par un climat semi-aride où la pluviométrie est irrégulière. Cette irrégularité influe directement sur la dynamique érosive et notamment sur le transport solide en suspension d'où la valeur de dégradation spécifique varie d'un bassin à un autre. Nous citons quelques travaux : *Bourouba (1997)* avec (1160 t/km²/an) pour l'oued Mazafran (côtiers algérois), (490 t/km²/an) pour oued Soummam à Sidi Aïch, (680 t/km²/an) pour oued Medjerda à Souk Ahras et *Achite et al (2004)* avec (287 t/km²/an) pour l'oued Haddad (Mina), *Meguenni et al (2008)* avec (470 t/km²/an) pour l'oued Harraza (Cheliff) , *Terfous et al (2001)* avec (126 t/km²/an) pour l'oued Mouilah (Tafna).

Pendant l'été, les précipitations sont presque nulles, alors le sol se dessèche, se fissure et se fragmente à cause de l'intensité de la chaleur donc le matériel est complètement préparé et dès que les premières pluies de la saison d'automne arrivent, les éléments fins du sol se détachent. Les précipitations augmentent de plus en plus pendant la saison hivernale où le sol sera saturé par l'eau des pluies, alors que pendant le printemps les crues coïncident avec les versants déblayés. Ainsi l'activité érosive dépend de mouvement de masse qui se produit dans les zones mal protégées ; par exemple : la crue du 17 avril 1979 à oued Medjerda, le débit liquide et la concentration enregistrés sont (8) fois supérieurs aux valeurs moyennes mensuelles *Bourouba (1998)*.

En effet les zones semi-arides subissent des périodes de crues dans deux saisons (l'automne et le printemps) ou elles sont responsables du transport solide. Ces périodes de crues de l'automne et du printemps représentent une courte période de forte érosion qui dure entre (2) et (4) mois mais sont responsables de la majeure partie du transport solide. Le reste de l'année est à érosion faible *Terfous et al (1999), Bourouba (1998)*.

5.5- Quantification de l'érosion hydrique:

La complexité de l'érosion, peut être effectuée selon deux approches. La première consiste à quantifier l'érosion en utilisant des modèles basés sur des paramètres morphologiques, climatiques et hydrologiques. La seconde consiste à estimer les quantités du transport solide en suspension transporté par les cours d'eau à l'exutoire du système étudié. L'étude du transport en suspension à l'échelle du bassin versant s'avère être un outil efficace pour comprendre et quantifier les processus de la dégradation des sols. Il existe plusieurs formules permettant la quantification de l'érosion hydrique, nous citerons :

5.5.1- Formule de Wischmeier et Smith (1978) :

La formule s'écrit comme suit :

$$As = R . K . S . L . C . P$$

As : pertes annuelles de sol (t/ha/an).

R : indice d'érosivité des précipitations (N/h).

K: érodabilité du sol à l'érosion (t.h/N.ha).

S : facteur de pente (adimensionnel).

L: facteur de longueur de pente (adimensionnel)

C: facteur d'aménagement (adimensionnel)

P: facteur de conservation des sols pratiqué (adimensionnel).

5.5.2- Modèle de Fournier (1960) :

$$Ass = (1/36)(Pm/Pam)^{2(2,65)}(h/S)^{2(0,46)}$$

Ass : apport solide spécifique (t/km²/an).

Pm : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm).

Pam : précipitations annuelles (mm).

h : dénivelée moyenne (m).

S : superficie du bassin versant (km²).

5.5.3- Modèle de Tixeront (1960) :

Ce modèle est basé sur les données recueillies dans (32) bassins algériens et (9) bassins tunisiens sur une période comprise entre (2 et 22 ans).

$Ass = 354. E^{0,15}$	(pour les bassins tunisiens)
$Ass = 200. E^{0,15}$	(pour la région centre de l'Algérie)
$Ass = 92. E^{0,21}$	(pour la région Est de l'Algérie)

Ass: Apport solide spécifique (t/Km²/an)

E: Ecoulement en mm

5.5.4- Modèle de la Sogreah :

Le modèle de Sogreah est basé sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre (100 et 300 km²), soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre (300 et 1000 mm) sous la forme suivante :

$$A_{ss} = \alpha. E^{0.15}$$

A_{ss}: Apport solide spécifique (t/km²/an)

α : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol, donné au (Tabl n°54)

E : Ecoulement annuel (mm)

Tabl n° 54 : Valeurs de α pour différentes perméabilités

Perméabilité	α
Forte	8.5
Moyenne	75
Moyenne à faible	350
Perméabilité faible	1400
Imperméable	3200

5.6- Dégradation spécifique:

L'apport en sédiments fait référence à la masse de matériaux solides en suspension qui franchit une limite, définie généralement par l'exutoire d'un bassin versant pendant une période déterminée. La perte en terre ou apport solide spécifique ou encore dégradation spécifique représente quant à elle l'apport en sédiment relatif à une unité de surface (km²). Elle s'exprime par unité de masse par unité de surface pendant un certain temps donné. Les résultats des calculs de la dégradation spécifique selon les différentes formules, sont représentés dans le tableau ci-dessous (*Tabl n°55*).

Tabl n° 55 : Valeurs de la dégradation spécifique (estimation par différents formule empirique)

Bassin	Fournier	Sogreah	Tixeron
Medjerda	288.81	150.97	245.01
Mellegue	602.04	698.44	164.12
Chabro	582.59	463.77	136.43

D'après les résultats illustrés dans le (*Tabl n° 55*) de la dégradation spécifique estimé par les différentes formules ; on constate qu'il existe un écart important qui dû aux paramètres pris en compte par chaque auteurs. Nous pensons que ces formules surestiment ou sous-estiment l'importance de l'érosion ou de nombreux facteurs propres aux bassins sont négligés notamment le couvert végétal et son extension, la localisation des formations érodables, la topographie. C'est pour cette raison que nous tenterons de faire une estimation du transport solide en se basant sur les données d'observations disponibles.

5.7- Caractérisation du transport solide :

Le processus d'érosion est très complexe ; le détachement des particules se produit suite à l'impact de la goutte de pluie, ou les forces générées par l'écoulement de l'eau, dès que la particule se détache elle est entraînée et transportée, d'où l'eau de pluie s'infiltré dans le sol et contribue aux éboulements et glissements qui peuvent devenir une origine principale des sédiments pour les cours d'eau. Ce transport des sédiments dépend des dimensions et du poids de la particule d'une part, et aussi des forces exercées par l'écoulement sur la particule d'autre part, *Vanoni (1977)*. Donc les matériaux solides sont apportés par les cours d'eau ainsi que le ruissellement. Ces sédiments sont d'une granulométrie très variable (graviers, cailloux, limon et d'argile) qui dépend de leur nature lithologique.

En effet, la nature complexe de ce phénomène, les nouvelles techniques de mesure, les difficultés rencontrées lors des mesures par les observateurs sont les éléments clé de cet intérêt. Autrement dit, le débit liquide et la concentration des sédiments en suspension ne peuvent pas avoir une relation stationnaire pendant un écoulement qui est du a une averse, ce qui explique que ces deux éléments sont variable et généralement liées directement au débit *Hallouz F (2013), Hallouz Fet al (2013)*.

Pour établir une structure de couplage entre la concentration et le débit liquide devient très difficile, c'est pour cette raison qu'il existe une méthode qui a pour objet l'exploitation des données et la recherche d'un modèle reliant ces différents paramètres du milieu et réaliser une liaison entre eux en utilisant une approche mathématique.

5.7.1- Principaux travaux sur le transport solide en Algérie :

Parmi les travaux réalisés sur l'étude du transport solides nous citons :

Medinger (1960) s'est basé sur une trentaine de bassins durant la période (1946-1957), ces résultats ne sont pas satisfaisants *Demmak (1982)*.

Tixeront (1960) a travaillé sur 32 bassins d'Algérie et 6 bassins de la Tunisie, où la superficie varie entre (90 et 22300 km²). Son travail a été basé sur la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants : précipitations et leurs répartitions, écoulement, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol. Il a trouvé que : Le substratum joue un rôle considérable, la teneur en suspension des trois groupes de bassins augmentent de façon générale lorsque le débit liquide diminue, la répartition régulière des pluies avec un maximum en saison végétative est favorable aux faibles teneurs. Alors les zones de pluies (300 à 700 mm) où l'érosion est très active avec un taux de dégradation qui arrivent à (1200 t/km²/an).

Sogreah (1969) : Sur un bassin de nature géomorphologique donnée, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé. Les données d'observation recueillies au niveau de (9 à 18) stations hydrométriques et les résultats ont été présentées sous forme d'une relation graphique.

Demmak (1982) a pris en considération (30) bassins versants du nord algérien, durant la période 1972/1979. L'auteur a constaté que l'agressivité des pluies est relativement faible et son influence sur l'érosion est presque négligeable. Il synthétisa ses travaux par une relation valable pour les bassins de l'Atlas Tellien liant les apports solides spécifiques à moyens annuels et des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques.

Meddi (1992) a accentué son travail sur les données pluviométriques, hydrométriques et des transports solides. L'auteur constate que le bassin versant de l'oued Haddad a une dégradation spécifique très élevée et que la topographie, le couvert végétal aussi la puissance des crues de ce bassin sont des éléments très favorables à un fort transport solide. Il a établi une relation entre le débit solide, la pluie, le débit liquide, ou il est arrivé à expliqué la variation de la crue et que la température

de l'eau, à défaut de données concernant la température de l'air, joue un rôle non négligeable des variations de la turbidité en saison chaude. Alors les hautes températures accroissent l'aptitude de l'eau à détruire les agrégats du sol.

Touaibia (2000), le but de son travail est d'estimer l'index de l'érosion de *Wischmeier* dans des micro-bassins (10 parcelles avec des cultures différentes) pour arriver à quantifier l'érosion. L'auteur s'est basé sur le dépouillement de (902) pluies enregistrées à (7) pluviographes sur (2) années (1989/1990 et 1990/1991) pour calculer l'indice d'érosivité et l'application de l'équation universelle de perte de sol a donné une érosion qui varie entre (0.12 et 1.09 t/ha/an). Une régression significative de type puissance s'est dégagée entre l'index d'érosion et la lame d'eau précipitée expliquant en moyenne plus de (90%) de la variation.

Tourki Mahmoud (2010), le but de son travail est de quantifier à l'érosion et les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est situé au Nord-est algérien, sur une période d'observation de 24 années (1975/76-1998/99). Le débit solide spécifique moyen annuel durant la même période est estimé 871 t/km²/an.

Hallouz Faiza (2014), a accentué son travail pour la quantifier l'érosion et les transports solides en suspension dans cinq bassins versants du Nord-Ouest Algérien, sur une période d'observation de 32 ans (1971-2002). Le débit solide spécifique moyen annuel pendant les crues des 32 ans de la période étudiée varie entre 190 t/km²/an dans le sous bassin versant de l'Oued Abd aval à la station d'oued Abtal et 198 t/km²/an à la station de Sidi Aek Djillali. La dégradation spécifique moyenne annuelle dans les mêmes sous bassins varie entre 277 t/km²/an et 260 t/km²/an. Alors que le sous bassin de l'oued Abd aval à la station d'oued Abtal draine 5/6 de la superficie totale du bassin de l'oued Mina, l'érosion reste plus élevée au niveau du sous bassin contrôlé par la station de Sidi Aek Djillali (1/12).

5.7.2- Modélisation statistique de sédiments en suspension :

Un modèle est une représentation schématique d'un phénomène permettant de mieux l'étudier ou d'analyser son influence. Cette représentation peut être physique ou mathématique *Musy (1998)*. La recherche de modèles reliant les paramètres physiques a fait l'objet de nombreuses études *Walling D E et al (1981)*, *Demmak A (1982)*, *Glysson G D (1989)*, *Megnounif A et al (1999)*, *Kattan Z et al (1987)*, *Probst J L et al (1992)*, *Terfous A et al (2001)*, *Ghenim A (2001)*, *Achit M (2002)*, *Bouanani (2004)* et qui a mis en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes. Les caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre.

En effet, le climat du monde a changé et la pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau, la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminuer dans d'autres. Tous ces paramètres font que les modèles diffèrent d'un auteur à un autre. Chacun tente de caractériser la région ou le bassin étudié par le modèle le plus représentatif et le plus fiable (Tabl n°56).

Tabl n° 56 : Modèle utilisé

Bassin	Modèle	Equation	Auteur
Massif central (France)	Puissance	$Q_l = 16P^2$	Coutagne
Bassins algériens	Puissance	$Q_l = 11.8 P^{2.82}$	A.N.R.H
Bassins algériens	Linéaire	$Q_l = 0.736(P - 404)$	Samie
Oued M'riga(Algérie)	Polynôme	$Q_l = 50.6P^2 - 3.54P$	Roeder
Oued Ouergha (Maroc)	Puissance	$A_p = 690A_s^{0.58}$	Lahlou
Medjerda supérieur (Algérie)	Linéaire	$A_{ss} = 1.06E - 66.2$	Bourouba

5.7.3- Théorie des principaux modèles existants :

Il existe plusieurs modèles que nous pouvant les appliqués dans le domaine de l'hydrologie et du transport solide dans nous citerons des exemples :

a- Ligne tracée à l'œil :

C'est la méthode la plus simple pour la construction des courbes de sédiments. Cette méthode offre une représentation moyenne des données. Son application exige des données regroupées et non dispersées pour faciliter le traçage de la droite moyenne et cette droite tracée visuellement aura à représenter un nuage de points *Glysson (1987)*. *Walling (1977)* a utilisés cette méthode pour comparer la charge sédimentaire annuelle estimée par les courbes de sédiments tracées à l'œil et celles construites par la technique des moindres carrés issue de la transformation logarithmique.

b- Le modèle linéaire :

Le modèle linéaire est le plus simple et le plus pratique, sa propriété principale est la proportionnalité de x et y mais il ne s'applique pas dans tous les cas *Bobee(1978)*, *Helsel et Hirsch (2002)*. Il est donné sous la forme suivante :

$$Y = ax + b$$

c- Le modèle logarithmique :

Ce modèle utilise l'équation suivante pour calculer les moindres carrés:

$$Y = a \ln x + b$$

D'après *Rakotomala (2009)*, le modèle logarithmique n'est qu'une autre forme de la régression linéaire qui consiste en une application de la technique de transformation citée antérieurement de (x) à $(\ln x)$. Il exprime une variation proportionnelle de (y) au taux de variation de (x) .

d- Le modèle polynomiale :

Il est sous la forme générale :

$$Y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$$

L'exemple simplifié est le polynôme de deuxième ordre :

$$Y = a_1x + a_2x^2$$

Ce type de modèle est utile lors de l'existence d'un minimum ou d'un maximum pour les variables dépendantes. Plus l'ordre du polynôme augmente plus la courbe tend à mieux représenter les données et devient plus sinueuse *Weisberg (2005)*.

e- Le modèle exponentiel :

La relation conçue selon la forme suivante :

$$Y = a e^{\beta x}$$

D'où (α) et (β) sont des paramètres à déterminer. Cette relation représente une évolution (croissance ou décroissance) à un taux constant ou en accélération, surtout utilisé dans le cas où $x =$ temps. Il est possible de la linéariser par la transformation de (Y) en ($\ln Y$) et (x) en (X) et ceci en introduisant le logarithme népérien sur les deux parties de l'équation se qui donne la relation linéaire: ($y = ax + b$). ($a = \ln \alpha$ et $b = \beta$), pour éviter toute réfutation il faut ajouter un terme d'erreur ε , ce qui permet d'avoir le modèle linéaire déjà abordé antérieurement: ($y = ax + b + \varepsilon$) qu'on peut traiter de la même manière par la technique des moindres carrés *Rakotomala (2009)*.

f- Le modèle en puissance :

Il est sous la forme:

$$Y = ax^b$$

Cette relation est souvent adoptée pour la construction des courbes de sédiments où (Y) représente la variable dépendante C_s (concentration) et x représente la variable indépendante Q_l (débit liquide). Ce modèle issu de la re-transformation logarithmique est appliqué au couple (débit liquide-concentration) ; *Mimikou (1982)*, *Horowitz (2002)*, *Ghenim (2008)*. On (*1973*) *Abrahams* et *Kellerhals* ont signalé que le débit solide n'est pas une variable mesurée comme la concentration des sédiments en suspension et qu'il est calculé à partir des valeurs du débit et de la concentration ($Q_s = C_s Q_l$) , Ceci revient à corrélérer x avec ($x \times y$), ce qui peut produire des conclusions erronées sur (C).

Dans notre travail la méthode qu'on a utilisée pour quantifier le transport solide et estimé à la dégradation spécifique est celle du modèle en puissance.

5.7.4-Mesure de la matière en suspension :

La mesure de la matière en suspension est basée sur une technique utilisée par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) suivant :

- le prélèvement en un point soit sur le bord, soit au milieu d'un flacon d'un litre en matière plastique.
- L'échantillonnage s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'oued.
- En période d'étiage il est préférable d'effectuer un à deux prélèvements au cours de la journée.

Remarque en période de l'activité de l'oued (crue), le nombre des prélèvements augmente selon :

- 1- la montée de la crue est lente pour un prélèvement tous les quarts d'heures.
- 2- la montée de la crue est rapide pour un prélèvement tous les demies heures.

D'après *Demmak (1982)* en période de décrue le prélèvement d'un échantillon s'effectue les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures après. L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pic de la crue. Le traitement des matières en suspension prélevées se fait au laboratoire par décantation, filtrage avec un papier-filtre, séchage à l'étuve à 110°C durant 30 minutes et en dernier lieu on aura effectué une pesée.

5.7.5-Elaboration du modèle :

La mobilisation et le transport des matériaux solides par l'écoulement de l'eau représentent deux phénomènes distincts, mais qui sont liés entre eux. Le débit solide moyen des sédiments en suspension (Q_s) qui transitent par une section d'écoulement moyen et il est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension (C_s) et du débit liquide moyen (Q_l) durant une période de temps donnée sous la forme :

$$Q_s = f(Q_l)$$

$$Q_s = C_s Q_l$$

dite courbe d'estimation de la charge solide en suspension « sediment rating curve » *Walling et Webb (1981)* , *Bent Hascholt et Madeyski (1998)* , *Webb et al (1997)* , *Li et al (2003)*. Cette dernière est définie par *Glysson (1987)* comme étant la courbe qui explique la relation entre les variables (Q_s et Q_l) et nous permet de caractériser le lien entre les deux.

Cette relation offre une possibilité d'adopter une variété de modèles déterminés par les différents techniques de régression *Bent Hascholt et Madeyski (1998), Moatar et al (2007)*. Ce type de relation a été proposé pour la première fois dès (1895) par *Kennedy, Touaïbia (2000)*. A ce titre, nous citons les travaux de : *Jakuschoff (1932), Straub (1937), Cambell et Bauder (1940), Einstein (1950), Miller (1953), Leopold et al (1953), Wood P A(1977), Verhoff et al (1980), Walling et Webb (1981, 1982), Mimikou (1982), Demmak (1982), Probst et Bazerabachi (1986), Etchanchu et al (1986), Ferguson (1986), Etchanchu et al (1986), Jansson (1996), Terfous et al (2001), Horowitz et al (2001), Benkhaled A et al (2003), Meddi M (2004), Bouanani (2004), Khanchoul K (2006), Ghenim (2008), Meguenni et al (2008), Meddi M et Hallouz F (2012), Tebbi F Z (2015)*.

La concentration des sédiments en suspension (C_s) et le débit liquide (Q_l) évoluent en général suivant un modèle de puissance sous la forme ($Y = ax^b$) *Walling et al (1981)*.

$$C_s = aQ_l^{b-1}$$

Une autre relation empirique communément appelée courbe du transport solide qui a été développé par *Cambell et al (1940), Crawford (1991)* :

$$Q_s = aQ_l^b$$

Les paramètres (a) et (b) sont généralement estimés par la régression linéaire des variables transformées en log selon l'équation suivante :

$$\text{Log}Q_s = \text{Log}a + b\text{Log}Q_l$$

Dans notre cas, nous proposons un modèle statistique dont la structure mathématique s'appuie sur (Fig n° 44)

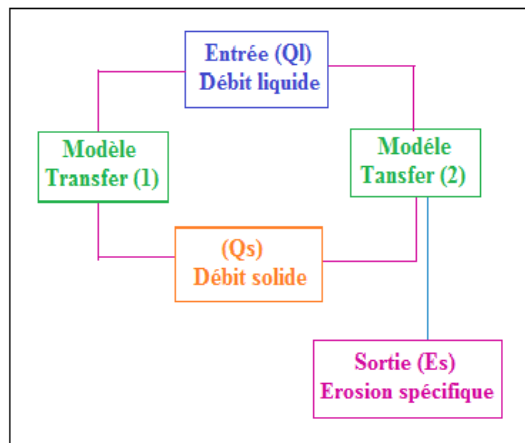


Fig n° 44 : Schéma du modèle proposé.

5.7.6-Validité du modèle :

Afin de déterminer les paramètres du modèle les plus représentatifs du comportement du bassin versant, Il est indispensable de disposer d'une série suffisamment longue sur la période de calage. Les paramètres peuvent être ajustés de manière à reproduire au mieux les flux sur la période de calage. Mais, ils peuvent générer des flux de sédiments erronés sur la période de validation et dans ce cas le modèle ne peut être représentatif du comportement réel du bassin versant à plus long terme *Hallouz F (2013)*. Après calage du modèle et les données d'observations on procédera au test de validité. Généralement on se sert de critères basés sur la minimisation des écarts entre les valeurs réellement observées et celles calculées *Gomer (1991), Meddi (1994), Spiegel (1989)*. Ces critères seront calculés à partir des paramètres mesurés et modélisés à partir de :

- La corrélation entre les (X) et les (Y), (indice de corrélation (R) et de détermination (R^2)).
- Le test de Fischeur (F).
- L'erreur type ($S_{y,x}$).

5.7.7-Données Hydrologiques :

L'application de tout modèle mathématique suppose au préalable la disponibilité des données nécessaires à son élaboration *Ambroise (1978)*. Cette étape est la plus importante car la fiabilité des modèles est subordonnée à la qualité des données d'observation *Guettouche M S et al (1998)*. Dans notre étude on s'est basée sur les mesures journalières disponibles, des débits liquides Q_l (m^3/s) et des concentrations C_s (g/L), des différentes stations sous forme de série (*Tabl n°57*) Ces mesures sont recueillies au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Cette série doit répondre à certains critères statistiques, à savoir l'Homogénéité, l'Indépendance et la stationnarité.

Tabl n°57 : Caractéristiques des stations hydrométriques

Station	Code	(x)	(y)	Période d'observation
Souk Ahras	120101	7,902	36,267	1976-2010
Morsott	120309	8,008	35,593	1985-2010
Ouenza	120401	8,129	35,991	1970-2010

5.7.7.1-Traitement de données :

Les données utilisées dans cette étude sont soumises à un test d'homogénéité et stationnarité, suivi d'un test d'indépendance.

a-Homogénéité et stationnarité :

L'homogénéité des données s'effectue par le test de *Man-Whitney* qui consiste à partager la série en deux sous échantillons de taille représentative p et q ($p \leq q$). Les échantillons fusionnés de taille ($N = p + q$) et rangés dans l'ordre croissant.

$$\begin{aligned} V &= R - P(P + 1) / 2 \\ w &= (p \cdot q) - V \end{aligned}$$

R : Somme des rangs des éléments du premier échantillon pris dans la série fusionnée.

V et w : paramètres calculé à partir de R , P et q .

Remarque la statistique U du test de *Man-Whitney* définie par la min (V et w) quand $N > 20$ et $(p, q) > 3$. Sous l'hypothèse nulle que les deux échantillons ne dérivent pas de la même population. Le (V) est approximativement distribué selon une loi de Gauss.

$$U = (p \cdot q) / 2$$

$$\text{Var}(U) = [(p \cdot q) / N(N - 1)] [N^3 - N - \sum T]$$

$$T = (j^3 - j) / 12$$

(j) : Le nombre d'observations ayant le même rang.

$\sum T$: La somme s'effectue pour les deux échantillons.

Pour un test à un niveau de signification (α), la quantité :

$$|U| = \left| U - \bar{U} / \sqrt{\text{Var}(U)} \right|$$

Est comparée à la variable réduite normale $U \alpha/2$ correspond à une probabilité au dépassement. Si $|U| < U \alpha/2$ alors le test d'homogénéité à ($\alpha\%$) du niveau de signification est accepté.

b-Indépendance et stationnarité :

L'indépendance et la stationnarité ce fait par le test de *Wold- Wilforvitz* .Ce dernier considère la statistique (R) qui est définie par la formule ci-dessous, soit un échantillon de taille (N) $[X_1, X_2 \dots \dots \dots X_n]$.

$$R = \sum X_i X_{i+1} + X_i X$$

Dans ce cas, si les éléments de l'échantillon sont indépendants alors (R) suit une distribution normale de la moyenne et de la variance représentative.

$$\bar{R} = \frac{(S_1^2 - S_2^2)}{N - 1}$$

$$Var (R) = \frac{(S_2^2 - S_4)}{N - 1} - R^2 + \frac{S_1^4 + 4S_1^2 S + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4}{(N - 1)(N - 2)}$$

$$S_4 = \sum(X_1 X)$$

$$U = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{Var (R)}}$$

Pour tester l'hypothèse d'indépendance au niveau (α), en comparant $|U|$ avec la variable normale réduite ($U \alpha/2$) correspondant à la probabilité de dépassement ($\alpha/2$). Si $|U| < (U \alpha/2)$ implique l'hypothèse d'indépendance qui est acceptée à des niveaux de signification.

5.7.8-Application de la courbe de tarage en sédiments pour le bassin versant de la Medjerda :

Afin de mieux caractériser le transport solide en suspension dans les Oued sus-cité, nous avons établi des modèles basées sur la méthode de « SRC » (sediment rating curve) pour différents pas de temps soit respectivement : Saisonnier et interannuel. Les résultats obtenus sont donnés ci-dessous.

5.7.9-Résultats et discussion :

Les calculs de la régression sous différentes formes ont permis de conclure que la forme puissance est la plus adaptée. Les modèles élaborés ont été vérifiés vis-à-vis de l'indépendance des résidus, ainsi que leur normalité et leur homoscedasticité (*Annexes n° 11,12 et 13*).

5.7.9.1-Modèle « SRC » à pas Saisonnier:

a-Station Souk Ahras :

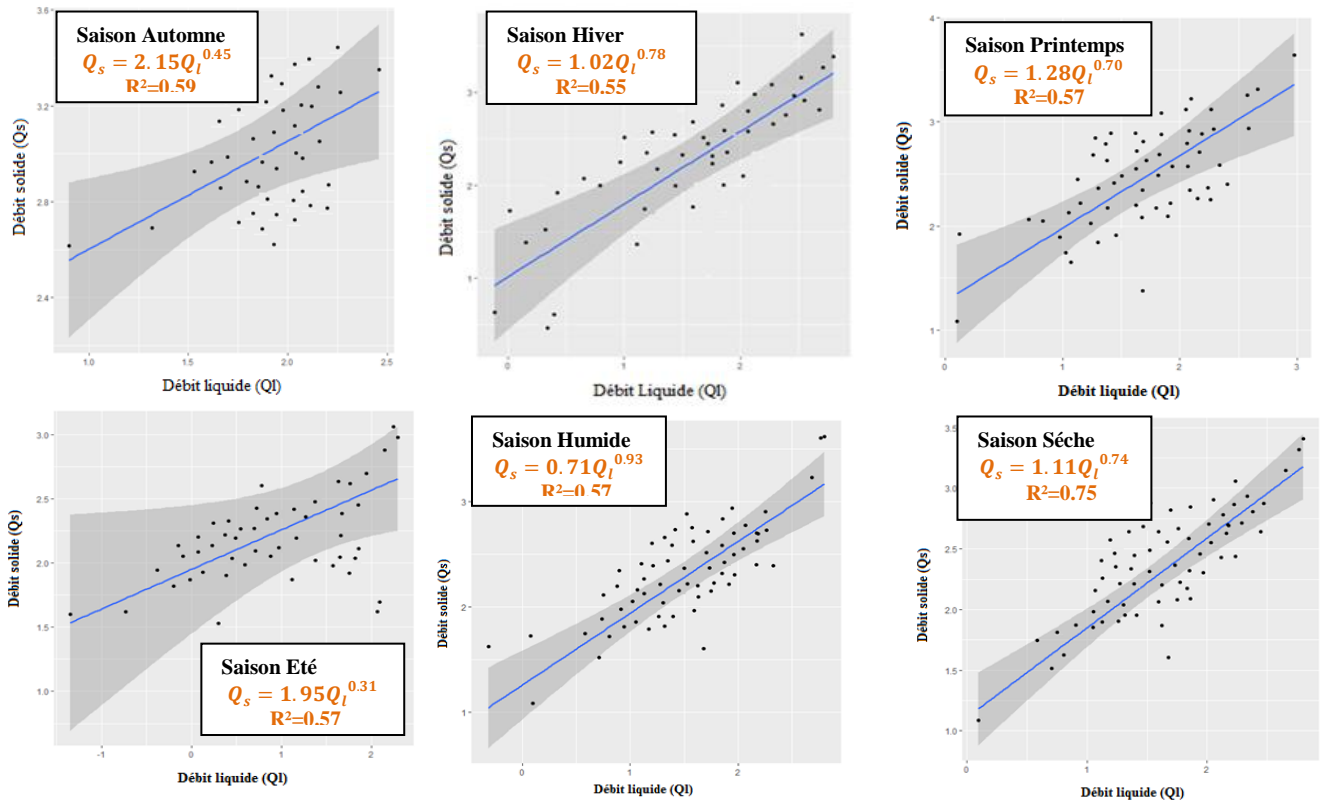


Fig n° 45 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour la station de Souk Ahras.

La (Fig n° 45) présente les résultats obtenus en appliquant le modèle « SRC » saisonnier pour la station de Souk Ahras.

Tabl n°58 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » saisonnier pour la station Souk Ahras

	Saisons	a	b	R ²
1/4	Automne	2.15 ***	0.45*	0.59
2/4	Hiver	1.02 **	0.78***	0.55
3/4	Printemps	1.28 ***	0.70***	0.57
4/4	Été	1.95 ***	0.31*	0.57
1/2	Humide	0.71 **	0.93***	0.57
2/2	Sèche	1.11 ***	0.74***	0.75

Signification : 0 (***) , 0.001 (**), 0.01 (*), 0.05 (.), 0.1 ("), 1 ()

Le (Tabl n°58) montre la signification de la relation puissance au pas de temps saisonnier pour la station de Souk Ahras. Concernant les quatre saisons, le coefficient (a) est significativement différent de zéro, cependant pour l'été et l'automne la signification de l'exposant (b) est moindre. Le débit liquide explique plus de (50%) la concentration pour toutes les saisons (Fig n°45), remarquons que pour la saison sèche la variable débit liquide explique (75%) de la concentration.

b-Station Ouenza :

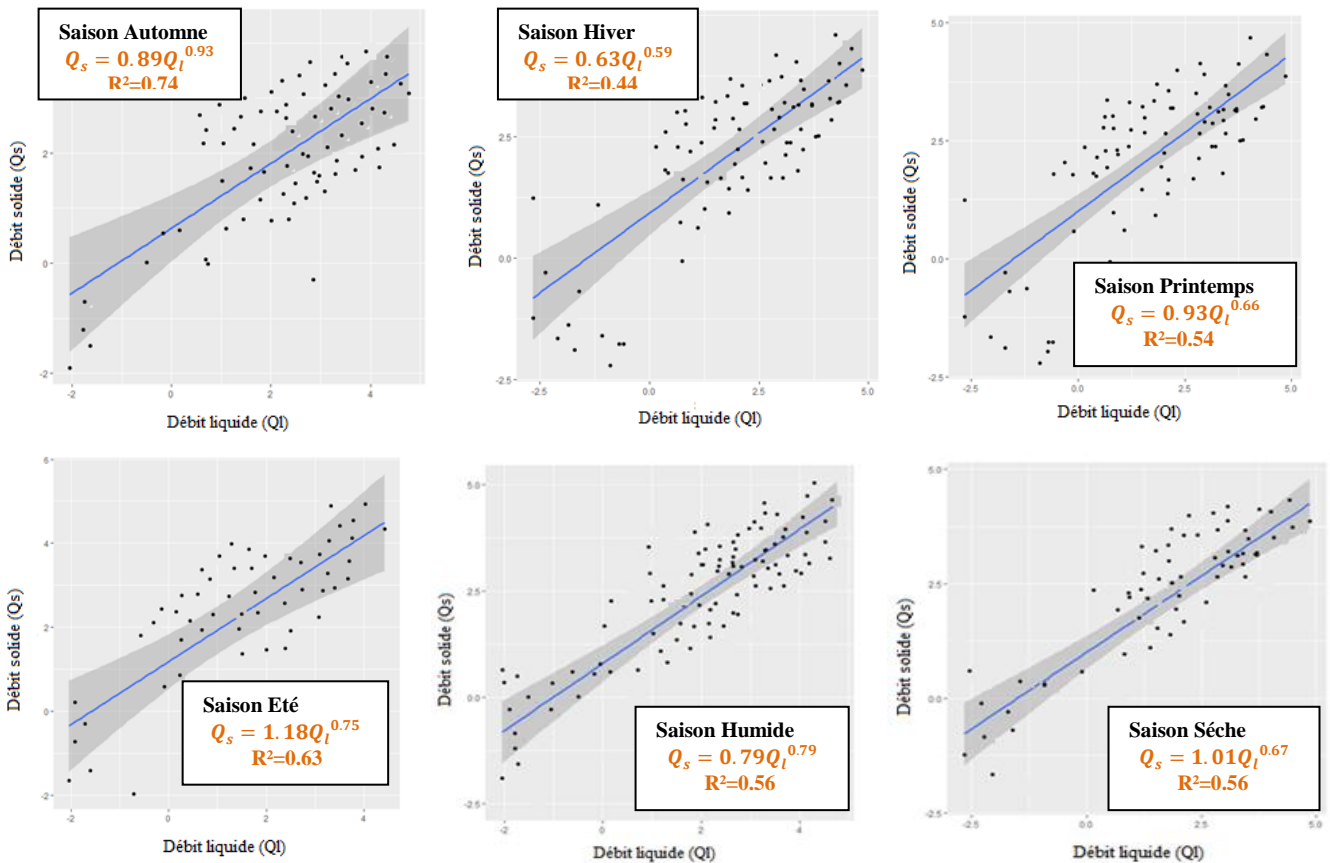


Fig n° 46 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour la station d'Ouenza.

La (Fig n° 46) présente les résultats obtenus en appliquant le modèle « SRC » saisonnier pour la station d'Ouenza.

Tabl n°59 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » saisonnier pour la station Ouenza.

	Saisons	a	b	R ²
1/4	Automne	0.89 _{***}	0.93 _{***}	0.74
2/4	Hiver	0.63 _*	0.59 _{***}	0.44
3/4	Printemps	0.93 _{***}	0.66 _{***}	0.54
4/4	Eté	1.18 _{**}	0.75 _{***}	0.63
1/2	Humide	0.79 _{***}	0.79 _{***}	0.56
2/2	Sèche	1.01 _{***}	0.67 _{***}	0.56

Signification : 0 (***) , 0.001 (**), 0.01 (*), 0.05 (.), 0.1 ("), 1 ()

Les résultats obtenus dans le (Tabl n° 59) montrent la signification de la relation puissance au pas de temps saisonnier pour la station d'Ouenza. L'exposant (b) est significativement différent de zéro pour les quatre saisons et même conclusion concernant le coefficient (a) sauf, pour la saison Hiver. Le débit liquide explique plus de (50%) la concentration pour les saisons : Automne, Printemps, Eté, Humide et Sèche (Fig n° 46), remarquons que pour la saison hivernale la variable débit liquide explique moins de (45%) de la concentration.

c-Station Morsott :

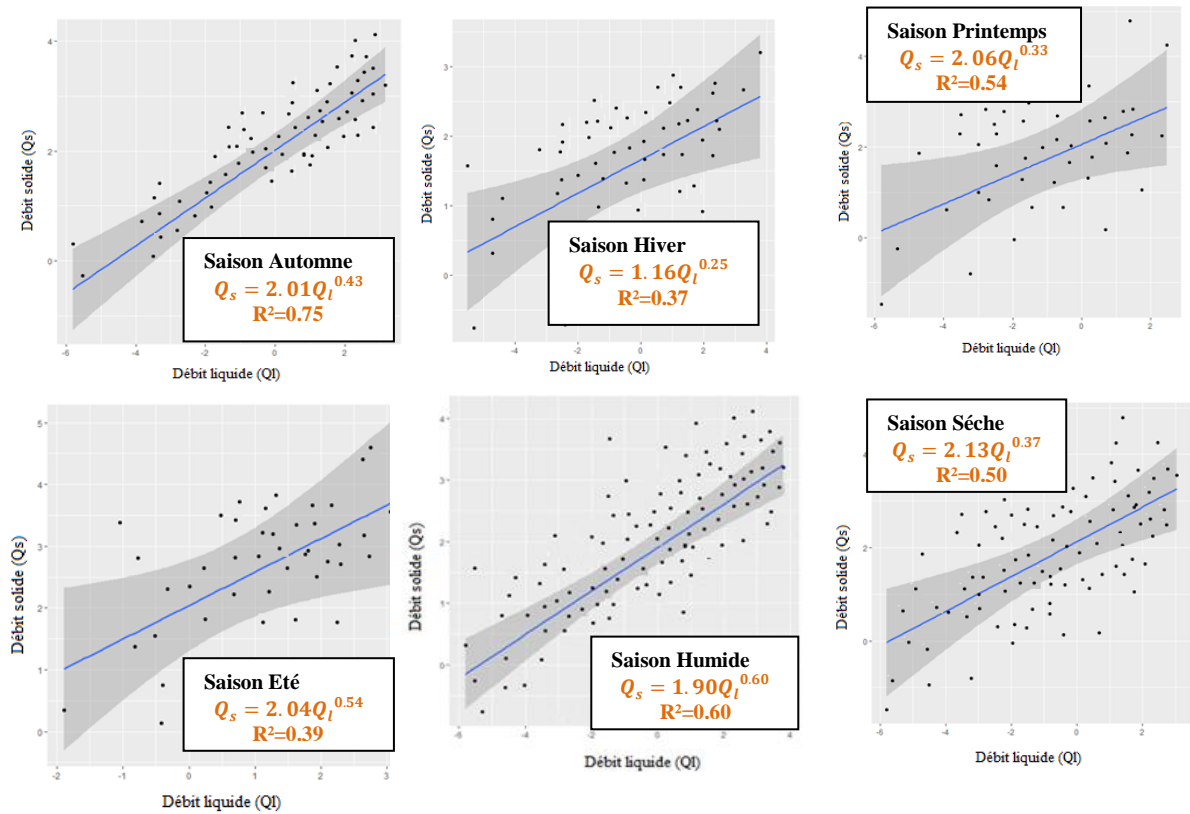


Fig n° 47 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour la station de Morsott.

La (Fig n° 47) présente les résultats obtenus en appliquant le modèle « SRC » saisonnier pour la station de Morsott.

Tabl n° 60 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » saisonnier pour la station Morsott.

	Saisons	a	b	R ²
1/4	Automne	2.01 _{***}	0.43 _{***}	0.75
2/4	Hiver	1.16 _{***}	0.25 _{**}	0.37
3/4	Printemps	2.06 _{***}	0.33 _*	0.54
4/4	Été	2.04 _{***}	0.54 _*	0.39
1/2	Humide	1.90 _{***}	0.35 _{***}	0.60
2/2	Sèche	2.13 _{***}	0.37 _{***}	0.50

Signification : 0 (***) , 0.001 (**), 0.01 (*), 0.05 (.), 0.1 ("), 1 ()

Le (Tabl n° 60) montre la signification de la relation puissance au pas de temps saisonnier pour la station de Morsott. Le coefficient (a) est significativement différent de zéro pour les quatre saisons, ainsi que pour l'exposant (b) est peu significatif pour les saisons : Printemps et été. Le débit liquide explique à (37%) en Hiver et (75%) en Automne la concentration (Fig n° 47).

5.7.9.2-Modèle « SRC » à pas interannuel:

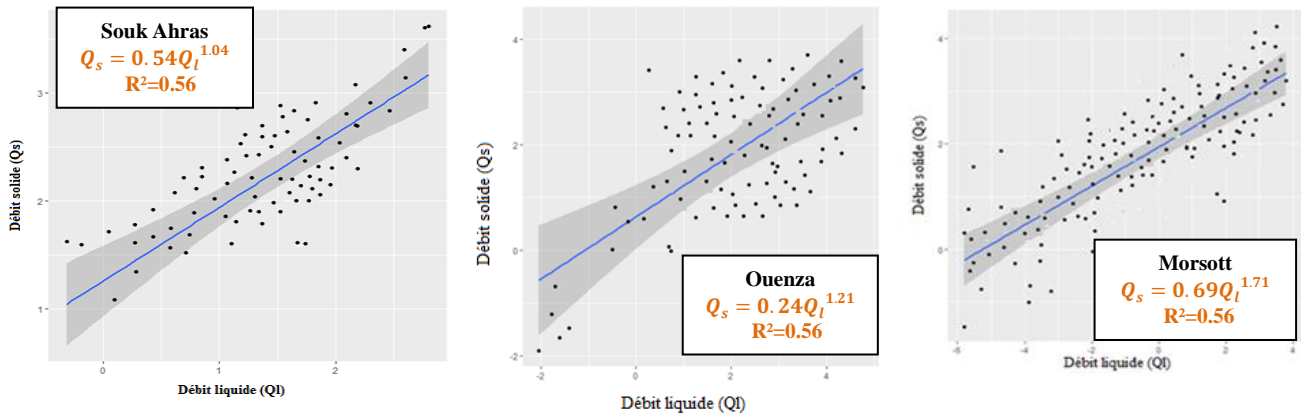


Fig n° 48 : Modèles annuelles reliant les débits solides aux débits liquides pour les différentes stations du bassin versant de la Medjerda.

La (Fig n° 48) présente les résultats obtenus en appliquant le modèle « SRC » interannuel pour la station Souk Ahras.

Tabl n° 61 : Critères d'évaluation et validation du modèle « SRC » interannuel pour les différentes Stations du Bassin Versant de la Medjerda

Station	a	b	R ²
Souk Ahras	0.54 _{***}	1.04 _{***}	0.56
Ouenza	0.24 _{***}	1.21 _{***}	0.56
Morsott	0.69 _{***}	1.71 _{***}	0.56

Signification : 0 (***) , 0.001 (**), 0.01 (*), 0.05 (.), 0.1 ("), 1 ()

D'après les résultats obtenus dans le (Tabl n° 61) pour les différentes stations à pas temps annuelle, celle-ci nous a montré que les modèles sont significatifs dont les valeurs du coefficient de corrélation ($R^2 = 0.56$) ceci, dénote néanmoins, qu'il existe une relation puissance entre les paramètres. D'une manière générale, on reliant entre le débit solide et le débit liquide ; on trouve que pour les trois bassins versants une bonne relation en puissance *Probst* et *Bazerbachi* (1986). L'analyse graphique (Fig n° 48) nous a montré qu'à faibles valeurs des débits liquides (moins de 0,4 m³/s) peuvent donner de forts débits solides (plus de 12 kg/s) suite à un orage qui a subit la zone. Contrairement lorsqu'il s'agit de forts débits liquides on a enregistré qu'un faible transport solide en période des crues surtout dans la saison estivale.

5.7.10-Calcul du débit solide et de la dégradation spécifique :

5.7.10.1-Débit solide (Q_s) :

Le débit solide (Q_s) est estimé par la formule suivante :

$$Q_s(\text{kg/s}) = Q_l(\text{m}^3/\text{s}) \times C(\text{g/l})$$

Q_s : Débit solide en suspension moyen annuel (kg/s).

C : Concentration moyenne annuel (g/l).

Q_l : Débit liquide moyen annuel (m^3/s).

Les résultats obtenus sont illustré dans le (Tabl n° 62)

Tabl n° 62 a : Résultats des débits solides à différentes échelles (Station Souk Ahras)

Param. Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été	Humide	Sèche	Année
$Q_l(\text{m}^3/\text{s})$	2.76	7.83	4.56	1.95	6.08	4.07	5.18
$Q_s(\text{kg/s})$ Obser	14.29	22.40	16.56	8.39	20.13	15.30	18.09
$Q_s(\text{kg/s})$ Estim	8.97	39.78	13.95	4.67	23.16	12.78	15.47

Tabl n°62 b : Résultats des débits solides à différentes échelles (Station Ouenza)

Param. Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été	Humide	Sèche	Année
$Q_l(\text{m}^3/\text{s})$	16.32	13.60	18.33	13.9	15.07	17.15	16.14
$Q_s(\text{kg/s})$ Obser	424.05	139.97	294.62	248.34	282.92	283.82	284.63
$Q_s(\text{kg/s})$ Estim	194.95	39.97	116.23	118.09	101.52	116.29	112.12

Tabl n° 62 c : Résultats des débits solides à différentes échelles (Station Morsott)

Param. Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été	Humide	Sèche	Année
$Q_l(\text{m}^3/\text{s})$	5.35	4.61	1.97	4.56	5.03	2.92	4.09
$Q_s(\text{kg/s})$ Obser	71.91	29.52	19.55	76.12	16.83	36.05	47.52
$Q_s(\text{kg/s})$ Estim	22.12	11.21	5.08	21.11	16.83	9.25	31.38

L'estimation des débits solides par la méthode (SRC), nous a permis de distinguer :

Concernant la station de Souk Ahras (Tabl n°62a) le débit solide est élevé aux saisons d'Hiver et Printemps, ceci peut s'expliquer par l'intensité des pluies relativement importante dans le bassin versant de Medjerda (Souk Ahras). Quant aux débits solides estimés aux stations d'Ouenza et Morsott (Tabl n°62b et 62c), on remarque que ces derniers sont plus élevés aux saisons d'Automne et d'été , ceci s'explique par l'état du sol friable et fissuré durant ces deux saisons d'une part et d'autre part par l'intensité dévastatrice des pluies orageuses de la région.

5.7.10.2-Dégradation spécifique (E_s) :

De ces modèles on déduit les relations suivantes du deuxième transfert (débit solide – Erosion spécifique).

$$E_s = (3.154 \cdot 10^4 Q_s) / S$$

E_s : Erosion spécifique (t/km²/an).

S : Superficie du bassin versant (km²).

Q_s : Débit solide en suspension moyen annuel (kg/s).

Les résultats obtenus sont illustrés dans le (Tabl n°63)

Tabl n° 63 : Résultats de la dégradation spécifique (E_s)

Bassins	(Q_s) estimé	(E_s) estimé	(Q_s) observé	(E_s) observé
Medjerda	15.47	321.17	18.09	375.56
Mellegue	112.12	739.22	284.63	1876.59
Chabro	31.38	631.61	47.52	956.46

Selon les résultats obtenus dans le (Tab n° 63) on constate que :

- Le débit solide Q_s (kg/s) estimé par le modèle « SRC » au pas de temps annuel est très important au niveau du bassin versant d'oued Mellegue (station ouenza) d'où le débit solide et de (112.12 kg/s) avec un débit liquide de (16.14 m³/s), remarquons qu'au niveau des deux autres bassins versant Medjerda (Souk Ahras) et Chabro (Morsott) le débit solide estimé est moins important (15.47 kg/s et 31.38 kg/s) avec un débit liquide compris entre (5.20 m³/s et 4.10 m³/s) respectivement.

- L'érosion spécifique moyenne annuelle (E_s) en fonction du débit liquide (Q_l m³/s) et remarquable au niveau du bassin versant de Mellegue avec (739.22 t/km²/an) par contre celles estimées dans les deux bassins Medjerda et Chabro sont respectivement (321.17 t/km²/an et 631.61 t/km²/an).

Conclusion

L'estimation de l'érosion par différentes méthodes nous permet de constater que la formule de *Sogreah* a donné un résultat proche de la valeur obtenue par le modèle (SRC) au niveau du bassin versant de Mellegue. Alors que celles estimées par le modèle « SRC » dans le bassin de Medjerda et celui de Chabro sont proches au résultat calculé par la formule de Fournier, nous constatons aussi que l'érosion dans le bassin de Mellegue est plus importante que celle dans la Medjerda.

En conclusion, Les transports solides représentent un fonctionnement conditionné par des combinaisons entre l'écoulement et la dégradation spécifique. Dans notre étude nous nous sommes basés sur la disponibilité des mesures de concentrations en matières en suspension pour pouvoir établir le modèle (SRC). D'après les résultats obtenus on constate que seulement une partie du transport solide est expliquée par le débit liquide. Nous pouvons avancer que d'autres paramètres tels que, les intensités des pluies, leur répartition spatiale, le couvert végétal, sol, lithologie, etc interviennent aussi.

Chapitre 6

Cartographie de l'aléa érosion

6.1 Introduction :

L'érosion des sols par la pluie est un processus majeur de la dégradation. Il est très répandu dans différents pays méditerranéens et surtout dans les zones semi-arides *Bou Kheir et al (2001)*. En Algérie, il existe des zones très vulnérables au phénomène de l'érosion hydrique, environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion très active et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux *Remini (2000)*. Ceci, s'explique par la fragilité de l'écosystème et aussi par la relation perturbée entre les différents facteurs naturels tels que : (l'agressivité climatique, l'irrégularité des précipitations, la topographie, la lithologie, le couvert végétal naturel) et le facteur anthropique (l'activité humaine) qui favorise le déclenchement du phénomène *Benchetrit (1972)*.

En effet, notre but de travail dans ce chapitre est d'établir une carte de sensibilité des sols à l'érosion du bassin versant de la Medjerda afin d'étudier le processus d'érosion et d'évaluer l'impact potentiel sur les zones sensibles. En pratique et pour détecter les zones vulnérables on a utilisé plusieurs sources de données (données spatiales, mesures et enquêtes sur le terrain et aussi les images satellitaires) dans des systèmes de traitement géo-spatiale on utilisant les SIG. Pour ce faire, on a choisi une modélisation qualitative qui s'appuie sur une analyse multicritères Hiérarchique (AHP) combinant les facteurs déterminants de l'érosion et les plus représentatifs tels que: le facteur lithologique, facteur topographique, facteur climatique ainsi que l'occupation du sol.

6.2 Analyse multicritère :

L'analyse multicritères est définie comme une aide à la décision et un outil mathématique permettant la comparaison des différentes alternatives ou scénarios selon de nombreux critères, souvent contradictoires, afin de guider le décideur vers un choix judicieux. L'ensemble des alternatives de décision considérées dans un problème donné est souvent désigné par (A) et (a) appelé l'ensemble des alternatives potentielles. Un critère est une fonction (g), définie sur (A), prenant ses valeurs dans un ensemble ordonné et représentant les préférences du décideur, selon certains points de vue. L'évaluation d'un alternatif a selon le critère g est écrit g(a). L'analyse spatiale multicritère se réfère à l'application de l'analyse multicritère dans un contexte spatial où les alternatives, les critères et les autres éléments du problème de décision ont des dimensions spatiales explicites *Chakhar et al (2007)*.

Depuis la fin des années quatre-vingt, l'analyse multicritère a été couplé avec des systèmes d'information géographique (SIG) puisque ces systèmes possèdent des capacités d'analyse, de gestion et d'automatisation hautement performantes qui sont grandement utiles pour ce type de travail *Drobne et Lisec (2009)*. Pour améliorer la prise de décision multicritère spatiale.

Une approche couramment utilisée afin d'effectuer des analyses multicritères au moyen d'un SIG est la combinaison linéaire pondérée (CLP), qui standardise, compare, puis combine les critères choisis *Kêdowidé (2010)*. Cette approche (CLP) nous permet d'obtenir un large éventail de nuances d'acceptabilité pour le territoire, par opposition à une décision binaire simple, plus rigide, qui partage l'espace en zones strictement bonnes ou mauvaises *Eastman et al (1995)*. Ainsi, comme tous les critères sont évalués en fonction de leur valeur relative, un faible résultat obtenu pour un critère peut être compensé par un résultat très fort, pour un autre critère c'est en fonction des poids qui leur sont accordés.

6.3 Analytical Hierarchy Process (AHP) :

La méthode (AHP) est connue dans la catégorie des (CLP), elle est développée par *Saaty.T.L 1970*. Couramment utilisée pour de nombreux problèmes requérant une prise de décision, certains ont même souligné que cette méthode avait révolutionné la façon de résoudre des problèmes complexes *Saaty et Sodenkamp (2010)*. Cette méthode permet d'analyser la situation complexe en guidant l'utilisateur dans la décomposition du problème et l'identification des critères importants *Saaty (1984)* elle permet aussi d'obtenir les poids et de comparer des critères de nature différente *Store et Kangas (2001)* et offre la possibilité de mettre en relation des données autant qualitatives que quantitatives et de prendre en compte l'opinion de nombreux acteurs. Les résultats de chacune des analyses peuvent ensuite être comparés et menés à une évaluation des consensus si, nécessaire *Higgs (2006)*.

Le processus requiert d'abord de déterminer les critères à prendre en compte selon l'étude. Puis, ces derniers doivent être classés en fonction de leur importance dans le problème étudié. Au moyen d'une matrice de comparaison (*Tabl n°64*), les critères sont alors comparés deux à deux à l'aide de l'échelle des valeurs présentée au (*Tabl n° 65*). Cette technique permet de mieux évaluer l'importance des critères par rapport aux autres en effectuant la comparaison envers un seul critère à la fois.

Le calcul des vecteurs propres de chaque critère permet ensuite d'obtenir le poids qui doit leur être attribué et permet de détecter les erreurs de jugement lors de leur priorisation *Tudes et Yigiter (2010)*. Des scripts disponibles en ligne ont été développés par *Marinoni (2004)* et par *Borouhaki ESRI (2008)* afin d'effectuer ces analyses de façon rapide et automatisée avec le logiciel Arc GIS. Pour chacun des pixels de la carte matricielle composant le territoire à l'étude, la valeur de chacun des critères est multipliée par son poids, et ce, pour toutes les alternatives étudiées. Puis, pour obtenir le résultat final de l'analyse qui permet de guider la prise de décision, la méthode généralement utilisée consiste à effectuer une sommation des résultats, comme le démontrent les études de *Dai et al (2001)*, *Lamelas et al (2009)* et *Tudes et Yigiter (2010)*.

Autrement dit, l'AHP permet aussi de tester les poids accordés aux critères en les faisant varier et en comparant ensuite les résultats obtenus *Store et Kangas (2001), Chen et al (2009) et (2010)* ont poussé plus loin cet aspect en développant un outil pour le logiciel Arc GIS permettant précisément d'évaluer la sensibilité des poids accordés aux critères. Il permet d'évaluer la sensibilité du modèle et d'obtenir une représentation spatiale des variations à l'échelle du territoire étudié. Selon les résultats, cette analyse peut inciter l'opérateur à réévaluer la distribution des priorités qu'il a accordées à ses critères.

Par ailleurs, la méthode de l'AHP a des faiblesses, *Drobne et Lisec (2009)* soulignent un problème concernant la standardisation des différents critères. Donc elle permet de comparer les facteurs sur une même base est relativement imprécise, par conséquent elle dépend de l'évaluation de l'analyste. Il souligne le manque de seuil entre chacune de ces catégories et l'inconvénient de cette méthode nous mène à donnée une mauvaise interprétation des résultats.

Tabl n° 64 : Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre.

Critères	C_1	C_2	C_3	....	C_n	w_{ij}
C_1	$1/\sum C_1$	$w_{12}/\sum C_2$	$w_{31}/\sum C_3$	....	$w_{n1}/\sum C_n$	$\sum C_1/n$
C_2	$w_{12}/\sum C_1$	$1/\sum C_2$	$w_{32}/\sum C_3$	....	$w_{n2}/\sum C_n$	$\sum C_2/n$
C_3	$w_{13}/\sum C_1$	$w_{23}/\sum C_2$	$1/\sum C_3$	....	$w_{n3}/\sum C_n$	$\sum C_3/n$
....
C_n	$w_{1n}/\sum C_1$	$w_{2n}/\sum C_2$	$w_{3n}/\sum C_3$	....	$1/\sum C_n$	$\sum C_n/n$
	$\sum C_1$	$\sum C_2$	$\sum C_3$	....	$\sum C_n$	

Quand (w_{ij}) représente le jugement quantitatif de la paire de caractéristiques (C_i), (C_j), il est défini comme suit :

Condition 1 : Si (w_{ij}) = α , alors (w_{ji}) = $1/\alpha$, $\alpha \neq 0$.

Condition 2 : Si (C_i) est considéré comme étant d'une importance relative égale à celle de (C_j), alors (w_{ij})=1 et (w_{ii})=1, pour tout (i).

Le vecteur propre de la matrice peut être trouvé par la formule suivante :

$$w_i = (T I_{j-1}^n w_{ij})^{1/n}$$

En outre, celui-ci doit être normalisé pour que la somme de ses éléments soit égale à l'unité. Pour cela, il suffit de calculer la proportion de chaque élément par rapport à l'addition.

$$T = |w_1/\sum w_i \quad w_2/\sum w_i \quad \dots \quad w_n/\sum w_i|$$

Soit (T) le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère. Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, SAATY (1977) propose la formule suivante :

$$\lambda_{max} = T \cdot w$$

Où (w) est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaisons.

La consistance de la matrice d'ordre (n) est évaluée. Les comparaisons faites par cette méthode sont subjectives et l'AHP tolère incohérence par la quantité de redondance dans l'approche. Si, cet indice de consistance ne parvient pas à atteindre un niveau requis, les réponses aux comparaisons peuvent être réexaminées. Alors, l'indice de cohérence (IC) est calculé comme Suit :

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

Le ratio de cohérence (RC) se calcule par l'équation :

$$RC = \frac{IC}{CA}$$

Le (RC) est le ratio entre (IC) et un indice de cohérence aléatoire (CA). L'indice (CA), présenté dans le (Tabl n° 66), est issu d'un échantillon de 500 matrices réciproques positives géré de façon aléatoire, dont la taille atteint 11 par 11. On considère comme acceptable un ratio de cohérence inférieur à 0,10.

Le classement de chaque alternative est multiplié par les poids des sous-critères et agrégées pour obtenir des classements locaux par rapport à chaque critère. Les évaluations locales sont ensuite multipliées par les poids des critères et agrégées pour obtenir les classements globaux. L'AHP produit des valeurs de poids pour chaque alternative basée sur l'importance jugée d'une alternative sur une autre par rapport à un critère commun.

Tabl n° 65: détermination du degré de l'importance des facteurs par échelle d'après par SAATY (1991).

<i>Degrés d'importance de chaque caractéristique</i>	<i>Définition</i>	<i>Explication</i>
1	Importance égale	Deux caractéristiques contribuent de la même façon à l'objectif
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement une caractéristique par rapport à une autre.
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'apparition favorisent fortement une caractéristique par rapport à une autre.
7	Importance très forte ou attestée	Une caractéristique est fortement favorisée et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue	Les preuves favorisant une caractéristique par rapport à une autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire.

Tabl n° 66 : Valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

6.4 Méthodologie :

De nombreux modèles empiriques (quantitatif et qualitatif) ont été conçus pour évaluer le phénomène d'érosion hydrique tels que, l'équation universelle des pertes en sol (USLE) de *W.H. Wischmeier et D.D. Smith (1960) et (1978)*. Cette équation a fait l'objet de nombreuses analyses critiques, parmi lesquelles celles d'*É. Roose (1977) et (1994)* et de *R. Bou Kheir et al (2001)*. Elle a connu un développement, mais elle nécessite des mesures à l'exutoire du bassin versant *J.R. Williams et H.D. Berndt (1977)*.

En revanche il existe d'autres travaux ont utilement converti un modèle quantitatif en un modèle qualitatif, en introduisant les facteurs qui influencent l'érosion dans un SIG *Pap/Rac (2004)* en raison de l'absence des données sur l'intensité des précipitations. Parmi ses travaux nous citons : *Renard et al (1997)*, *Reusing et al (2000)*, *Bales et Neville (2002)*, *Tidiane et al (2003)*, *Dumas (2004)*, *Atherton et al (2005)*, *Song et al (2006)*, *Luneau (2006)*, *Haboudane et al (2007)*, *Yuksel et al (2008)*, *Hancock et al (2008)*, *Bahadur (2009)*, *Yue-Qing et al (2009)*, *Boughalem M et al (2012)*, *Katherine Grandmont, 2013*, *Hussein El Hage Hassan et al (2015) ...etc.*

Pour apprécier les conditions de l'érosion nous nous sommes basés sur le modèle qualitatif sur le bassin versant de la Medjerda l'un des milieux vulnérables et sensibles au phénomène de l'érosion hydrique en s'appuyant sur la méthode de l'AHP ; celle-ci est parmi les méthodes les plus applicables grâce à sa simplicité et l'entrée économe des données en relation avec les données disponibles et l'échelle de l'investigation. La méthode combine différents facteurs tels que:

- 1- **Erodibilité des sols** : relativement fort peut montrer des signes d'érosion grave, ou encore un sol pourrait être très sensible à l'érosion et souffrir de faible érosion.
- 2- **Topographique** : relativement accidentée, et qui se caractérise par des pentes en général moyennes et fortes, à l'exception des zones de plaines.
- 3- **érosivité des pluies** : la zone d'étude est caractérisée par un climat semi aride à variante tempérée, avec un hiver frais et un été chaud et sec, il est marqué par une forte agressivité climatique se manifestant par des précipitations concentrées sous forme d'averses.
- 4- **Occupation des sols** : le couvert végétale est diversifiée plus au moins et prend différentes formes globalement réparties, en forêts dans la partie Nord du bassin, zones agricoles, et terres nues ou à végétation fortement dégradée, à la partie Sud et au centre de la zone d'étude. Cependant, les zones à végétation naturelle a connu une importante régression ces dernières décennies en faveur des terres agricoles et l'expansion des activités humaines.

Nous avons adopté la démarche suivante :

- Hiérarchisation du rôle de chaque facteur à l'échelle spatiale, à travers l'attribution d'un indice : faible = 1, moyen = 2, fort = 3 et très fort = 4 d'après : N. HUDSON (1996), J. Garcia.Ruiz et al (1996), J. POESEN et J. HOOKE (1997), R. AKÉ et al (2012).

- Intégration des données cartographiques et descriptives des facteurs influençant le processus d'érosion hydrique dans un SIG. Il est important de géo référencer et de caler en fonction du système de coordonnées de référence de la zone, les données cartographiques, afin d'effectuer le croisement spatial des facteurs de l'érosion.

A la base de la méthode AHP (**Analyse Hiérarchique des procédés**) et à partir des données recueillies on a extrait des indicateurs de sensibilité en fonction de leur contribution à l'érosion, donc il existe Quatre (4) facteurs essentiels qui ont été pris en considération par ordre d'importance:

- 1- L'érodibilité des sols : très forte, forte, moyenne et faible.
- 2- La pente classée : très forte, forte, moyenne et faible.
- 3- Les pluies journalières maximales, en 4 classes selon leurs intensités.

4- L'occupation du sol : Ce facteur permet de se renseigner sur le degré de protection de la couverture des sols, remarque ; certaines parties du terrain sont masquées par les nuages la ou on a pas pu se renseignées.

- Réalisation de la carte synthétique des conditions de l'érosion, à partir de la combinaison des cartes thématiques précédentes, en appliquant la méthode AHP. Une fois la base de données est constituée on applique une analyse multicritère qui s'appuie sur les paramètres, permettant en combinant les différents facteurs d'érosion. A cet égard on distingue quatre (4) classes de sensibilité du terrain à l'érosion : faible, moyen, fort et très fort.

6.5 Les Eléments Du Modèle :

Nous illustrons à présent, les matrices et les critères respectifs de pondération obtenus pour les caractéristiques considérées importantes à l'élaboration de la carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Les critères utilisés, par ordre de priorité, ont été, identifiés comme suit: l'érodibilité du sol, pente, précipitations, occupation du sol.

6.5.1 L'érodibilité des sols :

La sensibilité du sol à l'érosion hydrique dépend de la structure, de la texture *W.H. Wischmeier et al (1971)*, *J. Dumas (1965)* et aussi la formation lithologique du terrain qui nous renseigne sur la perméabilité (cohésion des agrégats) *J. Dumas (1965)*, plus le sol est profond, plus sa résistance contre l'érosion diffuse est forte.

Pour évaluer l'érodibilité des sols, nous avons tenu compte essentiellement de la formation lithologique et la perméabilité du terrain. Les poids attribués aux facteurs d'érodibilité retenus (*Tabl n° 67, 68 et 69*), (*Fig n°49*) *R. Bou Kheir (2001)*, *H. El Hage Hassan et al (2009, 2013)* sont les suivants :

- Erodibilité très forte : indice = 4. - Erodibilité forte : indice = 3.
- Erodibilité moyenne : indice = 2. - Erodibilité faible : indice = 1.

Tabl n°67 : Matrice de comparaison

<i>Critère Erodibilité</i>	<i>Erodibilité très fort</i>	<i>Erodibilité fort</i>	<i>Erodibilité moyenne</i>	<i>Erodibilité faible</i>
<i>Erodibilité très fort</i>	1	2	5	7
<i>Erodibilité fort</i>	0.5	1	3	5
<i>Erodibilité moyenne</i>	0.25	0.33	1	3
<i>Erodibilité faible</i>	0.20	0.17	0.33	1
Total	1.95	3.50	9.33	16

Tabl n° 68: Calcul de la pondération du critère (érodibilité du sol)

Critère Erodibilité	Erodibilité très fort	Erodibilité fort	Erodibilité moyenne	Erodibilité faible	Wi (%)
Erodibilité très fort	0.51	0.57	0.53	0.44	51.00
Erodibilité fort	0.26	0.28	0.32	0.31	29.00
Erodibilité moyenne	0.13	0.09	0.11	0.19	13.00
Erodibilité faible	0.10	0.05	0.03	0.06	6.00
Total	1	1	1	1	100 %

Tabl n° 69 : Calcul du rapport de cohérence (CR)

	facteur	C1	C2	C3	C4	Poids somme vecteur	Critère poids	λ
C1	Erodibilité très fort	1.00	2.00	5.00	7.00	2.16	0.51	4.23
C2	Erodibilité fort	0.50	1.00	3.00	5.00	1.23	0.29	4.24
C3	Erodibilité moyenne	0.25	0.33	1.00	3.00	0.53	0.13	4.07
C4	Erodibilité faible	0.20	0.17	0.33	1.00	0.25	0.06	4.17
	Total	1.00	1.00	1.00	1.00	/	1.00	16.71

Alors : λ max= 4.18
 IC = 0.06
 CA = 0.90
 Donc : RC= 0.07

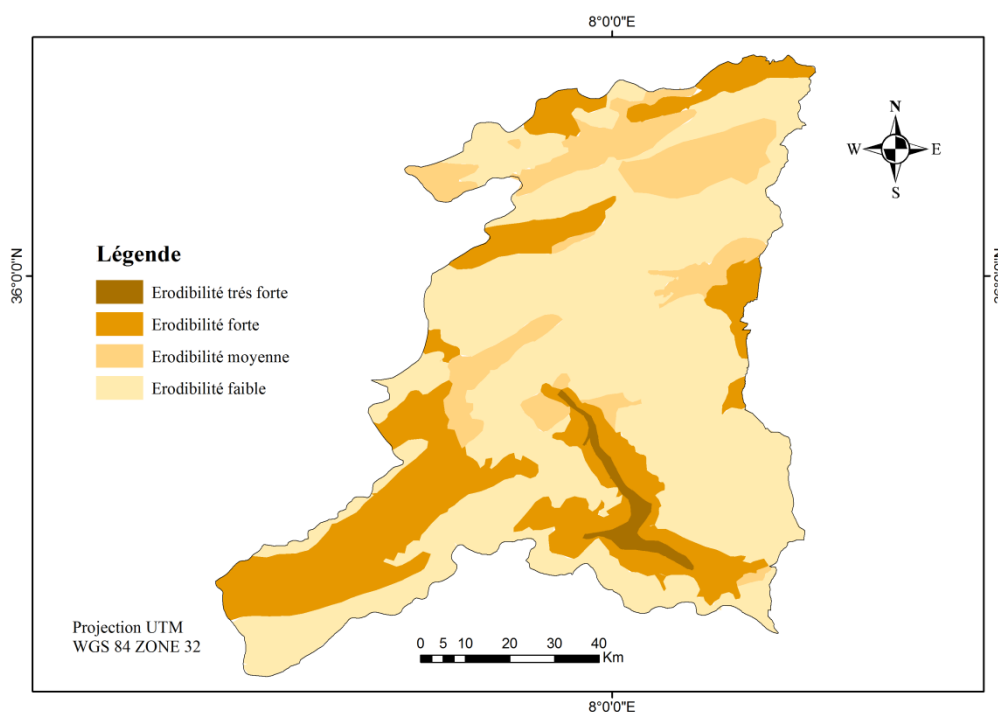


Fig n°49 : Carte d'érodibilité du sol du bassin versant de la Medjerda

6.5.2 Le facteur topographique pente :

L'inclinaison de la pente exerce une influence variable sur le ruissellement *Boukheir et al (2001)*. En revanche, du fait de l'accroissement de l'énergie cinétique des écoulements, lorsque ceux-ci se produisent, une forte pente favorise l'érosion, la zone d'étude présente des valeurs de pentes allant de 0 % à plus 12 %. Alors la longueur de la pente à des effets plus incertains *É. Roose (1994)*. Il n'en a pas été tenu compte dans cette étude.

A l'aide du modèle numérique du terrain d'étude (MNT) provient de l'extraction des courbes de niveau des cartes topographiques par l'intermédiaire d'un logiciel Arc Gis. Ce travail a permis d'établir la carte des pentes d'une façon précise. Comme elle comme mentionnée sur la carte ci-dessus les pentes très fortes et fortes, se concentrent surtout dans les parties Nord et Sud du bassin versant ces pentes sont caractérisées par un relief accidenté. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles sont réparties sur l'ensemble du bassin. Nous avons énumérés (*Tabl n° 70, 71, 72 et 73*) et cartographié (*Fig n° 50*) les pentes en quatre classes.

Tabl n°70 : Nature et contribution des classes de pente.

Limite de classe	Impact érosif	Classe
0-3%	Faible	1
3-8.5%	Moyen	2
8.5-12.5%	Fort	3
Plus 12.5%	Très fort	4

Les poids attribués au facteur pente voir le *Tabl n°69*

Tabl n° 71 : Matrice de comparaison

<i>Critère pente</i>	<i>Pente très fort</i>	<i>Pente fort</i>	<i>Pente moyenne</i>	<i>Pente faible</i>
<i>Pente très fort</i>	1	3	5	9
<i>Pente fort</i>	0.5	1	3	5
<i>Pente moyenne</i>	0.25	0.33	1	3
<i>Pente faible</i>	0.11	0.16	0.20	1
Total	1.86	4.49	9.20	18

Tabl n°72 : Calcul de la pondération du critère pente

<i>Critère pente</i>	<i>Pente très fort</i>	<i>Pente fort</i>	<i>Pente moyenne</i>	<i>Pente faible</i>	Wi (%)
<i>Pente très fort</i>	0.54	0.67	0.54	0.50	56.25
<i>Pente fort</i>	0.27	0.22	0.33	0.27	27.25
<i>Pente moyenne</i>	0.13	0.07	0.11	0.17	12.00
<i>Pente faible</i>	0.06	0.03	0.02	0.05	4.00
Total	1	1	1	1	100 %

Tabl n°73 : Calcul du rapport de cohérence (CR)

	facteur	C1	C2	C3	C4	Poids somme vecteur	Critère poids	λ
C1	<i>Pente très fort</i>	1.00	3.00	5.00	9.00	2.33	0.56	4.16
C2	<i>Pente fort</i>	0.50	1.00	3.00	5.00	1.11	0.27	4.11
C3	<i>Pente moyenne</i>	0.25	0.33	1.00	3.00	0.47	0.12	3.92
C4	<i>Pente faible</i>	0.11	0.16	0.20	1.00	0.16	0.04	4.00
	Total	1.00	1.00	1.00	1.00	/	1.00	16.19

Alors : λ max= 4.05
 IC = 0.02
 CA = 0.90
 Donc : RC= 0.02

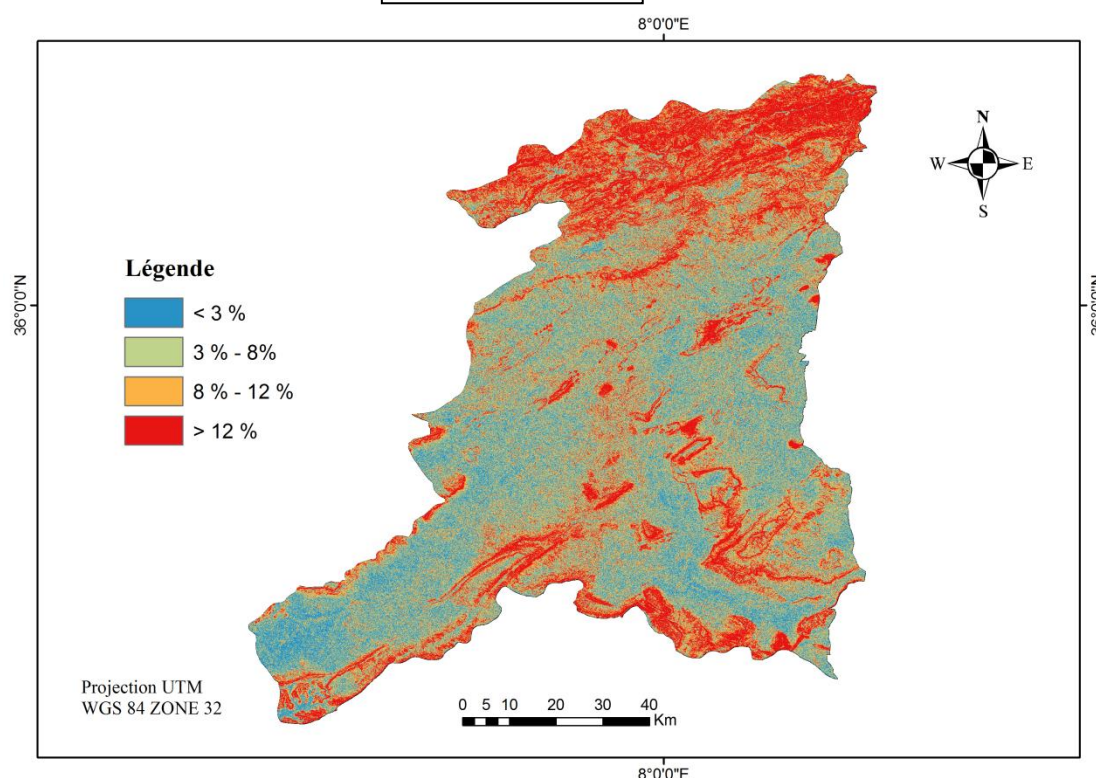


Fig n°50 : Carte des classes de pentes du bassin versant de la Medjerda

6.5.3 Les précipitations :

Depuis de nombreuses décennies, la corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion est observée. Par ailleurs l'intensité des pluies exerçait un effet primaire qui est défini comme étant l'action mécanique des gouttes pluviales produites sur le sol et un effet secondaire comme étant la puissance de ruissellement sur les versants *Galevski (1955)*. Alors le pouvoir érosif dépend de l'intensité de la pluie. Si l'intensité est forte, le risque érosif est élevé et si l'intensité est faible le risque érosif est faible.

Dans notre cas nous affirmons que les pluies journalières maximales (leurs intensités) jouent un rôle très important et peuvent favoriser une forte érosion contrairement pour les pluies moyennes annuelles. En effet, notre travail est basé sur la carte des pluies journalières maximum *Laborde* et qui nous a permis de délimiter quatre (4) classes de pluies (*Tabl n°74*) (*Fig n°51*).

- Classe 1 : inf **60 mm** : l'intensité est faible.
- Classe 2 : **60 - 70 mm** : l'intensité moyenne.
- Classe 3 : **70 - 80 mm** : l'intensité est forte.
- Classe 4 : sup **80 mm** : l'intensité est très forte.

Tabl n°74 : Nature et contribution des classes de pluies.

Limite de classe	Impact érosif	Classe
inf 60 mm	Faible	1
60 - 70 mm	Moyen	2
70 - 80 mm	Fort	3
sup 80 mm	Très fort	4

A partir de là, nous avons attribués les poids du facteur de précipitation comme suit (*Tabl n° 75, 76, 77*) :

Tabl n°75 : Matrice de comparaison

<i>Critère pluies</i>	<i>Intensité très fort</i>	<i>Intensité fort</i>	<i>Intensité moyenne</i>	<i>Intensité faible</i>
<i>Intensité très fort</i>	1	3	5	7
<i>Intensité fort</i>	0.5	1	3	5
<i>Intensité moyenne</i>	0.25	0.33	1	3
<i>Intensité faible</i>	0.17	0.20	0.20	1
Total	1.92	4.53	9.20	16

Tabl n°76 : Calcul de la pondération du critère pluies.

<i>Critère pluies</i>	<i>Intensité très fort</i>	<i>Intensité fort</i>	<i>Intensité moyenne</i>	<i>Intensité faible</i>	Wi (%)
<i>Intensité très fort</i>	0.52	0.66	0.54	0.44	54.00
<i>Intensité fort</i>	0.26	0.22	0.33	0.31	28.00
<i>Intensité moyenne</i>	0.13	0.07	0.11	0.19	12.50
<i>Intensité faible</i>	0.09	0.04	0.02	0.06	5.00
Total	1	1	1	1	100 %

Tabl n° 77 : Calcul du rapport de cohérence (CR)

	facteur	C1	C2	C3	C4	Poids somme vecteur	Critère poids	λ
C1	<i>Intensité très fort</i>	1.00	3.00	5.00	7.00	2.38	0.54	4.41
C2	<i>Intensité fort</i>	0.50	1.00	3.00	5.00	1.19	0.28	4.25
C3	<i>Intensité moyenne</i>	0.25	0.33	1.00	3.00	0.50	0.13	3.85
C4	<i>Intensité faible</i>	0.17	0.20	0.20	1.00	0.23	0.05	4.60
	Total	1.00	1.00	1.00	1.00	/	1.00	17.11

Alors : $\lambda \text{ max} = 4.28$
 IC = 0.09
 CA = 0.90
 Donc : RC = 0.1

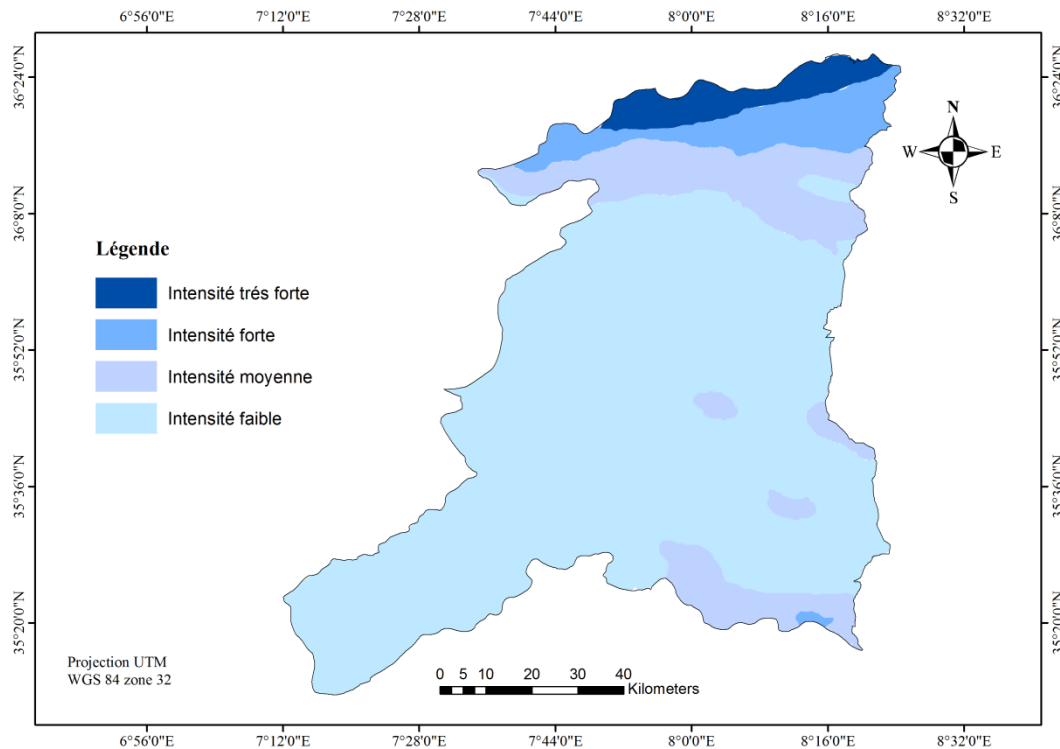


Fig n°51 : Carte de l'intensité des pluies dans le bassin versant de la Medjerda

6.5.4 L'occupation du sol :

L'occupation du sol est l'un des principaux paramètres à considérer pour décrire le milieu. Ce paramètre est généralement évalué à partir d'images satellitaire de haute résolution spatiale *Girard et Isavwa (1990)*. Afin de bien percevoir la végétation d'un territoire, le recouvrement végétal doit être supérieur à 30 % de la surface du pixel *Girard et Isavwa (1990)*. Dans le cas contraire, les caractéristiques spectrales du substrat prédomineront *Girard (1975), Courault et Girard (1988)*. Ce pourcentage peut être un seuil indicateur pour évaluer l'érosion. Si, le taux de recouvrement est plus grand que 30 %, la végétation joue un rôle protecteur. Tandis que s'il est plus petit, le sol est soumis aux processus d'érosion *Bou Kheir et al (2001)*. Autrement dit, le couvert végétal protège le sol de deux manières. D'une part, il augmente l'infiltration, et d'autre part, il maintient la cohésion des matériaux.

6.5.4.1 Influence du couvert végétal sur l'érosion :

Le couvert végétal joue un double rôle, d'une part, il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie *Roose (1994) Duchaufour (1970) Kayser (1957)* et d'autre part, protège le sol, surtout durant la période où les précipitations sont plus intenses. Par conséquent l'efficacité de la végétation n'est pas toujours la même *Duchaufour (1970)* mais il réduit l'érosion hydrique d'une manière globale (*Fig n°52*).

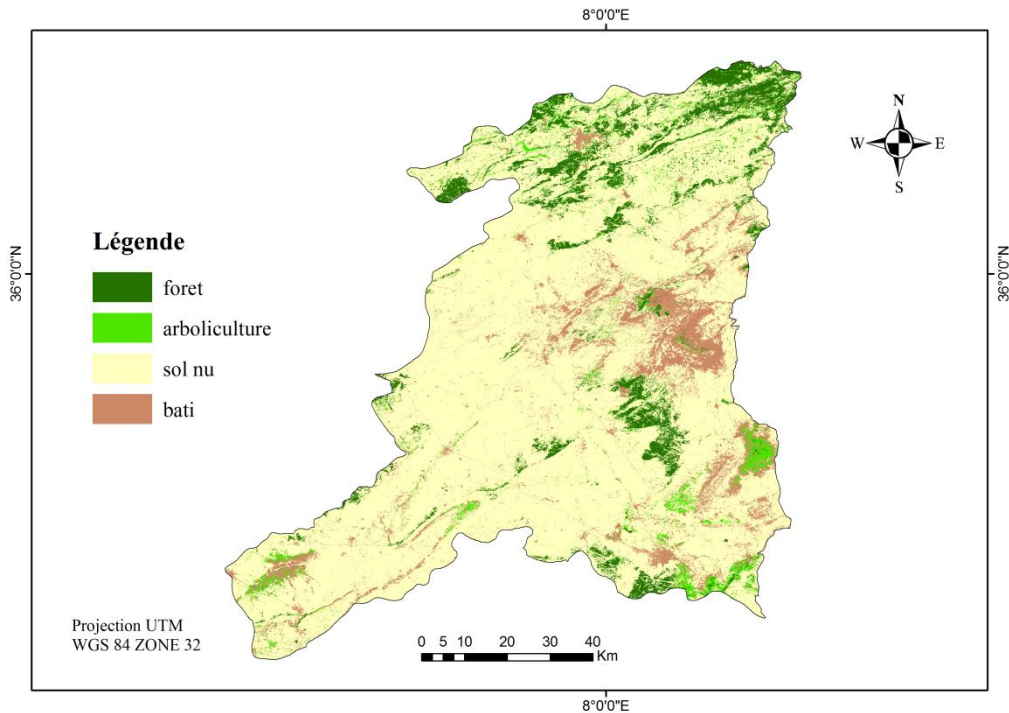


Fig n°52 : Carte d'occupation du sol

Le mode d'occupation du sol (*Fig n°53*) a été étudié à partir d'une image satellitaire. Cette image a été analysée et classifiée, à l'aide du logiciel de traitement d'images l'ENVI, en tenant compte des observations de terrain (*Tabl n°78*) (*Annexe n°14*). Nous avons retenu le classement suivant :

Classe 1 : zone très défavorable à l'érosion : là où se trouve le tissu urbain (agglomération), ainsi que les barrages.

Classe 2 : zone défavorable à l'érosion : forêts denses, Cette dernière assure une protection importante et ne subissent aucune modification physiologique durant l'année *R. Bou Kheir (2002)*. Le traitement des images satellitaires nous a permis de déduire :

Période (1987-2009) : la région a subi des conditions défavorables durant cette période. Par conséquent, le couvert végétal se dégrade et diminue de plus en plus en raison de l'insuffisance des précipitations (années sèches) et aussi l'activité humaine.

Période (2009 -2016) : les forêts localisées dans la partie nord et la limite sud de la zones d'étude on replit leurs naissance, ceci s'explique par un régime pluviométrique favorable et aux aménagements effectués.

Classe 3 : zone légèrement favorable à l'érosion : existence de l'arboriculture et les vergers aussi quelques arbres dispersés associés à une végétation herbacée qui n'assurent pas une protection complète du sol. Les arbres sont souvent associés à une végétation herbacée qui protège mal le sol.

Classe 4 : elle représente la végétation herbacée. Mais cette végétation ne pousse qu'au mois d'avril jusqu'au début de la saison d'automne, le sol restant presque nu pendant les mois les plus pluvieux de l'année. Donc cette zone est très favorable à l'érosion hydrique.

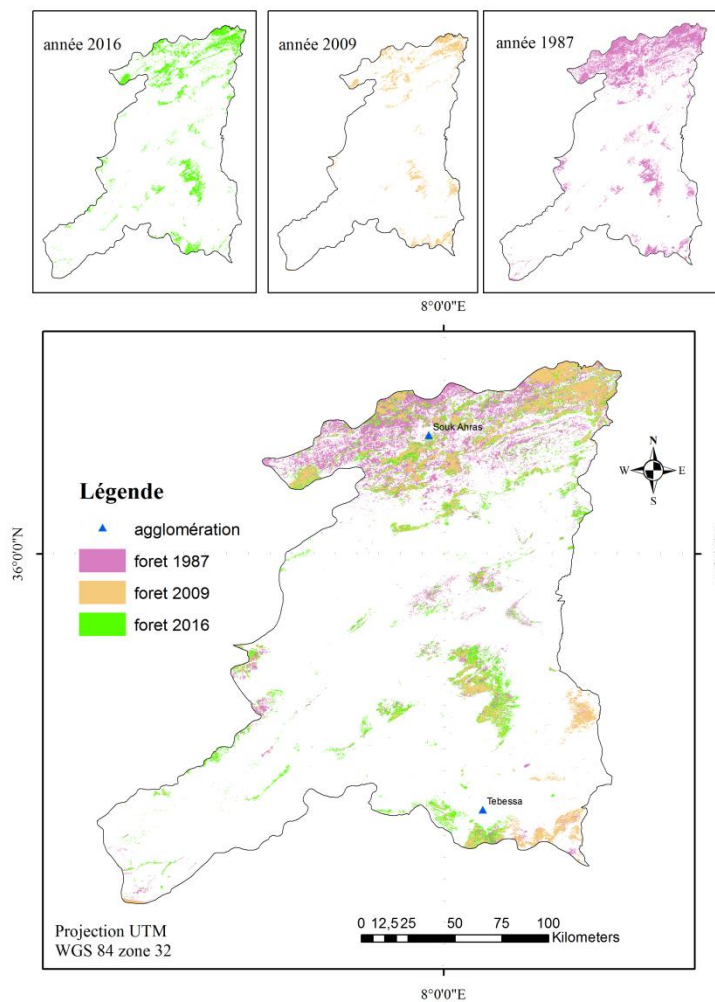


Fig n°53 : Diachronologie du couvert végétal naturel.

Tabl n°78 : Nature et contribution des classes d'occupation du sol.

Motif	Impact érosif	Classe
Zone urbaine	Faible	1
Foret	Moyen	2
Zone agricole	Fort	3
Sol nu	Très fort	4

Les poids attribués aux facteurs d'érodibilité retenus (Tabl n° 79) sont les suivant :

Tabl n° 79 : Matrice de comparaison

Critère occupation du sol	Zone urbaine	Foret	Zone agricole	Sol nu
Zone urbaine	1	3	5	9
Foret	0.5	1	3	5
Zone agricole	0.25	0.33	1	3
Sol nu	0.11	0.14	0.20	1
Total	1.86	4.47	9.20	18

Tabl n°80 : Calcul de la pondération du critère occupation du sol.

Critère occupation du sol	Zone urbaine	Foret	Zone agricole	Sol nu	Wi (%)
Zone urbaine	0.54	0.67	0.54	0.50	56.25
Foret	0.27	0.22	0.29	0.28	26.50
Zone agricole	0.13	0.07	0.1	0.17	11.75
Sol nu	0.06	0.03	0.02	0.05	4.00
Total	1	1	1	1	100 %

Tabl n° 81 : Calcul du rapport de cohérence (CR)

	facteur	C1	C2	C3	C4	Poids somme vecteur	Critère poids	λ
C1	Zone urbaine	1.00	3.00	5.00	9.00	2.71	0.57	4.75
C2	Foret	0.50	1.00	3.00	5.00	1.32	0.28	4.71
C3	Zone agricole	0.25	0.33	1.00	3.00	0.55	0.17	3.23
C4	Sol nu	0.11	0.14	0.20	1.00	0.18	0.05	3.60
	Total	1.00	1.00	1.00	1.00	/	1.00	16.29

Alors : λ max= 4.07 IC = 0.02 CA = 0.90 Donc : RC= 0.02
--

Après avoir réalisées les différentes matrices, nous avons eu besoin de relativiser le comportement des différentes classes. Les poids (**Wi**) exprimés par les matrices ont été ultérieurement annexés aux différentes cartes sous le format raster grâce à l'opération de reclassification de l'extension Spatial Analyst (**Arc-Gis**). Ensuite, nous avons élaboré la matrice de comparaison entre les différents facteurs décisifs (Tabl n° 80 et 81), ainsi que le facteur de pondération de chacun, lors de l'érosion.

Tabl n° 82 : Matrice de comparaison d'après Marinoni (2004)

Critère	L'érodibilité du sol	Pente	Pluies	Occupation du sol
L'érodibilité du sol	1	3	5	7
Pente	1/2	1	3	6
Pluies	1/4	1/3	1	3
Occupation du sol	1/5	1/6	1/4	1
Total	1.95	4.49	9.25	17

Tabl n°83 : Détermination du poids de chaque critère.

Critère	L'érodibilité du sol	Pente	Pluies	Occupation du sol	Wi (%)
L'érodibilité du sol	0.51	0.67	0.54	0.41	53.00
Pente	0.26	0.23	0.32	0.35	29.00
Pluies	0.13	0.07	0.11	0.18	12.00
Occupation du sol	0.10	0.03	0.03	0.06	06.00
Total	1	1	1	1	100%

A partir des résultats obtenus dans le (Tabl n° 83) l'aléa érosion est calculé selon la formule suivante :

$$\text{aléa érosion} = 0.53 \text{ érodibilité} + 0.29 \text{ pente} + 0.12 \text{ pluie journalier} + 0.06 \text{ occupation du sol}$$

6.6 Calcule du ratio cohérence (RC) :

Le rapport de cohérence (RC) est calculé pour mesurer la concordance entre les jugements purement aléatoires. L'analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) permet toujours un certain niveau d'incohérence qui ne doit pas dépasser un certain seuil. Les indices d'incohérence aléatoire (IC) (Tabl n° 85) développés par Saaty (1977) permettent de déterminer le rapport de cohérence (RC), qui mesure le degré de cohérence. Si, la valeur de RC est plus petite ou égale à 0,1, l'incohérence est acceptable, sinon la comparaison par paire peut être révisée. Si, le RC est beaucoup plus de 0,1 que les jugements ne sont pas fiables parce qu'ils sont trop proches pour le réconfort au hasard. Par conséquent, les poids peuvent être acceptés.

Tabl n° 84 : Indices aléatoires pour les matrices de différentes tailles Saaty et Vargas (1991)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IC	0.00	0.52	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

$$(RC = IC/CA) \text{ et } (IC = \lambda \max - n/n - 1)$$

CA: index de cohérence, n: nombre des critères.

$\lambda \max$: Est un vecteur prioritaire multiplié par chaque total de colonne.

Tabl n° 85 : Calcul du rapport de cohérence (CR)

	facteur	C1	C2	C3	C4	Poids somme vecteur	Critère poids	λ
C1	<i>L'érodibilité du sol</i>	1.00	3.00	5.00	7.00	2.42	0.53	4.57
C2	<i>Pente</i>	0.50	1.00	3.00	6.00	1.27	0.29	4.38
C3	<i>Pluies</i>	0.25	0.33	1.00	3.00	0.53	0.12	4.42
C4	<i>Occupation du sol</i>	0.20	0.16	0.25	1.00	0.25	0.06	4.17
	Total	1.00	1.00	1.00	1.00	/	1.00	17.54

Alors : λ max= 4.38
 IC = 0.13
 CA = 0.90
 Donc : RC= 0.1

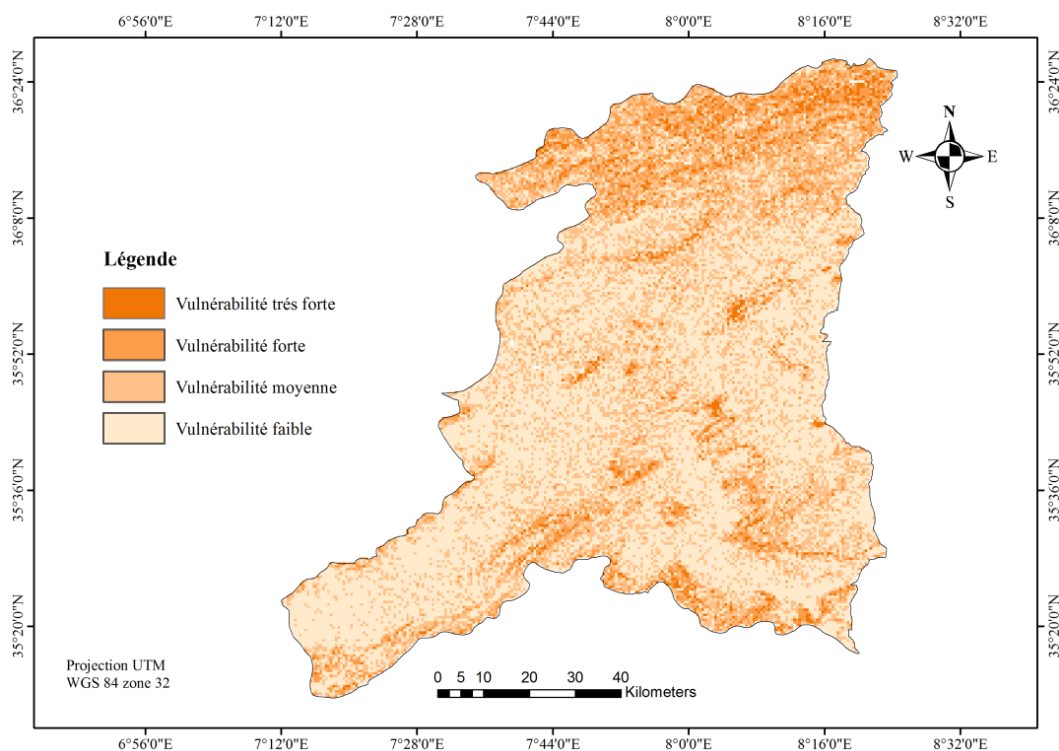


Fig n° 54 : Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Medjerda

6.7 Résultat et Discussion:

L'analyse de sensibilité à l'érosion dans le bassin versant de la Medjerda est réalisée par l'application de la méthode AHP. Les critères utilisés, par ordre de priorité: l'érodibilité du sol, la pente, les précipitations journalières et l'occupation du sol, leurs poids sont calculés respectivement en pourcentage (53%, 29%, 12%, 6%), sachant que le coefficient de cohérence (CR) se trouve comme 0,1. Cela indique un niveau de cohérence raisonnable dans la comparaison par paires des différents facteurs. La couche raster de chaque paramètre utilisé est multipliée par leur poids donné et les additionne en utilisant un outil de superposition de somme pondérée arithmétique dans le logiciel Arc GIS. La carte combinée est reclassifié en quatre (4) classes comme suit : très élevée, élevée, moyenne et faible, comme mentionnée ci-dessus à travers la (*Fig n° 54*).

D'après la carte d'aléa érosion illustrée et sur la base des facteurs pondérés combinés pris en compte, nous affirmons que les paramètres les plus importants sont fortement liés à la pente et à la lithologie (érodibilité du sol). Par conséquent les zones présentant une vulnérabilité très forte à forte se situent principalement dans la partie Nord du bassin versant (ou le relief est très important), et certaines zones isolées dans le centre. En revanche, une zone relativement inférieure et une érosion faible à modérée est qui domine toute la partie sud de la zone d'étude.

Conclusion

Le phénomène de l'érosion est engendré par différents processus naturels (*Rouet, 2009*), à travers plusieurs facteurs passifs tels que la lithologie, structure du sol...ect et aussi, par des facteurs actifs tels que le climat, couvert végétale, action biologique....ect. Ces derniers prédisposent les terrains à une altération des matériaux (*Campy et Macaire, 1989*).

Afin d'étudier, d'analyser le phénomène de l'érosion, il existe plusieurs méthodes d'analyse spatiale représentent des outils intéressants, car elles permettent de faire le lien entre les données naturelles déjà cités, grâce à des analyses croisées de cartes, d'indicateurs et de données qualitatives. L'objectif de cette étude était de montrer l'application d'une méthode largement diffusé Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) d'après *Saaty (1991)*, afin de mettre en lumière la dynamique et la dégradation à l'échelle du bassin versant. Le résultat de la présente étude nous a permis d'identifier et de cartographié la sensibilité des terrains à l'érosion et qui constituera un outil important pour l'aménagement du territoire.

A partir de la méthode de l'AHP, il semble que le bassin versant de la Medjerda présente des zones vulnérables où la combinaison des facteurs apparaît plus ou moins favorable aux pertes de terre. Par conséquent, nous jugeons que le facteur d'érodibilité du sol (nature lithologie) ainsi que le facteur topographique (pente) sont considérées comme l'un des critères les plus importants qui influent sur les processus d'érosion.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au vu de ce qui précède, il s'avère que la dégradation du sol est un mal qui ne peut être combattu. Donc Il faudrait en revanche la gérer et développer des stratégies pour surmonter ces effets. La diversité du milieu qui caractérise le bassin (zone d'étude), la variation climatique, ainsi que la nature et l'intensité des processus morphogéniques qui les distinguent, génèrent un régime hydrologique souvent brutal qui à amplifié le phénomène d'érosion hydrique et le transport des sédiments vers l'exutoire.

Au terme de notre travail, mené sur le bassin versant de la Medjerda, nous avons essayé de dégager les grands traits de son fonctionnement en se basant sur l'analyse et l'interprétation des données géographiques, climatiques et hydrologiques. Alors nous pensons que notre travail ne serait pas complet si nous ne faisons pas la synthèse et le bilan des réponses que nous avons apportées.

Dans ce travail, nous avons procédé à l'analyse détaillée des paramètres suivants :

1-Paramètres physico-géographiques du bassin versant de la Medjerda :

- A cheval sur l'Algérie et la Tunisie, le bassin versant de la Medjerda occupe une superficie de 7877 km^2 . L'étude morphométrique du bassin versant de la Madjerda nous a permis de montrer que la topographie est marquée par une dénivelée plus au moins importante, avec une altitude qui varie entre 1700 et 300 m.

- Il présente une forme allongée dans l'ensemble ($1.54 < Kc < 1.65$) malgré leur différentes tailles comme il se caractérise par un relief modéré à assez fort. Selon la taille et la densité de drainage, le coefficient de torrentialité atteint 0.02 et avec un temps de concentration et de 24.18 heures.

- Dans son ensemble le bassin versant de la Medjerda présente une forme dendritique de son réseau hydrographique et les différents paramètres calculés, relatifs au réseau hydrographique, témoignent d'un chevelu hydrographique bien hiérarchisé moyennement dense, mais assez ramifié.

-A l'issue de l'étude géologique, nous avons pu individualiser les formations selon leur résistance à l'érosion. En fait, la majorité des formations appartenant aux bassins étudiés sont composées de roches plus au moins tendres à moyennement résistantes. Un relief irrégulier et des pentes fortes qui offrent des conditions plus sensibles à l'écoulement.

-Les caractéristiques biogéographiques montrent moyennement un faible taux d'occupation du sol par la végétation.

- D'un point de vue climatique, il est à noter que la zone d'étude se caractérise par un climat semi aride avec un hiver froid et un été sec et chaud. La précipitation moyenne annuelle au niveau du bassin atteint plus de 400 mm pour la période d'observation allant de 1970 à 2014. Durant cette même période, la variabilité interannuelle des modules pluviométriques ($0,23 < C_v < 0,32$) est moins marquée que la variabilité mensuelle. Cette variation est liée au caractère du climat méditerranéen de l'Afrique du Nord d'une part et d'autre part à la torrencialité des pluies. Les séries pluviométriques des différentes stations de la Medjerda s'ajustent en général à une loi normale de Gauss ou log normale. Ces variabilités spatio-temporelles conditionnent l'écoulement et les transports solides dans le bassin versant de la Medjerda.

- Le régime thermique est caractérisé par des températures moyennes annuelles qui varie entre 15°C et 16°C , avec des amplitudes annuelles assez fortes équivalentes aux températures annuels ($+T/T = 1$). Ceci permet d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration, le tarissement des cours d'eau, l'assèchement rapide des sols, la dégradation du couvert végétal et ainsi le développement d'érosion intense et la production de sédiment pour de transport solide.

2- Les paramètres de l'écoulement

- L'insuffisance de l'équipement hydrométrique et le manque de données précises ont été largement ressentis dans la compréhension de certains phénomènes hydrologiques, particulièrement liés aux formes de l'écoulement extrême. L'interprétation statistique et graphique des données des débits nous a permis de ressortir les caractéristiques du régime d'écoulement du bassin étudié et sa variabilité temporelle. Le calcul des bilans inter annuels ont fait apparaître l'importance du coefficient d'écoulement, au niveau du bassin versant de la Medjerda ($CE\ sup\ 5\%$). L'effet et l'agressivité des écoulements se fait aussi sentir à l'échelle saisonnière.

- Le régime saisonnier du bassin est essentiellement pluvial se fait sous forme de crue. L'étude des formes extrêmes de l'écoulement, a mis successivement en évidence : le caractère torrentiel des crues principalement à la forte intensité des précipitations, leur mécanisme de propagation. Par contre les étiages sont moins brutaux qui permettent de mettre en valeur la forte décroissance des débits en phase de tarissement et surtout les restitutions des nappes aquifères à l'écoulement fluvial.

3- Modélisation, transport solide et Erosion :

Dans notre travail en s'est basé sur les données observées durant la période (1976 – 2010). Le dépouillement des données disponibles met en évidence l'existence de lacunes au niveau des séries des concentrations en suspension. Donc nous avons essayé d'apporter une contribution à la quantification des transports solides et à la compréhension du phénomène d'érosion.

En revanche, nous avons calculé les différentes valeurs des paramètres de l'écoulement liquide et du transport solide dans le bassin versant de la Medjerda, et l'action érosive nous semble différente d'un bassin à l'autre. La dégradation spécifique calculée moyenne varie entre $321.17 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour le bassin de Medjerda et $739.22 \text{ t/km}^2/\text{an}$ pour le bassin de Mellegue. Pour le bassin de Meskiana, elle représente $631.61 \text{ t/km}^2/\text{an}$.

Alors une très forte disparité spatiale du taux d'érosion selon les valeurs obtenu de la dégradation spécifique. Cette disparité résulte principalement de la différence des paramètres physiques tel que la lithologie, couvert végétal, la pente et de la taille des bassins versants (Walling, 1984).

- L'aboutissement de l'analyse des données par modélisation ce fait, a partir de la disponibilité des données de débits liquides et des mesures de la concentration des matières en suspension. En revanche la relation des débits liquides aux débits solides en suspension pour les différents bassins versant est de type puissance de la forme générale ($Q_s = aQ_l^b$).

A l'échelle annuel les modèles montrent que les paramètres ($0.24 < a < 0.69$) et ($1.04 < b < 1.71$), sont proches de ceux trouvés par bon nombre de chercheurs ayant travaillé dans des régions semi-arides.

A l'échelle saisonniers les modèles, donnent pour l'automne, l'hiver et le printemps des valeurs de b proches de celle des modèles instantanés et sont comprises entre 1,4 et 2,2, pour l'été (b) est inférieur à 1 pour les différents bassins. Le paramètre (a) est supérieur ou égal à 1 durant la saison automne ce qui exprime l'importants des apports solides pour de faibles débits, il est proche de celui des modèles pour la saison d'hiver et du printemps. Nous jugeons que l'automne est la saison responsable de plus de 50% du flux annuel alors que pour la saison printemps elle représente rien que 12%, durant cette période l'érosion diminue en raison de la présence du couvert végétale et l'humidification des sols. Cette variabilité dépend de la fréquence des orages et de la période d'occurrence. Donc Le facteur (b) explique plutôt l'influence de l'écoulement ou l'état hydrologique du bassin, le facteur a exprimerait l'état du sol (Bouanani 2004).

4- Identification des zones vulnérable :

L'utilisation de l'analyse multicritère (AHP) nous a permis d'avoir une spatialisation et une localisation des zones sensibles à l'érosion au niveau du bassin versant de la Medjerda. Alors la carte de vulnérabilité a fait ressortir l'ampleur de la dégradation du milieu.

Pour élaborer la carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique nous avons pris en compte quatre (4) facteurs dominants (lithologique, topographique, climatique, et naturel) ; ceci nous a permis d'estimer l'agressivité résultante en affectant un poids spécifique à chacun des quatre facteurs en nous inspirant de la littérature scientifique et en se basant sur les travaux de plusieurs chercheurs dans ce domaine, donc l'approche utilisée, s'appuie sur la reconnaissance du terrain.

La carte finale de vulnérabilité permet de mettre en évidence quatre zones de différentes vulnérabilités dans le bassin versant de la Medjerda: la zone vulnérable et très vulnérable principalement localisée au nord du bassin et à quelques endroits où la présence du relief s'impose, elles occupent 40% de la surface du bassin versant. Ces régions offrent des conditions très favorables à l'érosion, ceci s'explique par : la pente forte, l'érodibilité forte (présence des argiles et marnes), l'intensité des précipitations importante et la densité du couvert végétal naturel variable. En revanche les aires considérées stables et moyennement stables, sont distribuées dans la partie Centre et Sud du bassin de la Medjerda. Cette stabilité revient aux potentialités du milieu, en raison de l'insuffisance des pluies, l'occupation du sol variable, la nature lithologique et le plus important la pente moyennement faible.

Par conséquent l'impact de la dégradation du milieu commence à être remarquée dans trois barrages : Ain Dalia (Souk Ahras), Tarfa , Batoum (Mellegue Amont) ,ceci montre un engorgement dans ces barrages remarquable.

Recommandations :

Ce travail constitue :

Une première contribution dans l'analyse des phénomènes hydrologiques, du transport solide de la modélisation et la quantification des paramètres de l'écoulement est de mettre en évidence l'interrelation entre eux et d'autre part de mieux comprendre le fonctionnement dans le bassin versant de la Medjerda (NE Algérie).

Une deuxième contribution à la mise en place d'un plan de protection contre la dégradation du milieu naturel auquel s'expose le bassin versant de la Medjerda. D'un autre côté, des solutions doivent être apportées dans le but de réduire le taux d'envasement et la durée de vie du barrage dans la zone d'étude.

Bibliographie

Bibliographie

A

- A.B.H, 2006.** Agence National des bassins hydrographiques, (Constantinois - Seybousse – Mellegue)
- A.N.R.H., 1993.** Carte Pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydriques. Ministère de l'Équipement. Ed. I.N Alger.
- A.N.R.H, 2010.** Les changements climatiques et leur impact sur les ressources en eau en Algérie. Assises Nationales sur l'Eau. ANRH. Alger, 41 p.
- Abrahamas A.D., Parsons A.J. (1991).** Relation between sediment yield and gradient on debris-covered hillslope, Walnut Gulch, Arizona. *Geol. Soc. Am, Bull* 103 : 1109-1113.
- Achite. M, Meddi. M, 2004.** Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sècheresse* 15 (4), pp 367–373.
- Achite. M, 2002.** Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord ouest algérien). *Watmed, Tunisia.* 10-13 oct. vol2, pp 894-899.
- Abrahams. A.D, Kellerhals. R 1973.** Correlations between water discharge and concentrations of suspended solids for four large prairie rivers. In *Fluvial Processes and Sedimentation, (Proceedings of Hydrology Symposium no.9)*, pp. 96 — 113: Nat. Research Council of Canada.
- Agoumi. A, 2003.** Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Institut international du développement durable. Winnipeg (Manitoba), Canada.
- Ahnert. F, 1970.** Functional relationships between denudation, relief, and uplift in large mid-latitude drainage basin. *American journal of Science*, 268:243-263.
- Albergel. J, Boufaroua. M et Pepin .Y, 1998.** Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires en climat semi aride tunisien. *Bull. ORSTOM*, 18 : 67-75.
- Ambroise. B, 1978.** Modèle mathématiques dynamiques en géographie physique, *Rev, de géographie de l'Est* N°3, tom : 17, Juillet- Septembre 1978. Univ de l'Est de la France, pp : 149-167.
- Ake .G.E, Kouadio .B.H, Adja M.G, Ettien .J.B, Effebe K.R. et Biemi. J. 2012** Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, vol. VI, p. 23-42. URL :<http://physio-geo.revues.org/2285>.
- Atherton. J, Olson D. Farley. L and Qauqau. I 2005.** Watershed Assessment for Halthy Reefs and Fisheries, Final Report to the United States Department of State. In *Wildlife Conservation Society-South Pacific*, [En ligne].

B

- Baba Hamed .K, Bouanani .A, Terfous .A, Megnounif .A, 2002.** Analyse des crues de l'oued Sebdou (Tafna – NW Algérie). *Coll. Int. Sur l'eau. Univ. Hassiba ben Bouali Chlef* 5-6 février.
- Bahadur K.C.K 2009.** Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS: a case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand, *Environmental Geology*, 57(3): 695-705.
- Belloula M 2008.** Modélisation des écoulements et perspectives de prévention contre les risques d'inondation dans quelques bassins de la Medjerda (Confins Algéro-Tunisiens). *Mémoire de Magistère. Université El Hadj Lakhdar.* 166 p.
- Beles. C.L.K et Neville. P.R.H 2002.** Modelling soil erosion sensitivity using digital image processing. *Automation Congress, 2002 Proceedings of the 5th Biannual World*, 13: 83-88.
- Benchetrit, M, 1972,** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie, Paris, PFU, 126 p.
- Benkhadra. H, 1997.** Battance, ruissellement et érosion diffuse sur les sols limoneux cultivés-Déterminisme et transfert d'échelle de la parcelle au petit bassin versant. *Thèse de Doctorat de l'université d'Orléans (France)*.
- Benkhaled. A, Remini. B, 2003.** Influence des paramètres hydrométéorologiques sur l'estimation des apports solides dans un bassin versant de zone semi aride. *L'oued Ouahrane. Colloque International Oasis, Eau et Population. Biskra.* 22-23 et 24 Septembre.
- Benkhaled. A, Remini. B, 2003.** Temporal variability of sedithent concentration and hysteresis phenomena in the Wadi Wahrane basin. *Algeria. Hydrological Sciences Journal.* N° 48(2), pp 243-255.

- Benkhaled. A, Remini .B, 2003.** Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algeria). *Revue des Sciences de l'Eau* N° 16/3. pp 333-356
- Bent Hascholt, Madeyski M. 1998.** Suspended sediment yield from the Ansager a river bassin, Denmark. *Geografisk tidsskrift*, bind, 98: 38-45.
- Boiffin . N J, 1984.** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Paris.
- Bobee B. 1978.** Elément de statistiques. Université du Québec.HM/79/RD/28, 158 p.
- Bobée et Ashkar, 1991.** The gamma family and derived distributions applied in hydrology- water Ressources publications, littleton, colo ,217 p.
- Bobée 1999 .** Estimation des événements extrêmes de crue par l'analyse fréquentielle une revue critique, *la Houille Blanche* (7/8) 100-105.
- Bouanani . A, 2004.** Hydrologie, transport solide et modélisation – Etude de quelques sous bassin versant de la Tafna (NW-Algerie).- Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Tlemcen, 249 p.
- Bou Kheir R, Girard M.C, Khawle M et Abdallah C. 2001** Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 8, n° 4, p. 231-245.
- Bou Kheir R, Girard M.C, Shaban A, Khawle M, Faour G. et Darwish T. 2001** Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, vol. 2, n° 2, p. 79-90.
- Bou Kheir .R 2002.** Étude des risques d'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG. Application è une région représentative du Liban. Paris: Institut national agronomique Paris-Grignon, thèse de doctorat en sciences biologiques fondamentales et appliquées, 262 p.
- Bourouba .M, 1996.** Essai de quantification de l'erosion actuelle a partir des mesures de turbidite en Algerie orientale *ORSTOM* 16:230-250
- Bourouba .M, 1997.** Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bull. ORSTOM*, 17, 345-360.
- Bourouba. M, 1998.** Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux. Cas de l'Oued Logmane et oued Leham dans le bassin de la Hodna. *Revue des Sciences et Technologie*, 9, pp 5-11.
- Boughalem M, M. Mazour, M Zaagane 2012** Utilisation des SIG pour l'aménagement du bassin versant de l'Isser (Nord Ouest de l'Algérie). *Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*, IRD Editions Marseille, 2012, 79-90.
- Bouroche J.M, G. Saporta, 1980.** L'analyse des donn¶ees, Presse Universitaire de France, Paris.
- Borouhaki ESRI 2008** (Environmental Systems Research Institute) AHP-OWA 2.0 – Multicriteria Evaluation. Script Details. URL : <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=14894>.
- Bouzenoune A. 1993.** Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'ouenza (Algérie Orientale) Thèse de doctorat, Université Paris VI, 209.

C

- Campbell, F.B., Bauder ,H. A., 1940.** A rating-curve method for determining silt discharge of streams, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, N° 21, pp 603-607.
- Campy. M et Macaire. J 1989 .** Géologie des formations superficielles. *Géodynamique – faciès – utilisation*. Paris, Masson, 433 p.
- Cardoso A H Neves 1994.** Prévission du transport solide total : évaluation de formules existantes, *La Houille Blanche*, n° 4, 13-21.
- Castany G, 1982 .** Hydrogéologie. Principes et méthodes, Paris, Dunod, 236 p.
- Chaumont. M, 1969.** Les influences des régimes climatiques en France, en Espagne et en Afrique du Nord et leurs conséquences hydrologiques. Service des études scientifiques. Clairbois. Birmandreïs. Alger. 174 p. 24 fig.
- Chaumont. M, et Poquin, 1971.** Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500.000 Alger : Soc Hist Afri-Nord.
- Chakhar .S et Mousseau V 2007.** Spatial multicriteria decision making. *Encyclopedia of geographic information science*, p. 747-753
- Chen Y, Yu J, Khan S 2010** Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling and Software*, 25(12), 1582-1591.

- Chen Y, Yu J, Shahbaz K, Xevi E 2009** A GIS-based sensitivity analysis of multicriteria weights. Communication présentée au 18e congrès du World IMACS/MODSIM, Cairns, Australie.
- Chevenine, A. Popov, Y. Douha, Dj et Benzeroual, M 1989.** Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50.000. Partie 1, texte (1987-1988) O.R.G.M Algérie (Rapport inédit).
- Chibbani .R, Djilli .K, Roose .E, 1999.** Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Bull. ORSTOM, Rés. Eros., 19, pp 85-95.
- Chibbani .R, Belaidi .S, 1997.** Étude de la dynamique du ravinement sur deux couples de ravines expérimentales près de Tlemcen. Bull Réseau Erosion 1997 ; 17 : pp 152-60.
- Cooke R-U., Wanen A., Goudie A-S., 1993 .** Desert Geomorphology. UCL Press, London, 300 p.
- Chow V., Maidement D. et Mays L. 1988.** Applied hydrology. Ed. Mc Graw-Hill
- Corbel . J, 1959.** Vitesse de l'érosion – Z. Geomorph, 3 : 1-28.
- Courault .D and Girard. M.C 1988** Relationships between the composition of the soils and their spectral signatures. 5th Symposium ISSS of working group of Remote Sensing p. 178-185.
- Couvert. B, Lefort. Ph, Peiry. JL, 1994.** La gestion des rivières – transport solide et atterrissements, Guide météorologique, les études des Agences de l'eau, n°65.
- Coutagne A. 1954.** Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. La Houille blanche. p 360 - 369 ., 5 fig.
- Cosandey. CL, Robinson. M, 2001.** Hydrologie continentale. Paris, Armand Colin, Collection U. Géographie, 360 p.
- Crawford, C.G., 1991.** Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended sediment loads. Journal of Hydrology N° 129, pp 331-348.

D

- Daoudi M., Salmon M., Dewitte O., Gérard P., Abdellaoui A., Ozer A., (2009).** Prédiction de l'érosion ravinante en Algérie : vers une nouvelle approche probabiliste à l'aide de données multisources. JAS 09 de l'AUF. P. 7.
- Dai F.C, Lee C.F and Zhang, X.H 2001** GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. Engineering Geology, 61(4), p 257-271.
- David. L 1956.** Etude géologique des monts de la haute Medjerda. Thèse Sci. Paris, Publ, Serv. Carte Géol. Algérie, N.S. Bull, n°11, 304 p.
- Delhoume JP., (1981).** Etudes en milieu méditerranéen semi-aride : ruissellement et érosion en zone montagneuse de Tunisie central (Djebel Semmama). Campagnes 1975 à 1979. Tunis, Ortom/DRE 187p.
- Demmak. A 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Th. Docteur-Ingénieur Univ. Paris, France.
- De Martonne, E. 1948.** Traité de Géographie Physique. Armand Colin, Paris.
- Drobne. S et Lisec. A 2009** Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted linear combination and ordered weighted averaging. Informatica, 33, 459-474.
- Dubreuil. P, 1974.** Initiation à l'analyse hydrologique. Ed. Masson et Cie. 216 p., 35 fig.
- Dubourdieu G. 1956.** Etude géologique de la région de l'Ouenza (Confins Algéro-Tunisiens), Thèse des sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N°10, vol 1, 659 p.
- Duchauffour .P 1970.** Précis de pédologie. Paris: Masson, 481 p.
- Duley. F, Ackerman .F, (1934).** Run off and erosion from plates of different lengths. Journal of agricultural research 48: 505 – 510.
- Dumas .J. 1965** Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol. III, n° 4, p. 307-333.
- Dumas. P 2004.** Caractérisation des littoraux insulaires : approche géographique par télédétection et S.I.G. pour une gestion intégrée, Application en Nouvelle-Calédonie. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Orléans, 402 p.

E

- Eastman J.R, Jin. W, Kyem P.A.K et Toledano J. 1995** Raster procedures for multicriteria/ multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, p 539-547.
- El hage hassan h. Valadas .b et Faour .G 2009** Apports d'une méthode SIG et de la télédétection pour l'étude de la limitation du risque érosif des terres agricoles. Actes du 4ème Congrès Geotunis (Tunis, Tunisie), 16 p.
- El Hage Hassan H, Touchart .L et Faour G 2013** La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban. *M@ppemonde*, n° 109 (2013-1), 17 p. URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num37/articles13104.html>.
- Einstein. H A, 1950.** The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Bulletin 1026. USDA.
- Etchanchu .D, Probst .J L, 1986.** Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau, C.R Acad. SCI. Paris, série II, 30, 17, pp 1063-1068.

F

- FAO 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO, n° 70.
- Ferguson. R I, 1986.** River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research* N° 22, pp 74-76.
- Ferchouche Y. (1998).** Le sol, ressource en voie de disparition. *Revue Symbiose*, 2 : 13 – 14.
- Feodoroff .A ,1965.** Mécanisme de l'érosion par la pluie. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*. Paris (2) vol 7 Fasc 2, 149-163.
- Fiandino .M ,2004.** Apports de matières en suspension par les fleuves cotières à l'étang de Berre (Bouches du Rhone , France) –Etudes de géographie physique, suppl.n°XXXI. Travaux du BVRE, du Mont-Lazère. UMR6012 « Espace » -équipe GVE, Nice.
- Fournier .F, 1960.** Climat et érosion – P.U.F, Paris , 201p.
- Frecault. F, 1971.** La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et la dynamique fluviales en milieu tempéré océanique. Thèse, doct, Brest, Reprod. Univ. Lille III. 840 p., 122 fig., 2 cartes.

G

- Gaussen .H, 1948.** Carte des précipitations de l'Algérie (moyenne 1913- 1947), échelle 1/500.000 , I.G.N Paris 8 p.
- Galevski. M 1955** La corrélation entre les pluies torrentielles et l'intensité de l'érosion. In *École Nationale des Eaux et Forêts, Station de Recherches et d'Expériences forestières*.
- Garcia-Ruiz .j, Lasanta .T, Ruiz-Flano .P, Ortiza .I, White .S, Gonzalez. C et Arti. C 1996** Land use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*, vol. 11, n° 5, p. 267-277.
- Ghachi .A, 1982.** Hydrologie et utilisation de la ressource en eau de la Seybouse. Thèse de 3 ème cycle, Université de Toulouse, 499 p.
- Ghachi .A, 1986.** Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. Thèse. Doctorat. 3e.cycle. Ed. O.P.U. 508 p., 74 fig., 11cartes
- Ghenim .A, 2001.** Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas de oued isser, oued Mouillah et la Haute Tafna. Thèse de magister, université de Tlemcen, Algérie.
- Ghenim A, Terfous. A et Seddini A, 2007** Etude du transport solide en suspension dans les régions semi –aride méditerranéennes : cas du bassin versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest Algérien) *Sécheresse* vol 18 n°1 p 39-44.
- Ghenim A., Seddini A., Terfous A., (2008).** Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). *Hydrology Science Journal*, 53(2) 448-456.

Ghenim .AN, 2008. Etude des écoulements et des transports solides dans les régions semi-arides méditerranéennes. Thèse de Doctorat Université de Tlemcen ; p.134.

Ghorbel. A et Claude. J, 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie : estimation des transports solides. *Erosion and Solid Matte. Transport in Inland Waters.* (Proc.Paris Symp., jully 1977), I.A.H.S. Bull., n°122, 219-232

Girard. C.M 1975 Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère. Paris, Masson, 186 p.

Girard. M.C. et Isavwa. A 1990. L'état de l'art en télédétection sur les zones arides et semi-arides. *Natural & Resources*, vol. 26, n° 1, p. 3-9.

Glysson. G D, 1987. Sediment transport curves. *US Geol. Surv. Open File Rep. N° 87-218*,47 pp.

Glysson. G D, 1989. Sediment transport curves. *US Geol. Surv. Open File Rep. N° 87-218*,47 pp.

Gomer, D. Smati, A., 1991. Quantification et modélisation du débit liquide et solide des micros bassins de l'oued Mina. Colloque érosion. Alger.

Gooke. RU, Waren. A, Goudie .AS, 1993. Desert Geomorphology. Ucl press, London, 300 p.

Graf, W.H. 1971. *Hydraulics of sédiment Transport* : Mc Graw Hill , New York.

Guettouche .M S et Guendouz . M, 1998. L'érosion spécifique en Algérie orientale (cas du Hodna) Essai de Modélisation mathématique Appliquée au Bassin Versant du Ksob. *Bulletin international de l'eau et de l'environnement, (EDIL INF-EAU) – Trimestriel N° 18 Mars 1998.*

Grandmont. K 2013 Utilisation de systèmes d'information géographique pour l'évaluation des risques liés à la dégradation du pergélisol. Étude de cas : Tasiujaq, Nunavik, Québec ,Mémoire pour l'obtention du grade de maîtrise en géographie , Université de Montréal .

H

Haboudane D, Bonn F. et Royer A 2007. Evaluation and predictability of terrain susceptibility to hillslope erosion at the regional scale using DEM-derived indices and remotely sensed information. *Revue de Télédétection*, 7(1-4): 373-391.

Hadley . R F et Schumm.S A, 1961. Sediment sources and drainage basin characterisations in upper Cheyenne River basin –U.S.G.S. Water Supply Paper, 1513- B:137-196. Ahnert 1970.

Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., 2013. Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'oued Mina (Nord Ouest d'Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 26, 1, pp 33-38.

Hallouz .F, 2013. Transport Solide Dans le Bassin d'El Oued Mina et Sédimentation du Barrage S.M.B.A , Thèse de doctorat en sciences de l'école nationale supérieure d'hydraulique.

Hancock. G. R, Lowry. J. B. C, Moliere. D. R and Evans. K. G. 2008. An evaluation of an enhanced soil erosion and landscape evolution model : a case study assessment of the former Nabarlek uranium mine, Northern Territory, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 33, p. 2045-2063.

Hayane. S M, 1983. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen). Thèse Doc. 3e cycle. Univ. Oran. 236 p., 91 fig.

Helsel D R, Hirsch R M. 2002. *Statistical Methods in Water Resources. Chapter A3.* Techniques of water-resources investigations of the united states geological survey. Book 4, Hydrologic analysis and interpretation, 510 p.

Heusch. B ,1970. L'érosion du Pré-Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Ann. Rech.s For. Maroc*, 12, pp9-176.

Heusch .B,1982. Étude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. Recherche bibliographique sur l'Afrique du Nord. Projet RAB/80/04/PNUD.

Higgs G. 2006 Integrating multi-criteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation. *Waste Management and Research*, 24(2), p105-117.

Horton RE. (1993). The infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Géophys. Union*,14: 446- 460.

Horowitz . A J, Elrick.K A et Smith. J J, 2001. Estimating suspended sediment and trace element fluxes in large river basins; methodological considerations as applied to the NASQAN programme – *Hydrological Processes*, 15: 1107-1132.

Horowitz. J A, 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment transport concentration : a matter of temporal resolution. *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop*, April 30 - May 2. 2002. Reno. Nevada.

- Hudson .N 1996** Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface. Bulletin Pédologique de la FAO, vol. 68, 153 p.
- Hug M. 1975.** Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique. Eyrolles. Paris, 1195 p.
- Hussein. H. H, Laurence .C et Laurent .T 2015** Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqouira. Physio-Géo Volume 9.

J

- Jacques G, 1996.** Le cycle de l'eau. ed. Hachette, 157 p.
- Jakuschoff.P1932.** Schwebestoffbewegung in Flüssen in Theorie und Praxis: Inst. für Wasserbau der Technischen Hochschule Berlin, Mitteil., 10,24.
- Jansson. M B, 1996.** Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. Journal of Hydrology 183, pp 227–41.

K

- Kattan. Z, Gac. J L, Probst. J L, 1987.** Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin – Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. J. Hydrol., 92, 59-76.
- Katerine. G, 2013.** Utilisation de systèmes d'information géographique pour l'évaluation des risques liés à la dégradation du pergélisol, étude de cas : Tasiuq, Nunavik Québec, Département Géographie, Université Montréal, p 85.
- Kayser .B 1957.** Problèmes de l'érosion du sol. Annales de Géographie, vol. 66, n° 355, p. 255-257.
- Kédowidé. C.M.G 2010** Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. Vertigo – La revue en sciences de l'environnement, 1-20.
- Kennedy, R.G, 1985,** The prevention of silting in irrigation canals.(including appendix). Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers 119: p. 281-290.
- Khalil. N, 2002.** Démarche méthodologique pour une meilleure connaissance de l'hydrologie et de la géochimie des aquifères de moyenne montagne : cas du haut bassin d'Oum Erbia (Moyen Atlas, Maroc).Th. Doc. Etat. Univ. Cadi Ayad, Marrakech, 196p.
- Khanchoul . K 2006.** Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants de l'extreme Nord-Est algérien. Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba. 278 p.
- Khanchoul . K, Jansson. M B et Lange . Y ,2007.** Comparaison of suspended sediment yield in two catchments, northeast Algeria – Z. Geomorph. (in press).
- Kowalski. W M et Hamimed . M 2000.** Diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien Dilemme du matériel triasique des confins algéro-tunisiens. Bulletin du service géologique de l'Algérie. Vol 11, n°1 pp 29-60, 12 fig, 2000.

L

- Laborde .J P, 1997.** Les différentes étapes d'une cartographie automatique : exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 8, p. 37-46.
- Lahlou, A, 1990.** Modèles de prédiction de la sédimentation des retenues de barrages des pays du grand Maghreb. Atelier int. UNESCO-AISH-ENIT sur l'application des modèles mathématiques à l'évaluation des modifications de la qualité des eaux. Tunis, 312-324.
- Lageat . Y, 2004.** Les milieux physiques continentaux – Ed . Belin, 1 ere édition, 190 p.
- Lamelas M.T, Hoppe A, de la Riva, J, Marinoni O 2009** Modelling environmental variables for geohazards and georesources assessment to support sustainable landuse decisions in Zaragoza (Spain). Geomorphology, 111(1-2), 88-103.
- Lannani. K et Abdouni. L, 2008.** Etude géo-électrique par sondage électrique dans la région de Taoura. Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Annaba, 81p.

- Laouina. A, 1998.** *L'érosion en milieu méditerranéen : une crise environnementale ? Mise au point sur l'érosion des sols à travers l'exemple des versants des collines et des montagnes du nord du Maroc.* Actes du 2ème Cong. Géogr. Africains. Rabat- Agadir, pp. 191-219.
- Laouina A., Nafaa R., Chaker M. (2000).** *Gestion des eaux et des terres et dégradation dans les collines de Ksar el Kébir, Maroc, Bull, Réseau Erosion 19, 18 p.*
- Le Bissonais Y, Singer MJ, (1992).** *Crusting runoff on erosion response to soil water content and successive rainfall.* Soil Science Society of American Journal, 56, 6.
- Leopold .L B et Maddock. T G, 1953.** *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implication, Washington, D.C – U.S.G.S Professional Paper, 225p.*
- Li H, Lee J H W, Cai M. 2003.** *Nutrient load estimation methods for rivers.* International journal of sediment research, 18 (4): 346-351.
- Luneau. G 2006.** *La spatialisation de l'aléa Erosion Des Sols en Nouvelle-Calédonie. Stage de master 2, Université de Toulouse, Toulouse, 75 p.*
- Ludwig, B., 1992,** *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire, Thèse doctorat d'université, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 201 p.*

M

- Martin C. (1975).** *L'érosion des sols sur roches métamorphiques en milieu méditerranéen provençal.* Rev. Géomorphologie. Dynamique 24 : 49 – 63.
- Marinoni O 2004** *Implementation of the Analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS.* Computers & Geosciences, 30(6), 637-646.
- Marinoni. O 2004** *Implementation of the Analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS.* Computers & Geosciences, 30(6), 637-646.
- Masson .J M, 1971.** *L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen, méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ.* Montpellier : Université des Sciences et techniques du languedoc- Montpellier 2, thèse de doctorat, 213 p.
- Mazour, M, 2004.** *Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen”, Thèse de Doctorat D'Etat, Université de Tlemcen, 184, 131 pp.*
- Mebarki . A, 1982.** *Ressources en eau et aménagement en Algérie (Bassin Versant du Kébir Rhumel) – Thèse 3 ème cycle, Université de Nancy, 304 p.*
- Mebarki .A, 1984.** *Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du Kébir-Rhumel, Office des Publications Universitaires, Alger, 302 p).*
- Medinger .G, 1956.** *Hauteurs de pluies en Algérie, moyenne 1913 - 1953 (recueil statistique). S. E.S., Alger. 23p.*
- Medinger.G, 1960.** *Transport solide des Oued Algérien, Annuaire hydrologique de L'Algérie 1950-1959 Mars 1960.*
- Meddi. M, 1992.** *Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Mina (Algérie). Thèse de doctorat Uniq, université Louis Pasteur, Strasbourg, France.*
- Meddi. M, 1994.** *Etude du transport solide à l'échelle de la crue dans le bassin versant de l'Oued Mina, Rev. Algérie Equipment, N° 13 – Mai 1994, ENTP –Alger (Algérie) pp : 24-31*
- Meddi .M, 1999.** *Etude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie)-Z. Geomorph N.F, 43 (2), 167-183.*
- Meddi .M, 2004.** *Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien), Sécheresse, 15 (4) : 367-373.*
- Meddi M et Hallouz F 2012,** *Estimation Du Debit Solide Journalier Dans Le Bassin Versant De L'oued Mina Sur L'oued Cheliff (Nord Ouest D'algerie) .Rev , Conference paper octobre 2014 (Research Gate).*
- Megnounif. A, Bouanani .A, Terfous .A et Baba Hamed .K, 1999.** *Distributions statistiques de la pluviométrie et mise en évidence de l'influence du relief (cas des monts de Tlemcen, Nord ouest algérien). Rev. Sci & Tech n°12. pp. 77 - 80. 6 fig.*

- Megnounif. A, Terfous. A et Bouanani . A, 2003.** Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau* 16(3) : 369-380.
- Meguenni. K, Remini. B, 2008.** Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza (Algérie). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp 7-19.
- Merzouki . T, 1992.** Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. *Rev. Marocaine du génie civil*, 38 : 46-50.
- Merzouki . T, 1992.** Diagnostic de l'envasement des grands barrages marocains. *Rev. Marocaine du génie civil*, 38 : 46-50.
- Meyer. L D, 1965.** Mathematical relationships governing soil erosion by water. *Journal of soil and water conservation* 20 : 149-50.
- Meyer, L.D., Mannering, J.V., 1971** the influence of vegetation and vegetative mulches soil erosion. In: biological effects in the hydrological cycle. *Proceedings, Third International Seminar for Hydrology*. Purdue University, West Lafayette, Indiana. p. 355-366.
- Miller.C R, 1951.** Analysis of flow-duration sediment-rating curve method of computing sediment yield. *US Bureau of Reclamation Report*. Denver. CO.
- Miller V.C., 1953.** A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics on the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Proj. NR 389-9042, Tech Rep 3, Columbia University, Department of Geology, ONR, New York
- Milliman J D, Meade R H,1983.** World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology* N° 91, pp 1-21.
- Mimikou M. 1982.** An investigation of suspended sediment rating curves in western and northern Greece. *Journal des sciences hydrologique*, 27 (3-9): 369-383.
- Moatar F, Meybeck M, Raymond S, Coyne A, Ludwig W, Mano V, Néméry J, Poirel A, Etcheber H, Crouzet Ph. 2007.** Evaluation des flux de MES à partir des suivis discrets: méthodes de calcul et incertitudes. SHF: transport solide et gestion des sédiments en milieu naturels et urbains. Lyon, 28-29 novembre 2007, 8 p.
- Moukhchane . M, Bouhlassa . S, et Bouaddi . K, 1998.** Quantification de l'érosion des sols du bassin versant El Hachef, par le biais du césium-137, (région de Tanger – Maroc). *Bull. OROSTOM*, 18 : 106 – 118.
- Morsli. B, M. Mazour, N. Mededjel, E. Roose 2004 .**Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie", *Sécheresse*, vol. 15, no 1, 96-104.
- Mutcher C., Greer J., (1980).** Effect of slope length on erosion from low slopes. *Trans, ASAE* 23, 866 – 869.
- Musy, A., Higy, C., 1998.** *Hydrologie Appliquée*. EPF Lausanne.
- Musy, A , (2001).** *Hydrologie générale* Edit : Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne 330 p.
- Musy A., 2005.** *Cours d'hydrologie générale*. Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne (Suisse).

N

- Naulet .R 2002.** Utilisation de l'information des crues historiques pour une meilleure prédétermination du risque d'inondation Application au bassin de l'Ardèche Ph. D. dissertation, université J. Fourier Grenoble, INRS- Eau Québec, Cemogref ,Lyon ,322 p.
- Noni G, Viennot A, Trujillo G, (1997).** L'homme, la montagne et l'érosion des sols dans les Au des d'équateur. *ORSTOM*, Paris, 340p.

O

- Othmanine, A 1987.** Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fosse de Tébessa-Morsott (Agérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 221p.

P

- PAP/RAC 2004** - Improving coastal land degradation. Monitoring in Lebanon and Syria. Country report: Syria. ONU, Priority Actions Programme, Projet LIFE TCY/00/INT/00069/MED, Split (Croatie), VIII + 154 p.
- Perthuisot. V et Rouvier. H 1992.** Les diapirs du Magreb central et oriental : des appareils variés, résultats d'une évolution structurales et pétrogénétique complexe : Bulletin société géologique France. V.163 pp. 751-760 (English abs).
- Probst, J.L., Bazerbachi, A., 1986.** Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol. Bull., 39, 1, 79-98.
- Probst. J L, Bazerbach .A, 1989.** Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol. Bull., 39, 1, pp 79-98.
- Probst .J L, 1992 .** Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. Sci. Géol. Bull., mémoire n° 94, 161-162 p.
- Probst. J L, Amiotte Suchet .P, 1992.** Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Hydrol. Sci. J., 37, 621- 637.
- Pihan J. 1978.** Annuaire des valeurs mensuelles de l'indice d'érosivité R de Wischmeier relatives aux stations officielles de la Météorologie Nationale Française. INRA, Rennes et UER Géographie Université de Haute-Bretagne, 112 p.
- Poesen. J et Hooke .J 1997** Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of Southern Europe. Progress in Physical Geography, vol. 21, n° 2, p. 157-199.

R

- Rais.M et Abidi. M 1989.** Prévission du transport solide sur un bassin versant. Application à l'envasement d'une retenue. La Houille Blanche. Numéro 3-4, Juin 1989, pp. 296 – 300.
- Rakotomalala R. 2009.** Pratique de la régression linéaire multiple : diagnostic et sélection de variables. Université Lumière Lyon 2, version du 20 sep 2009. 109 p.
- Remenieras. G, 1980.** L'hydrologie de l'ingénieur. Edit : Collection de la direction des études et recherche d'électricité. France, 266 p.
- Remini. B 2000,** L'envasement des barrages en Bull Réseau érosion, vol. 20, p 165-171.
- Renard K.G, Foster G.R, Weesies G.A, McCool D.K, Yoder D.C. (Eds) 1997.** Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planing with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agr. Handbook, Washington (DC): USDA/US Government Printing Office, 407 p.
- Reusing. M, Schneider. T et Ammer. U 2000.** Modelling soil loss rates in the Ethiopian Highlands by integration of high resolution MOMS-02/D2-stereo-data in a GIS. International Journal of remote sensing, 21(9): 1885-1896.
- Ricard J, 1973 :** Etude des ressources en eau souterraines du sud de la willaya d'Annaba. Direction de l'hydraulique de la willaya de Tébessa. 72 P.
- Ricard J, 1974 :** programme spécial Tébessa. Rapport interne. Direction de l'hydraulique de la willaya de Tébessa. 74 P.
- Ricard J, 1974 :** Esquisse de synthèse géophysique, géologique de la région de Tébessa. Rapport interne. Direction de l'hydraulique de la willaya de Tébessa. 23 P.
- Ricard J, 1975:** Inventaire des points d'eaux (puits, sources, forages) du système aquifère Tébessa – Morsott. Direction de l'hydraulique de la willaya de Tébessa. 15 P.
- Roche, M., 1963.** Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars. 430 p. 204 fig.
- Roose E. (1967).** Dix années de mesure du ruissellement et de l'érosion à séfa au Sénégal. Agron. Trop. 22,2: 123 -152.
- Roose E. 1973.** Dix-sept ans de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferralitique sableux de basse cote d'Ivoire. ORSTOM, Abidjan, 12 p. Thèse Doc . Ing. Fac.Sci. Abidjan, n° 20.
- Roose É 1977** Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Édité. ORSTOM, collection "Travaux et documents", Paris, 108 p.

Roose E. 1980. *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières naturelles ou cultivées.* Thèse Doct. Es Sciences, Université d'Orléans, 587 p.in : Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, n° 130, 569 p.

Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazoui M., Morsli B., (1993). *Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne Algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification sur la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes (1984-1995), sur un réseau de 50 parcelles d'érosion.* Cahiers ORSTOM, série pédologie, (28)(2) : 289-308.

Roose É 1994 *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES).* Bulletin pédologique de la FAO, vol. 70, Rome (Italie), 420 p.

Roose. E, M. Arabi, K. Brahamia, R. Chebbani, M. Mazour, B. Morsli 1996 .*Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne", Ch. Orstom, Seri. Pédol., vol XXXVIII, no 2, 289-307.*

Roose E., Bourouga L., Chebbani R. 2001. *Le ravinement en Algérie : Typologie. Facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation.* Sécheresse, 11,4 :3 17-326.

Rouet. I 2009 . *Caractérisation et éléments de quantification d'aléas naturels liés à l'évolution des versants dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie.* Thèse de doctorat, Université de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa, 218 p.

Ruiz Figueroa. J F, 1983. *Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulées sur des sols ferrallitiques de savane (Centre Nord de la Côte d'Ivoire. Comportement hydrodynamique et mécanique de ces pellicules de battance en relation avec la texture, la couverture du sol et la levée du riz pluvial.* Thèse Paris.

S

Saaty. T.L 1977 *A scaling method for priorities in hierarchical structures.* *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.

Saaty T.L. 1984 *Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision (traduit par Lionel Dahan).* Paris : *Entreprise Moderne d'Édition.*

Saaty T. L 1991 *Método de Análise Hierárquica.* São Paulo, McGraw-Hill, Makron. 367p.

Saaty. T.L et Vargas. L.G 1991 *Prediction, projection, and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games and sports.* Boston : *Kluwer Academic Publishers.*

Saaty T.L. et Sodenkamp M. 2010 *The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes : The measurement of intangibles.* Dans C. Zopounidis et P.M. Pardalos (dir.) *Handbook of Multicriteria Analysis* (p. 91-166), Berlin; Heidelberg : *Springer-Verlag.*

Seltzer, P., 1946. *Le climat de l'Algérie.* Impr. « La Typo-litho » & J. Carbonel, 219

Seltzer.P (1913-1938). *La carte pluviométrique de l'Algérie (moyenne 1913-1938), Bull Soc , Hist, Nat, Afr Nord, 28 (3), 172-184.*

Simonovic SP , 2009 *Managing Water Resources: Methods and Tools for a Systems Approach.* *Studies & Reports in Hydrology.*

Simonton JR., Toy TJ., 1994. *The relation between surface rock fragment cover and semi-arid hillslope profile morphology.* *Catena* 23 : 213 – 225.

Snoussi .M , Jouanneau .J.M, Latouche . C, 1990. *Flux de Matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebou et du Souss, Maroc). Importance dans le bilan global des apports d'origine continentale parvenant à l'Océan Mondial.* *J. Afric. Earth Sci.* 11, 43-54.

Straub, L.G., 1937. *Report of committee on dynamics of streams, 1936–37.* *Eos, Transactions American Geophysical Union.* 18(2): p. 329-342

Sogreah, 1969. *Etude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie.* *Sogetha-sogreah.* 11 volumes Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire. Alger

Sogreah ,1983. *Érosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique. Rapport du projet RAB/80/011/PNUD.*

Spiegel .M R, 1989. *Probabilité et statistiques- Cours et problèmes Série Schaum, Mac Graw Hill.* Paris, 385 p.

Song, Y, Yan. P et Liu. L 2006. A review of the research on complex erosion by wind and water. *J. Geographical Sciences*, 16(2): 231-241.

Store R. et J. Kangas 2001 Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, 55(2), p 79-93.

T

Taïbi. R, 2000. Essai de régionalisation des débits des cours d'eau de l'Algérie du Nord. Holding Public de l'eau, Alger. 15 p. 15 fig., 3 cartes.

Talbi. O, A. Mendas, A. BENSALD, M. A. TRACHE 2002. Mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi et la quantification de l'érosion hydrique: application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen)”, *Sécheresse*, vol. 13, no 3, 175-179. Thiessen

Tixeront .J, Barkaloff. H, 1958. L'évaluation de l'érosion en Tunisie. C/R de l'assemblée de L'AIHS de Toronto 1957-1958.

Tixeront J ,1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In : *IAHS Publ*, 53 : pp 26-42.

Terfous. A, Meghnounif. A, Bouanani. A, 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14 : pp 173-185.

Tixeront. J, 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In *IAHS Publ.*, 53 : 26-42.

Terfous A, Bouanani A, Megnounif A. 1999. Evaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser (N-O Algérien), 2eme séminaire maghrébin sur l'eau. Tizi ousou, 28-29 Juin 1999.

Touaibia. B, 2000. Erosion - Transport solide – Envasement de barrage. Cas du bassin versant de la Mina dans la wilaya de Relizane. Thèse de Doctorat d'Etat en aménagement hydraulique. Institut National Agronomique. Alger.

Terfous. A, Meghnounif. A, Bouanani. A, 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14 : pp 173-185.

Touaibia. B, 2000. Erosion - Transport solide – Envasement de barrage. Cas du bassin versant de la Mina dans la wilaya de Relizane. Thèse de Doctorat d'Etat en aménagement hydraulique. Institut National Agronomique. Alger.

Tourki.M 2010. Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'oued Kébir Est Nord- Est Algérien .magister Hydraulique, université Annaba p 137.

Terfous. A, Meghnounif. A, Bouanani. A, 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14 : pp 173-185.

Tebbi .F Z, 2015. Modélisation de la Régularisation des Barrages Dans La Région des Aurès. Thèse de doctorat en sciences, Université Hadj Lakhdar Batna.

Tidiane.O, Dubois. J .M. M. et Hugh. Q 2003. MEH-SAFER : Un nouveau modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie à partir d'images multisources et de données auxiliaires. *Télétection*, vol. 3., n° 2-3-4, p. 151-163.

Tudes S et N.D Yigiter 2010 Preparation of land use planning model using GIS based on AHP: case study Adana-Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(2), 235-245.

V

Valentin .C, 1981. Organisations pelliculaires superficielle de quelques sols de région du désertique Agadez (Rep du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Thèse Paris, 213 p. annexes.

Vanoni. VA, 1977. Erosion rates from sediment sources. In *Engineering sedimentation*, Manual ASCE. New York, pp 472- 480.

Verhoff .F H, Melfi .D A et Yaksich .S M, 1980. River Nutrient and Chemical Transport Estimation. *Journal of the Environmental Engineering Division*, Vol. 106, No. 3, May/June 1980, pp 591-608.

Vila. J.M et Charrière. A 1993. Découvert d'Albien calcaire et du trias résédimenté au Dj Boujaber (partie ouest Algérie) ; corrélation avec les forages et conséquences sur l'organisation du crétacé inférieur des confins algéro-tunisiens. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Paris*, t. 316, série II, pp 243-249.

W

- Walling. D E ,1984.** *The sediment yields of African rivers. I.A.H.S. Publ., Harare Symp., 144, pp 265-283.*
- Wishcmeier.W H, 1959.** *Arainfall erosion index for an universal soil loss equation –Soil Sci. Soc. America Journ, 23(8) : 246-249.*
- Wischmeierer .W H , Smith .DD, 1958.** *Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. A.G.U., 39, 285-291.*
- Wischmeier. W H, Johnson . C B et Cross. B U, 1971.** *A soil erodibility normograph for farmland and construction sites – J. Soil and Water Conservation, 26 (5): 189-192.*
- Wischmeier W.H. et Smith D.D 1978** *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Édité. US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, vol. 537, 58 p.*
- Wischmeier. W H et Smith . D D,1960.** *An universal soil – loss equation to guide conservation fram planning – Trans. 7th. Int Cong. Soil . Sci, Madison, Wisco, 1: 418-425.*
- Walling. D E, Webb. D W, 1981.** *The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence Symposium, June 1981) IAHS Publ. No. 133.*
- Megnounif. A, Bouanani .A, Terfous .A et Baba Hamed K., 1999.** *Distributions statistiques de la pluviométrie et mise en évidence de l'influence du relief (cas des monts de Tlemcen, Nord ouest algérien). Rev. Sci & Tech n°12. pp. 77 - 80. 6 fig.*
- Walling. D E, 1977.** *Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. Water Resources Res. N° 13, pp 531-538.*
- Weisberg S. 2005.** *Applied linear regression. University of Minnesota. School of statistics, Minneapolis, Minnesota. Wiley interscience, 310 p.*
- Walling. D E, Webb. D W, 1981.** *The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence Symposium, June 1981) IAHS Publ. No. 133.*
- Webb B W, Phillips J M, Walling D E, Littlewood I G, Watts C D, Leeks G J L.1997.** *Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS(R) programme. The science of total environment. Journal of hydrology, 194/195: 379-389.*
- Williams J.R et Berndt H.D 1977** *Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions oh the ASAE, vol. 20, p. 1100-1104.*
- Wood. P A, 1977.** *Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England. Sedimentology, 24, pp 437-445.*
- Walling. D E, Webb. D W, 1981.** *The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence Symposium, June 1981) IAHS Publ. No. 133.*
- Walling. D E, Webb. B W, 1982.** *Sediment Availability and Prediction of Stormperiod Sediment Yields, vol .137. IAHS Publication, pp. 327–337.*

Y

- Yue-Qing .X , Jian. P and Xiao-mei .S 2009.** *Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS : a case study of the Maotiao River waterched, Guizhou Province, China. Erosion Geology, vol. 56, p. 1643-1652.*
- Yuksel. A, Gundogan. R et Akay A.E 2008.** *Using the Remote Sensing and GIS Technology for Erosion Risk Mapping of Kartalkaya Dam Watershed in Kahramanmaras, Turkey. Sensors, 8(8): 4851-4865.*

Z

- Zavoianu 1985.** *Morphometry of drainage basins- Devlopments in water Science, 20, Elsevier, Amsterdam 238 p.*
- Zavoianu 1978** *Development in water Science, 20 Morphometry of Dranage Bassins, Institut of Geography, Bucharest Romania p181.*
- Zingg . A W,1940.** *Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff – Agricultural Engineering, 21 : 59-64.*

Annexes

Annexe n° 1 : Caractéristiques de forme des unités hydrologiques de la Medjerda.

Tabl n° 1

Bassins	Superficie (km²)	Périmètre (Km)	Kc	Longueur (Km)	Largeur (Km)
Medjerda (Souk Ahras)	1519	231	1.65	102.5	14.8
Melegue Amont	1513	227	1.63	90.7	16.7
Melegue Aval	1393	206	1.54	85.5	16.3
Chabro	1567	218	1.56	92.5	16.9
Meskiana	1878	251	1.62	106.5	17.6

Les valeurs de l'indice de compacité des différents bassins versants d'oued Medjerda sont très rapprochées *Tabl n° 1* montrent que ces bassins sont moins compactes avec une forme allongé d'où le (**Kc**) supérieur de 1.50.

Annexe n° 2a: Caractéristiques topographiques du bassin versant de Medjerda (Souk Ahras)

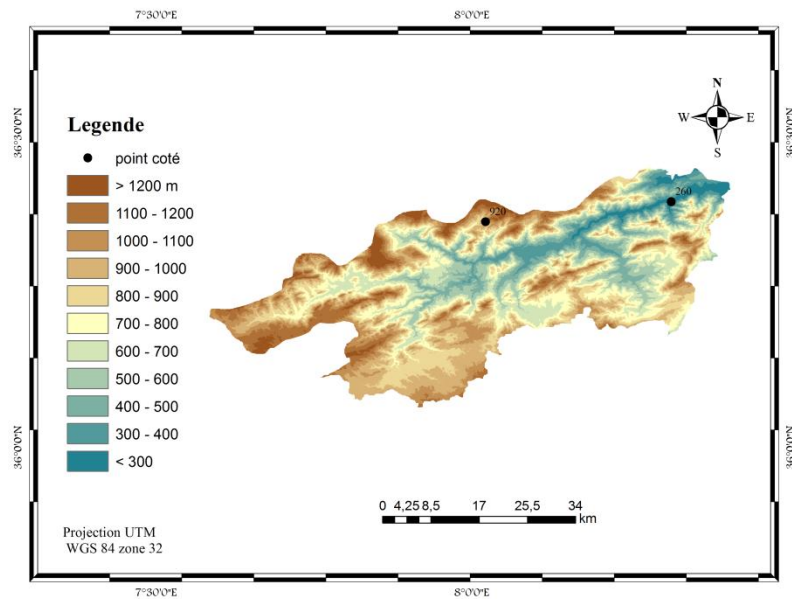


Fig n° : Carte hypsométrique du BV de la Medjerda

Tabl n°2 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Medjerda (Souk Ahras)

Tranches d'altitudes (m)	Alt moyenne	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	Dénivelé (m)
Sup 1200	1243.5	137.03	137.03	9.02	9.02	87
1200-1100	1150	187.79	354.82	12.36	21.38	100
1100-1000	1050	26.73	351.55	1.76	23.14	100
1000-900	950	98.11	449.66	6.46	29.6	100
900-800	850	165.03	614.69	10.86	40.46	100
800-700	750	247.3	861.99	16.28	56.74	100
700-600	650	234.37	1096.36	15.43	72.17	100
600-500	550	207.11	1303.47	13.63	85.8	100
500-400	450	117.36	1420.83	7.72	93.52	100
400-300	350	56.17	1477	3.70	97.22	100
Inf 300	257.5	42.21	1519.21	2.78	99.99	85

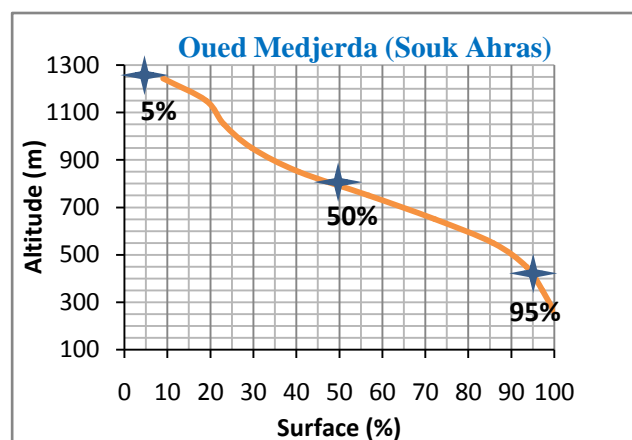


Fig n° : Courbe hypsométrique du BV de la Medjerda

Annexe n° 2b : Caractéristiques topographiques du bassin versant de Mellegue Amont.

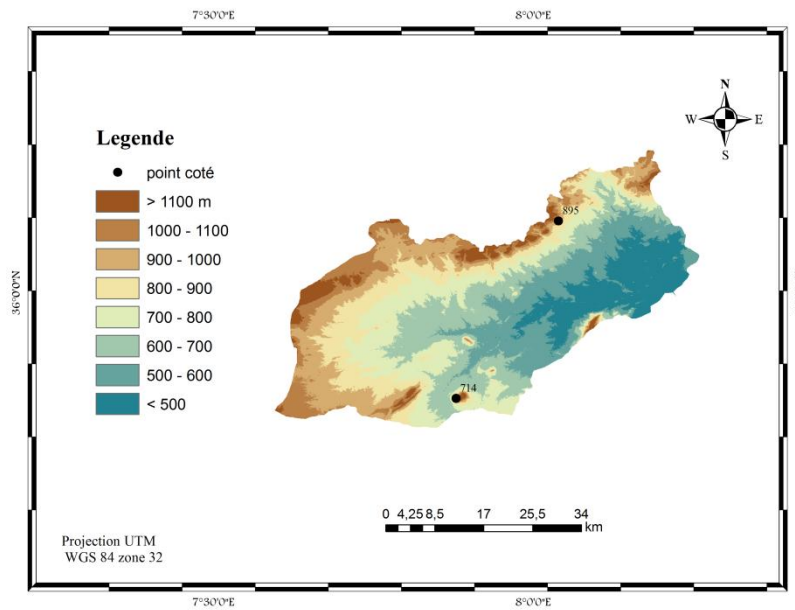


Fig n° : Carte hypsométrique du BV de Mellegue Amont

Tabl n°3 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Mellegue Amont

Tranches d'altitudes (m)	Alt moyenne	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	Dénivelé (m)
Sup 1100	1139	188.04	188.04	12.43	12.43	78
1100-1000	1050	235.47	423.51	15.57	27.99	100
1000-900	950	258.4	681.91	17.08	45.08	100
900-800	850	256.37	938.28	16.95	62.02	100
800-700	750	190.8	1129.08	12.61	74.64	100
700-600	650	204.33	1333.41	13.51	88.14	100
600-500	550	127.84	1461.25	8.45	96.59	100
Inf 500	473.5	51.51	1512.76	3.40	99.99	53

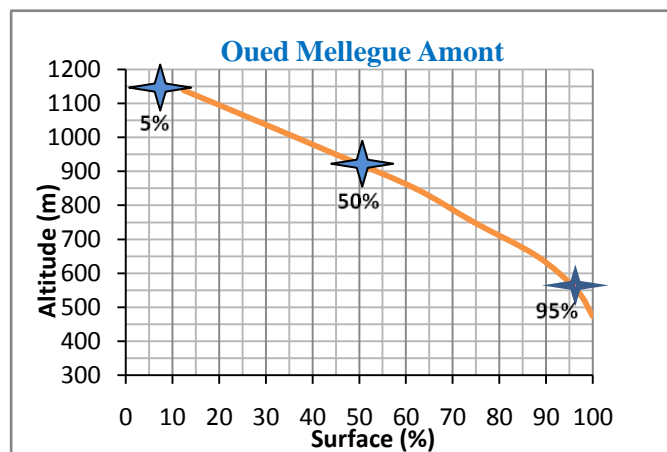


Fig n° : Courbe hypsométrique du BV de Mellegue Amont

Annexe n° 2c : Caractéristiques topographiques du bassin versant de Meskiana.

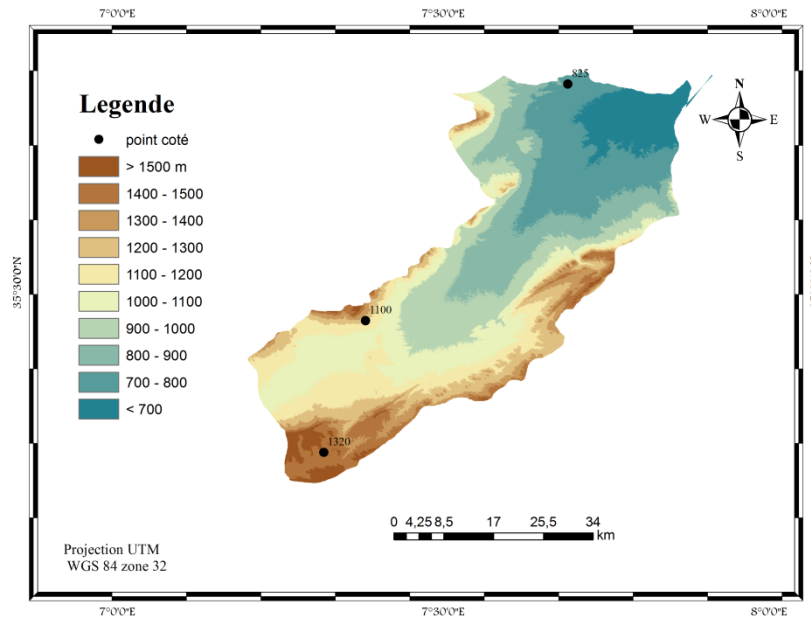


Fig n° : Carte hypsométrique du BV de Meskiana

Tabl n°4 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Meskiana

Tranches d'altitudes (m)	Alt moyenne	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	Dénivelé (m)
Sup 1500	1545.5	134.21	134.21	7.15	7.15	91
1500-1400	1450	273.67	407.88	14.57	21.72	100
1400-1300	1350	265.05	672.93	14.11	35.83	100
1300-1200	1250	275.8	948.73	14.68	50.52	100
1200-1100	1150	302.11	1250.84	16.09	66.60	100
1100-1000	1050	223.81	1474.65	11.92	78.52	100
1000-900	950	149.70	1624.35	7.97	86.49	100
900-800	850	98.67	1723.02	5.25	91.75	100
800-700	750	109.41	1832.43	5.82	97.57	100
Inf 700	667.5	45.51	1878	2.42	99.99	65

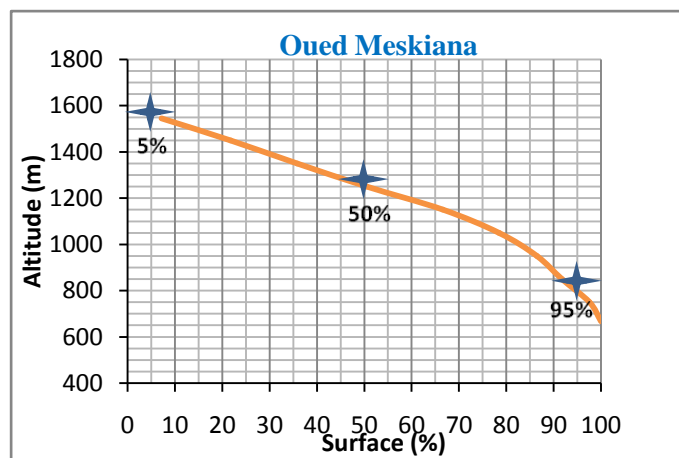


Fig n° : Courbe hypsométrique du BV de Meskiana

Annexe n° 2d : Caractéristiques topographiques du bassin versant de Chabro (Tébessa).

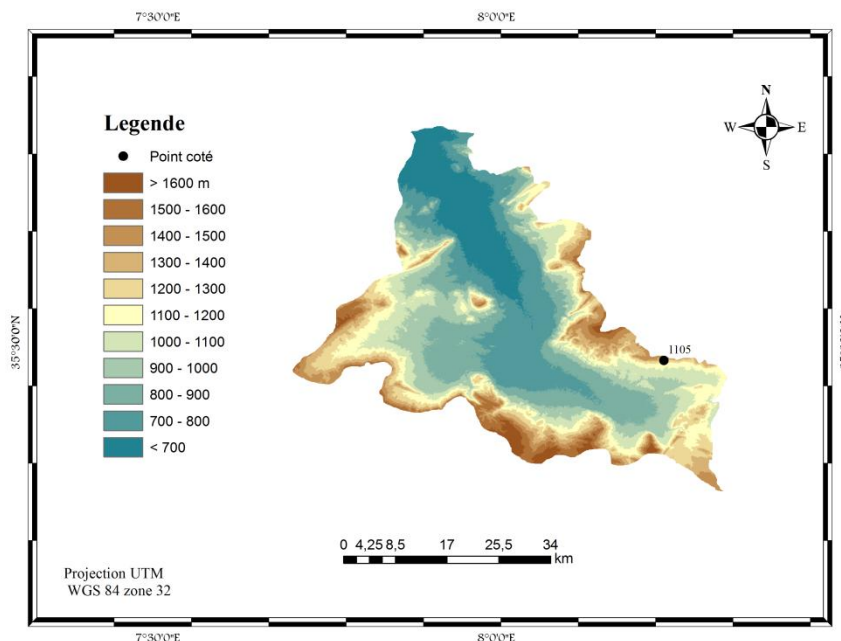


Fig n° : Carte hypsométrique du BV de Chabro (Tébessa)

Tabl n°5 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Chabro (Tébessa)

Tranches d'altitudes (m)	Alt moyenne	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulés	Dénivelé (m)
Sup 1600	1618.5	179.87	179.87	11.48	11.48	37
1600-1500	1550	247.88	427.75	15.82	27.30	100
1500-1400	1450	234.4	662.15	14.95	42.25	100
1400-1300	1350	189.72	851.87	12.11	54.36	100
1300-1200	1250	178.94	1030.81	11.42	65.78	100
1200-1100	1150	149.61	1180.42	9.55	75.33	100
1100-1000	1050	127.24	1307.66	8.12	83.45	100
1000-900	950	97.8	1405.46	6.24	89.69	100
900-800	850	79.3	1484.76	5.06	94.75	100
800-700	750	53.89	1538.65	3.44	98.19	100
Inf 700	669	28.32	1567	1.81	99.99	62

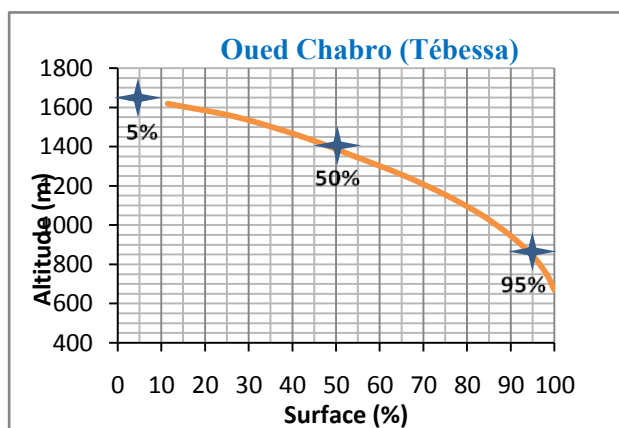


Fig n° : Courbe hypsométrique du BV de Chabro (Tébessa)

Annexe n° 2e : Caractéristiques topographiques du bassin versant de Mellegue Aval.

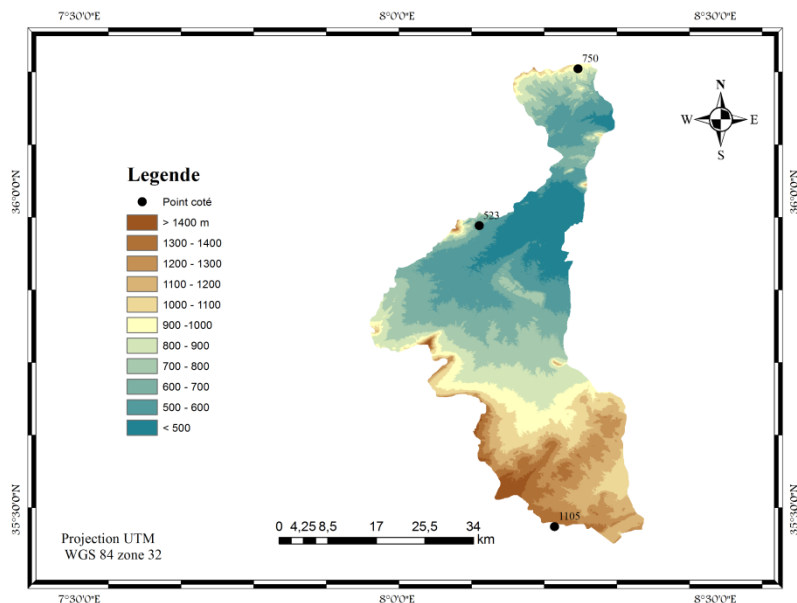


Fig n° : Carte hypsométrique du BV de Mellegue Aval

Tabl n° 6 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Mellegue Aval

Tranches d'altitudes (m)	Alt moyenne	Ai (Km²)	Ai cumulées (Km²)	Ai %	% Ai cumulés	Dénivelé (m)
Sup 1400	1433.5	149.85	149.85	10.76	10.76	67
1400-1300	1350	215.84	365.69	15.49	26.25	100
1300-1200	1250	203.77	569.46	14.63	40.88	100
1200-1100	1150	165.82	735.28	11.90	52.78	100
1100-1000	1050	131.26	866.54	9.42	62.20	100
1000-900	950	97.71	964.25	7.01	69.22	100
900-800	850	104.73	1068.98	7.52	76.74	100
800-700	750	123.85	1192.83	8.89	85.63	100
700-600	650	112.53	1305.36	8.08	93.71	100
600-500	550	67.10	1372.46	4.82	98.52	100
Inf 500	457.5	20.50	1392.96	1.48	99.99	85

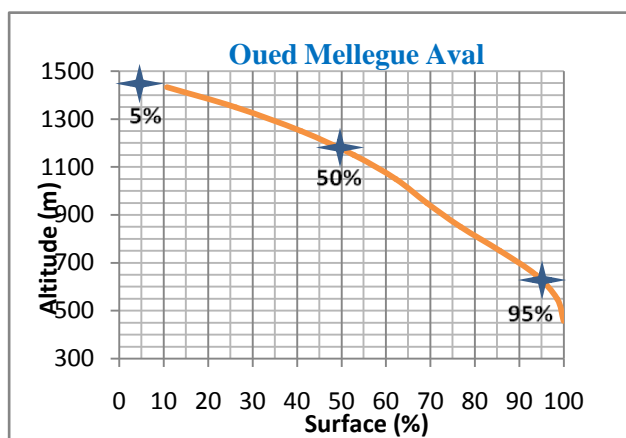


Fig n° : Courbe hypsométrique du BV de Mellegue Aval

Annexe n° 3 : Altitudes caractéristiques des bassins versant de la Medjerda.

Tabl n° 7 : Altitudes caractéristiques des sous bassins de la Medjerda

Bassins	H max	Hmin	Hmoy	H 5%	H 50%	H 95%
Medjerda (Souk Ahras)	1287	215	778.67	1250	800	410
Mellegue amont	1178	447	856.34	1150	925	575
Meskiana	1591	635	1186.24	1550	1250	800
Chabro (Tébessa)	1637	638	1289.31	1650	1400	850
Mellegue Aval	1467	415	1041.16	1450	1175	625

H max : Altitude maximal (m).

H min : Altitude minimal (m).

H moy : Altitude moyenne (m)

H 5% : Altitude à 5%.

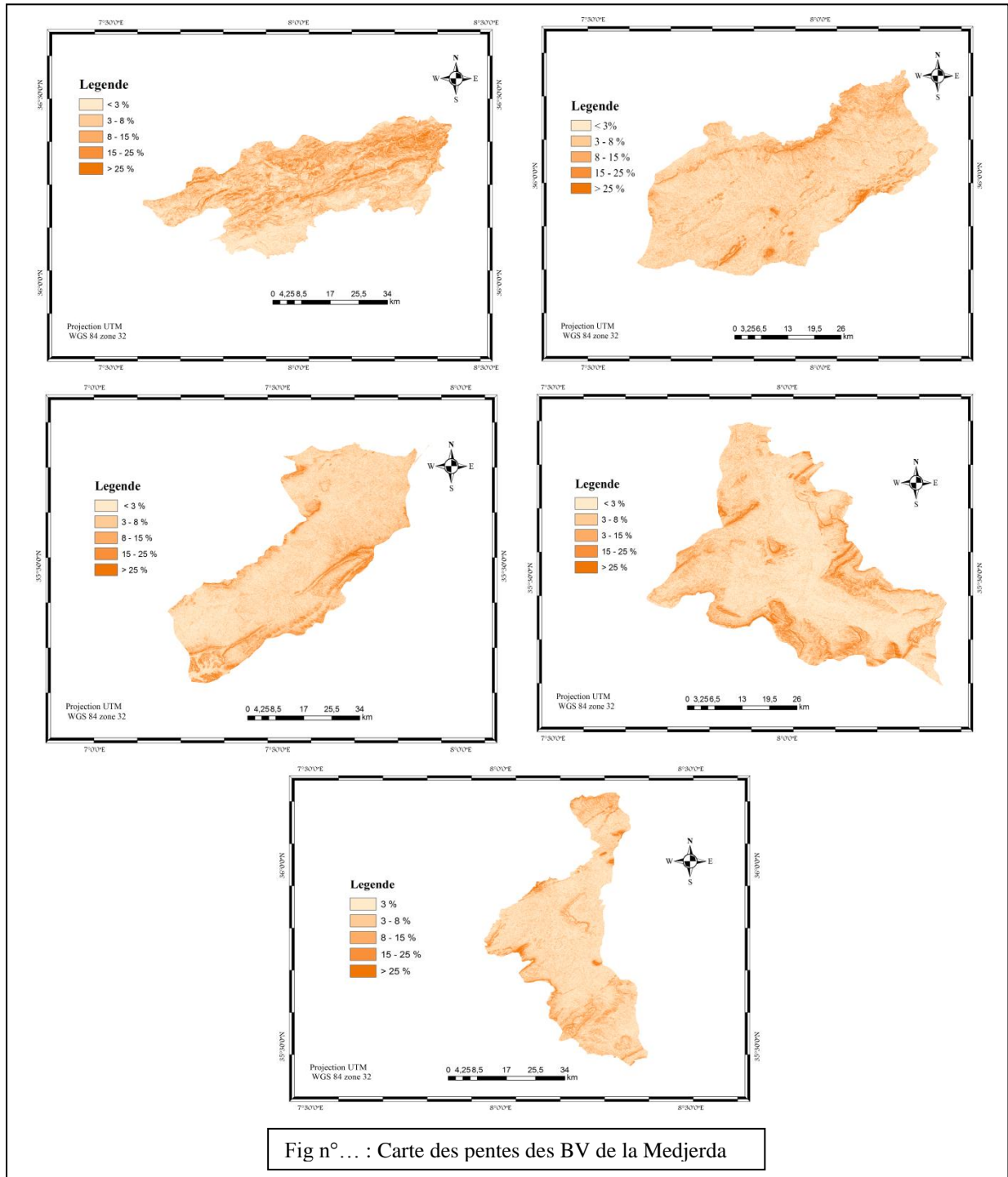
H 50% : Altitude à 50%.

H 95% : Altitude à 95%.

Annexe n° 4 : Carte et indices de Pentés.

Tabl n° 8 : Les indices de pentés et reliefs des sous bassins de la Medjerda

Bassins	Ip	Ig	Relief selon Ig	Ds	Relief selon Ds
Medjerda (Souk Ahras)	0.97	8.15	assez faible	319.25	fort
Mellegue amont	0.75	6.33	assez faible	246.58	assez fort
Meskiana	0.92	7.05	assez faible	305.52	fort
Chabro (Tébessa)	0.99	8.64	assez faible	342.02	fort
Mellegue Aval	1.08	9.65	assez faible	360.17	fort



Annexe n° 8 : Caractéristiques morphométrique.

Tabl n=° : *Caractéristiques morpho métriques des sous Bassin de la Medjerda*

Bassins	Dd	Rc	Rl	Tc	Ct
Medjerda (Souk Ahras)	1.46	5.23	2.45	16.85	8.24
Mellegue amont	1.37	4.92	2.23	15.34	7.76
Meskiana	1.13	5.25	2.20	13.79	5.22
Chabro (Tébessa)	1.62	5.76	2.46	11.31	8.19
Mellegue Aval	1.48	5.23	2.11	8.69	7.29

Dd : *densité de drainage (km/km²).*

Rc : *rapport de confluence.*

Rl : *rapport de longueur.*

Tc : *temps de concentration (heurs).*

Ct : *coefficient de torrentialité.*

Annexe n° 7 : Réseau hydrographique des différents sous bassin versant de la Medjerda.

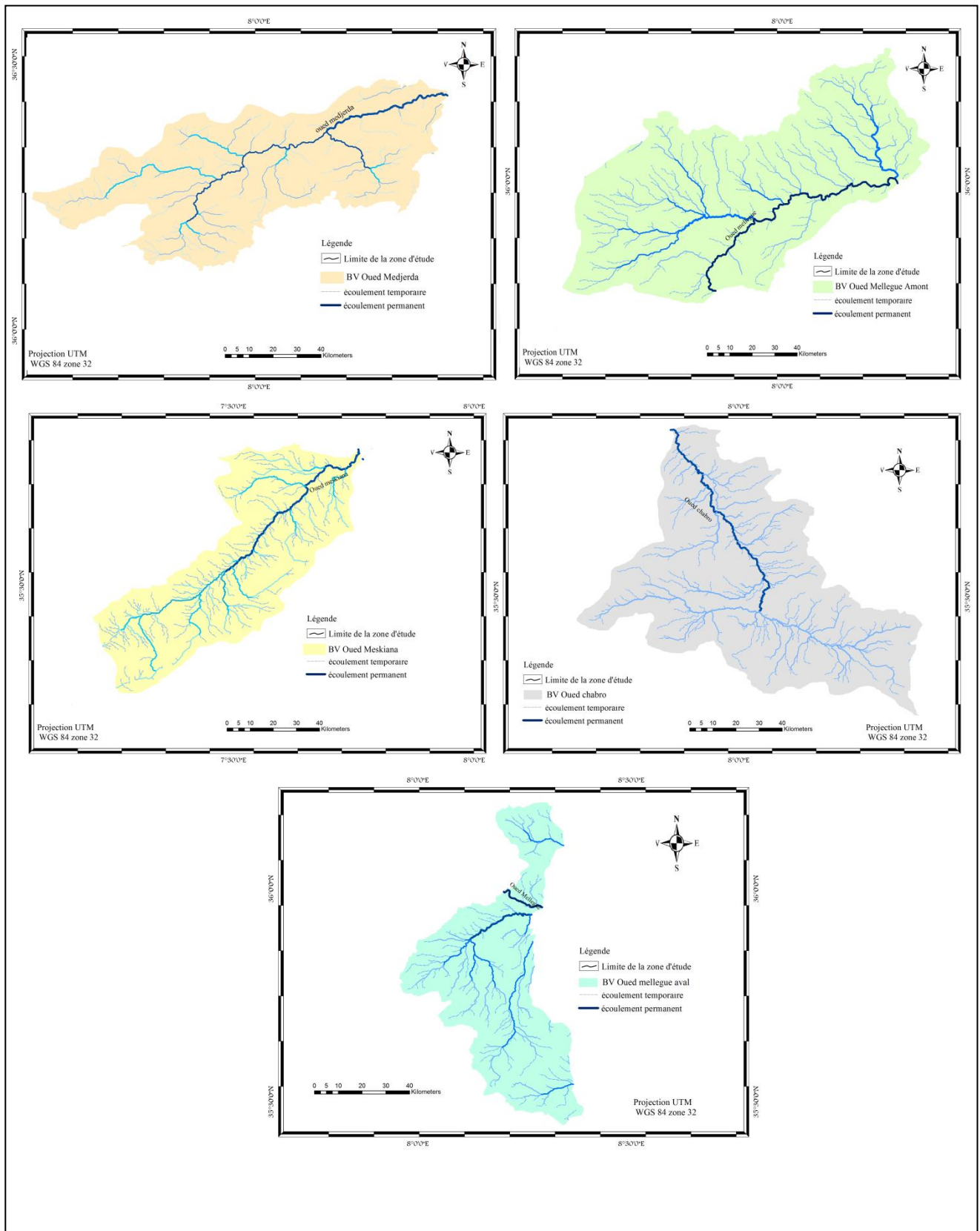
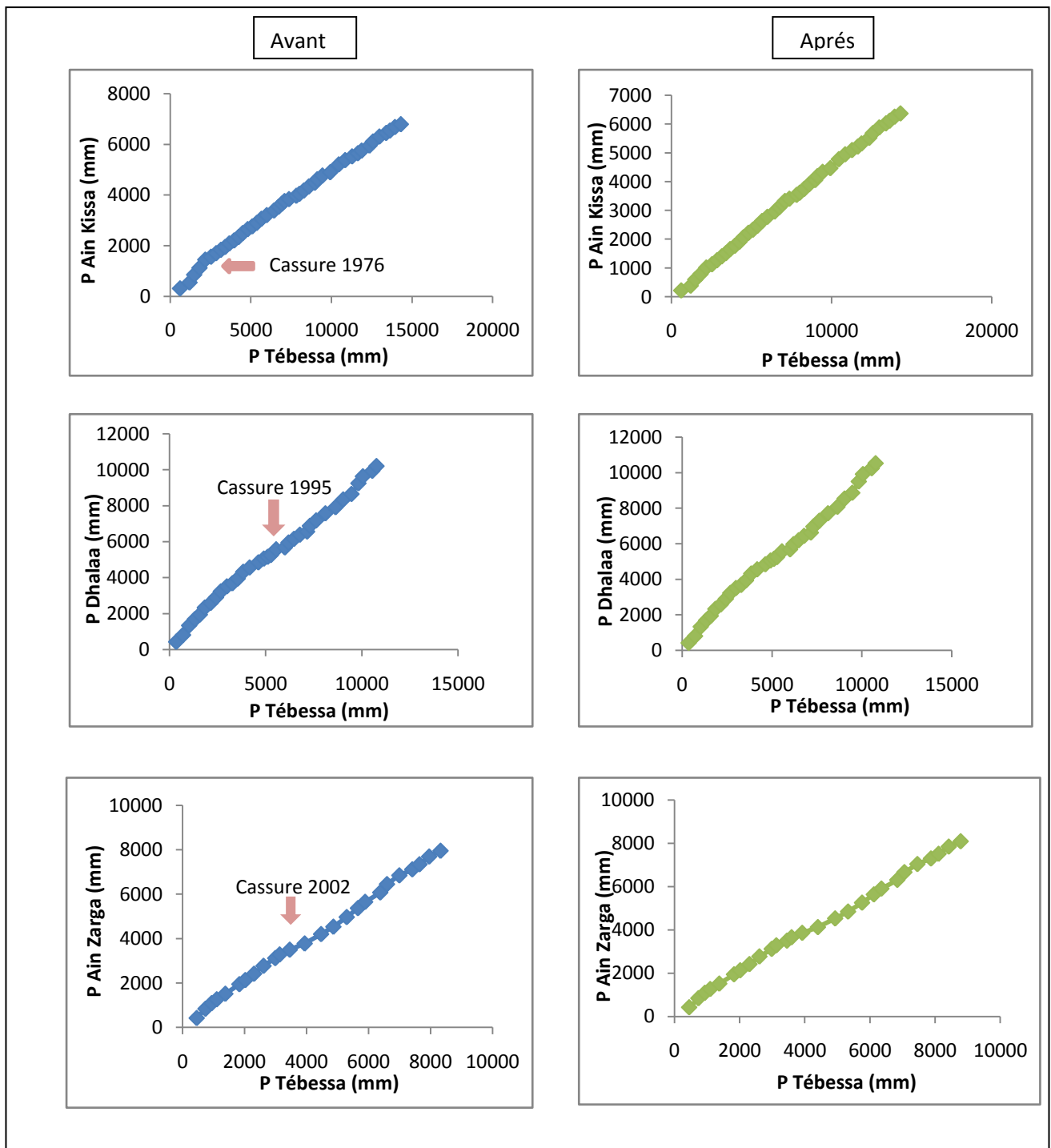
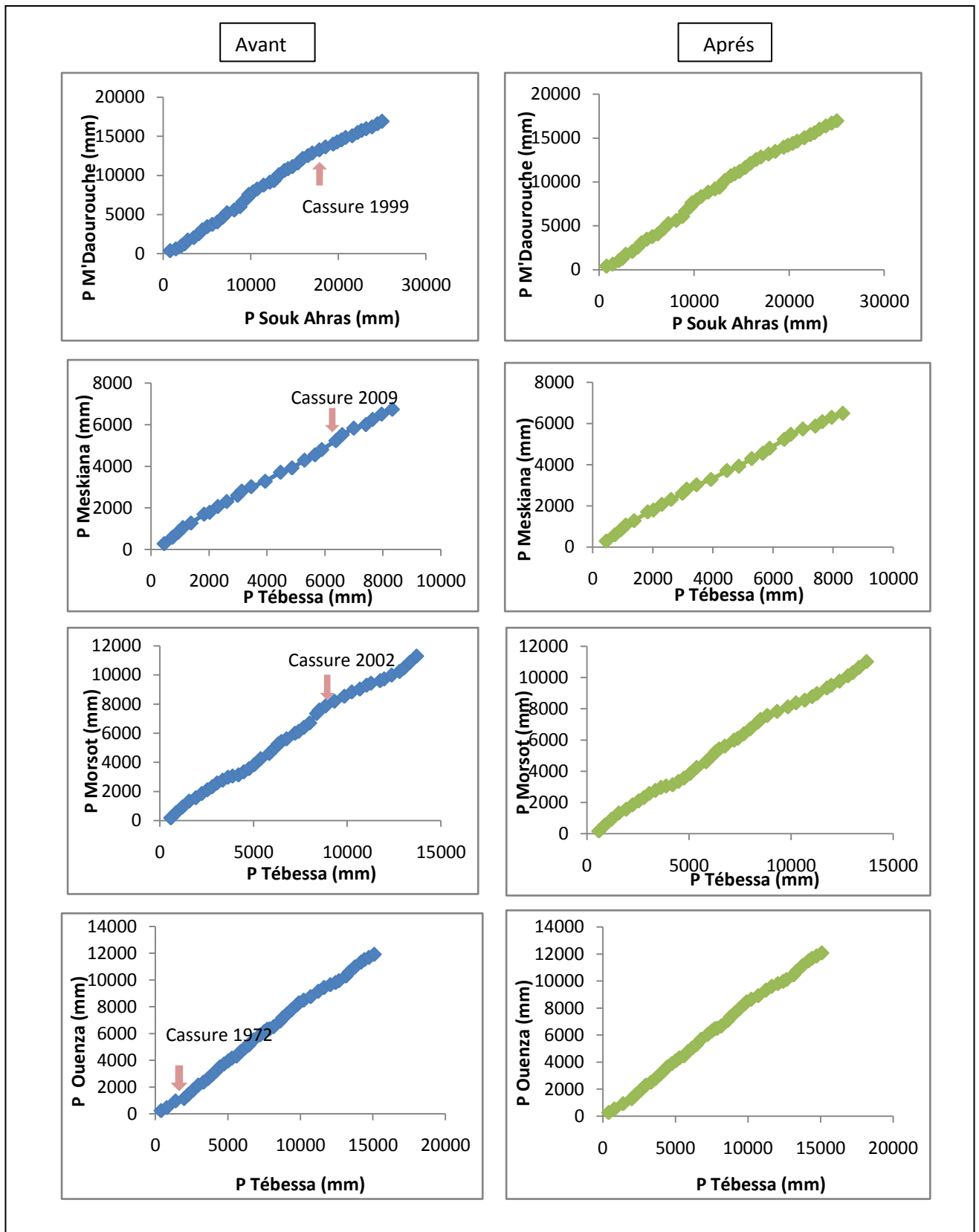


Fig n°... : Carte du réseau hydrographique des BV de la Medjerda

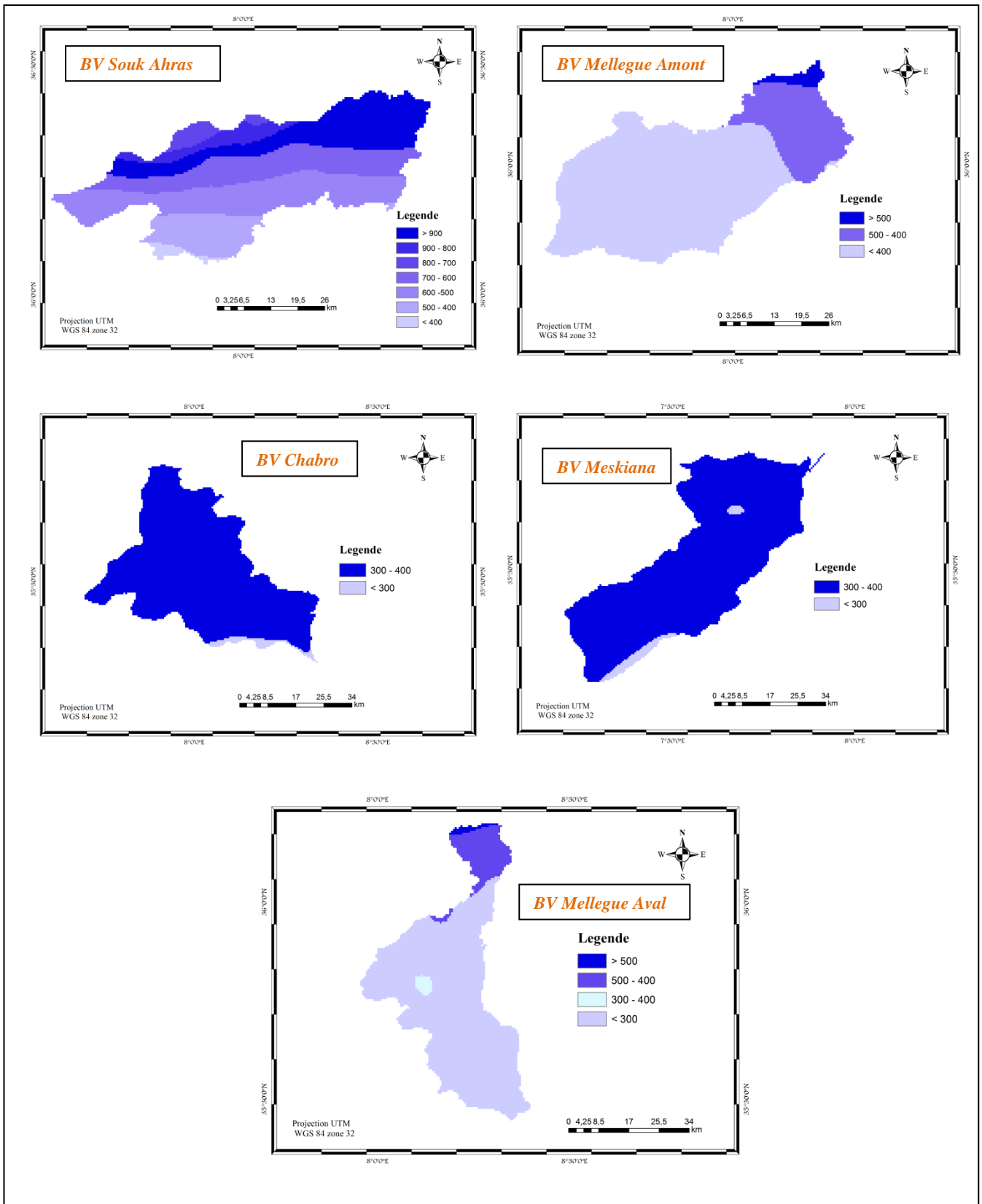
Annexe n° 9a : Critique des données pluviométriques par la méthode des doubles cumuls.



Annexe n° 9b: Critique des données pluviométriques par la méthode des doubles cumuls.



Annexe n° 10 : Cartes des isohyètes des BV de la Medjerda.



Annexe n° 5 : Classification du relief selon l'ORSTOM.

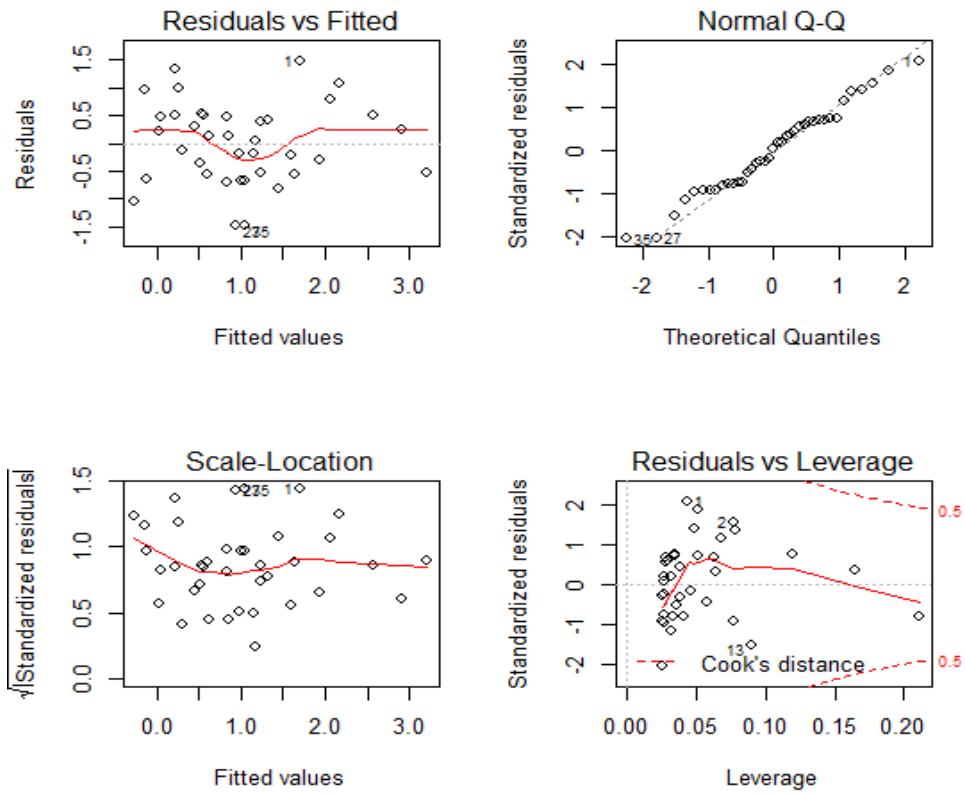
Classe de relief	Type de relief	I_g (m/km)	D_s (m)
R₁	Très faible	<2	<10
R₂	faible	2 - 5	10 - 25
R₃	Assez faible	5 - 10	25 - 50
R₄	Modeste	10 - 20	50 - 100
R₅	Assez fort	20 - 50	100 - 250
R₆	Fort	50 - 100	250 - 500
R₇	Très fort	>100	>500

Annexe n° 6 : Classification des pentes Comité de l'Union Internationale des Géographes

Classe de pente (m/km)	Caractéristique du relief
0 - 35	Pente légèrement inclinée
35 - 90	Pente moyennement inclinée
90 - 270	Pente fortement inclinée
270 - 360	Pente raide à très raide

Annexe n° 11a: Diagnostic de la régression (Station de Souk Ahras)

Echelle Annuel

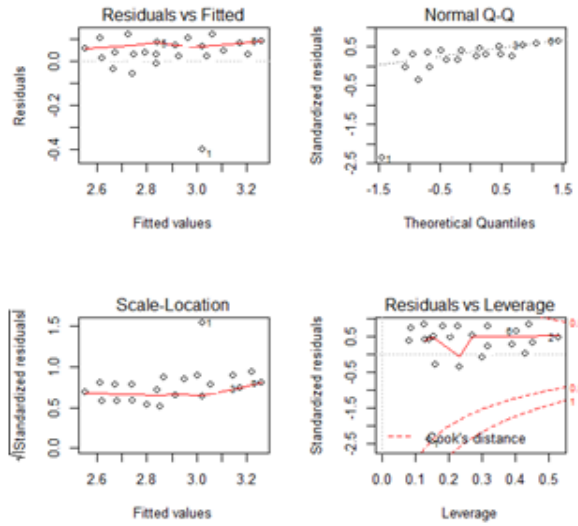
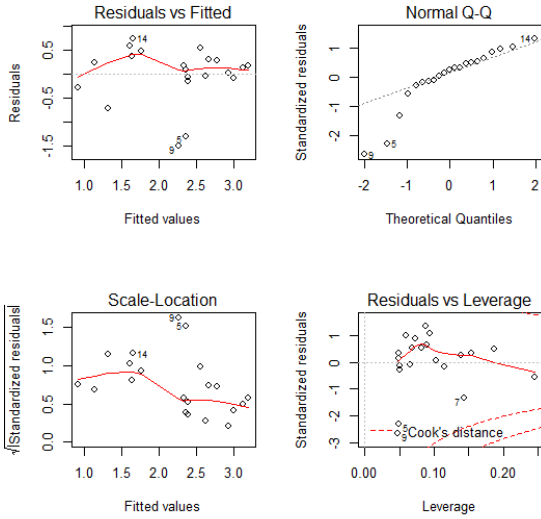


Annexe n°11b: Diagnostic de la régression (Station de Souk Ahras)

Echelle saisonnier

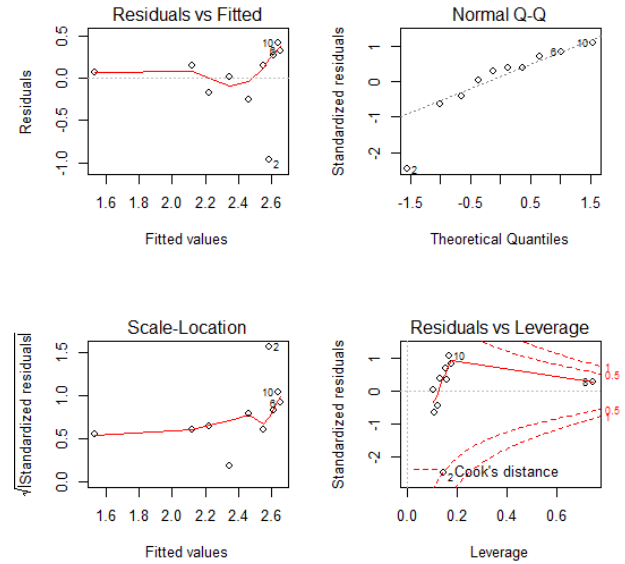
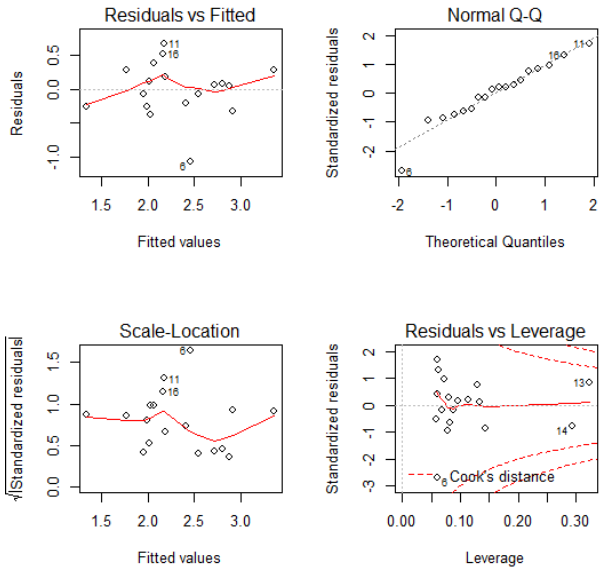
Hiver

Automne



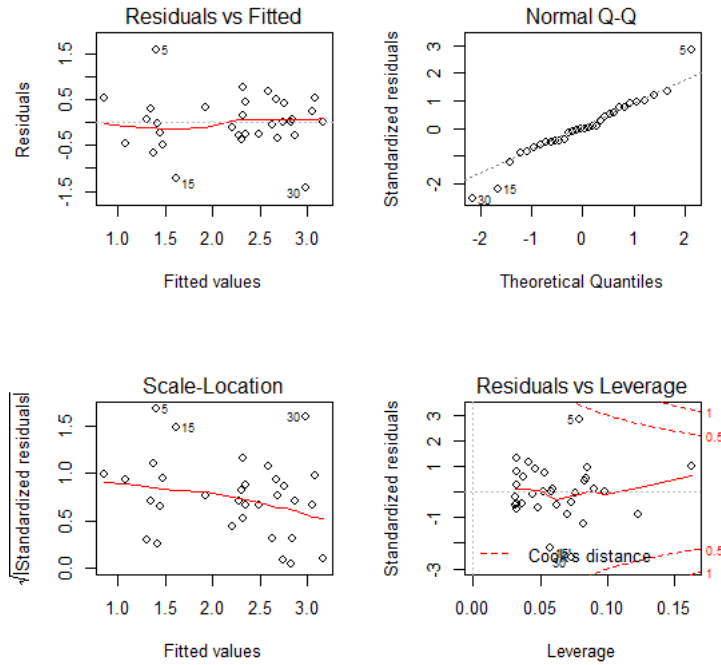
Printemps

Eté

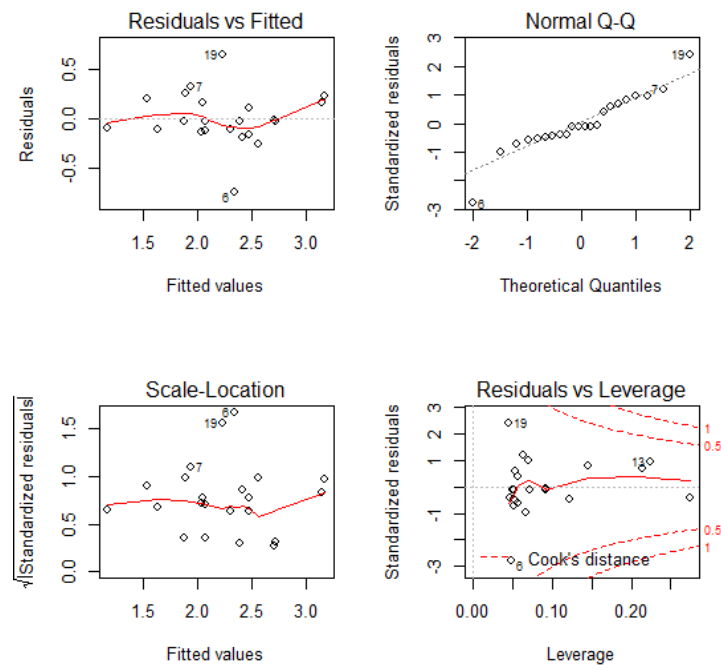


Annexe n°11c: Diagnostic de la régression (Station de Souk Ahras).

Saison Humide

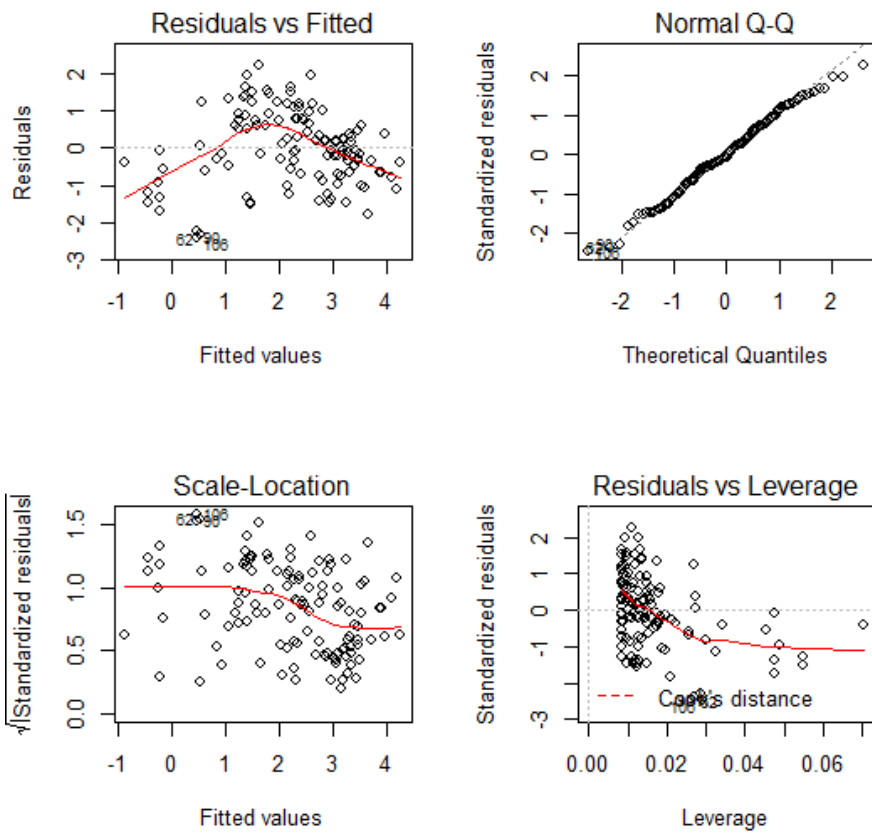


Saison Sèche



Annexe n°12a: Diagnostic de la régression (Station Ouenza)

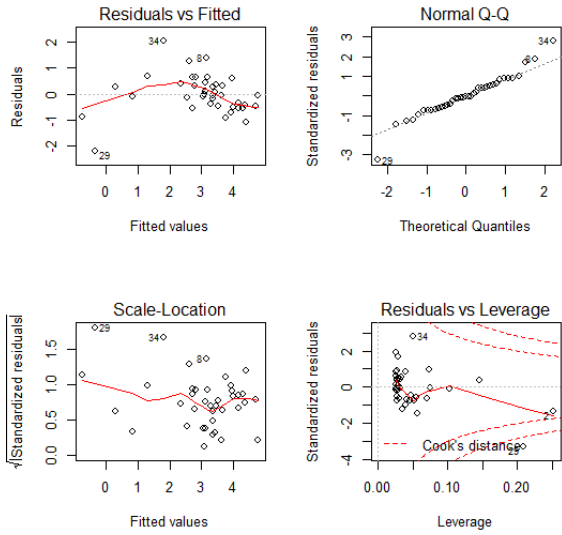
Echelle Annuel



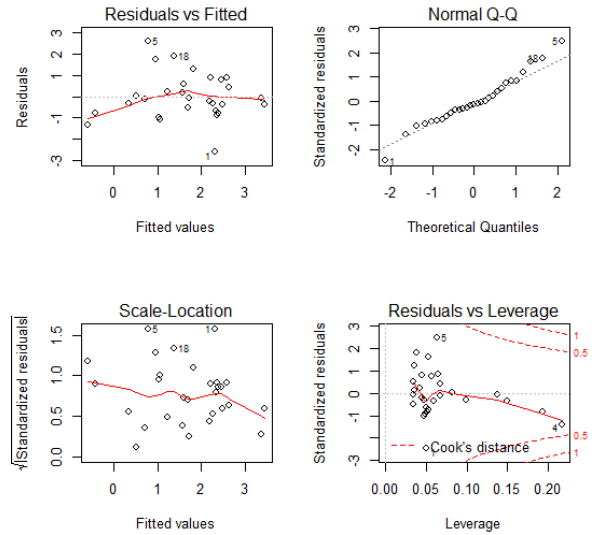
Annexe n°12b: Diagnostic de la régression (Station d'Ouenza)

Echelle saisonnier

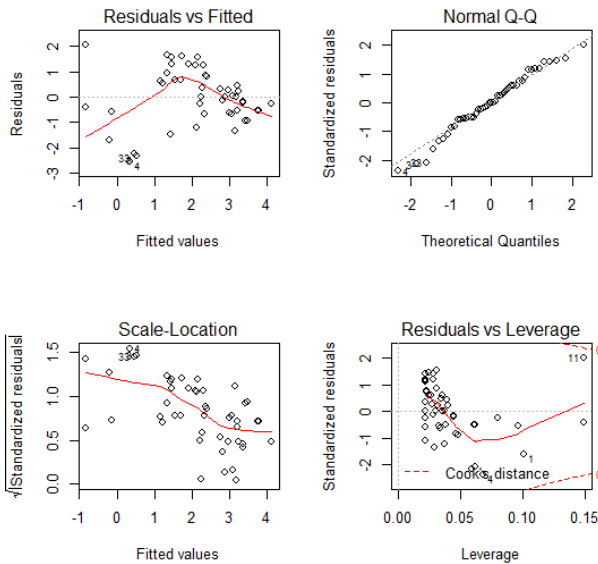
Automne



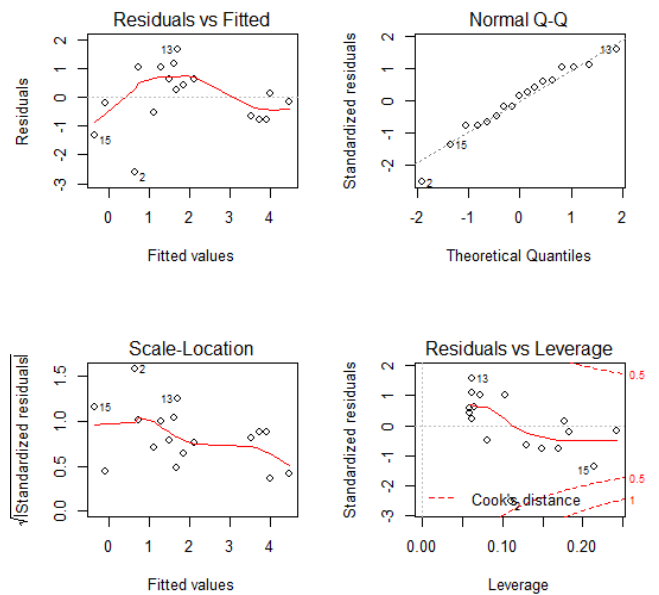
Hiver



Printemps

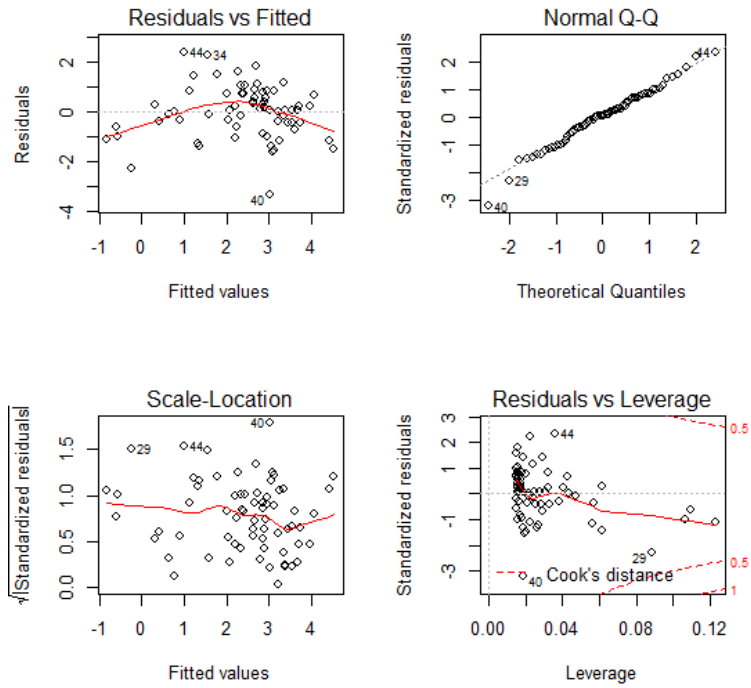


Eté

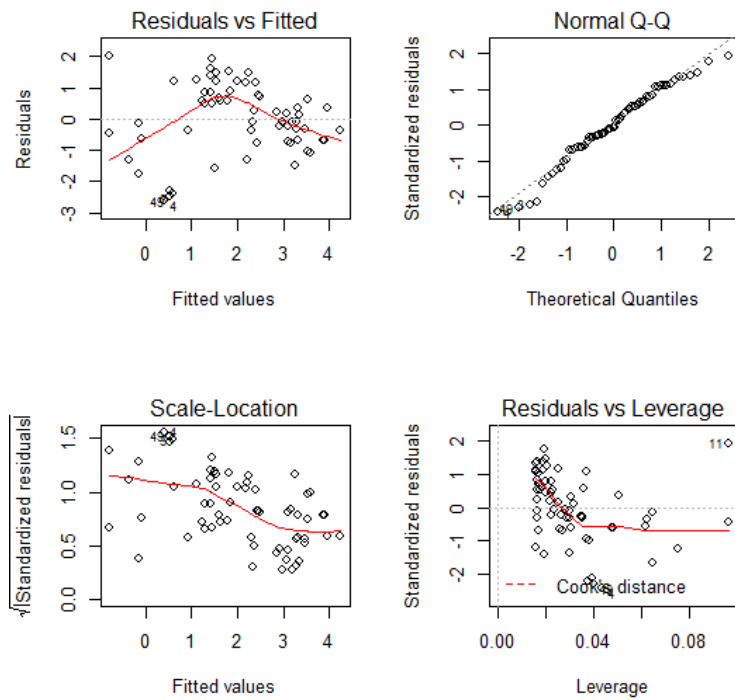


Annexe n°12c: Diagnostic de la régression (Station d'Ouenza).

Saison Humide

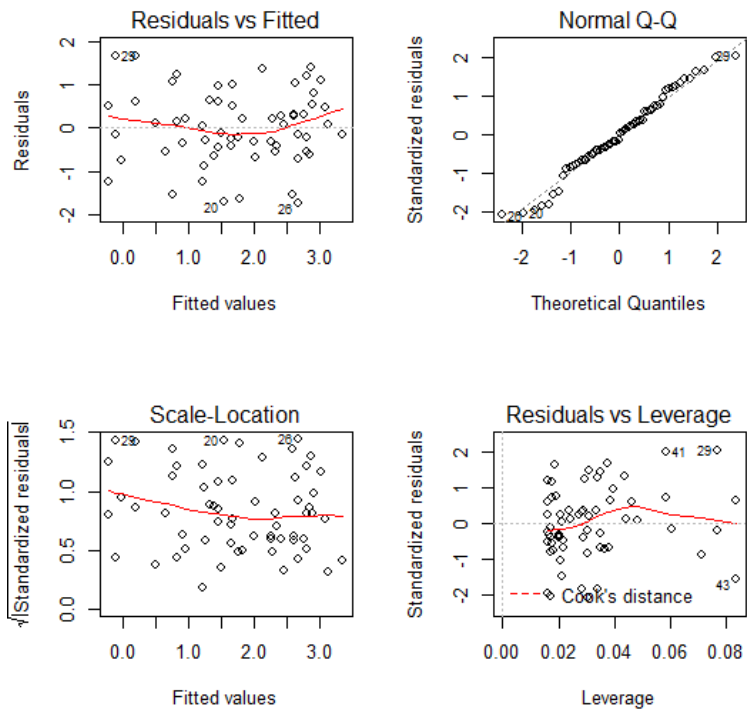


Saison Sèche



Annexe n°13a: Diagnostic de la régression (Station de Morsott).

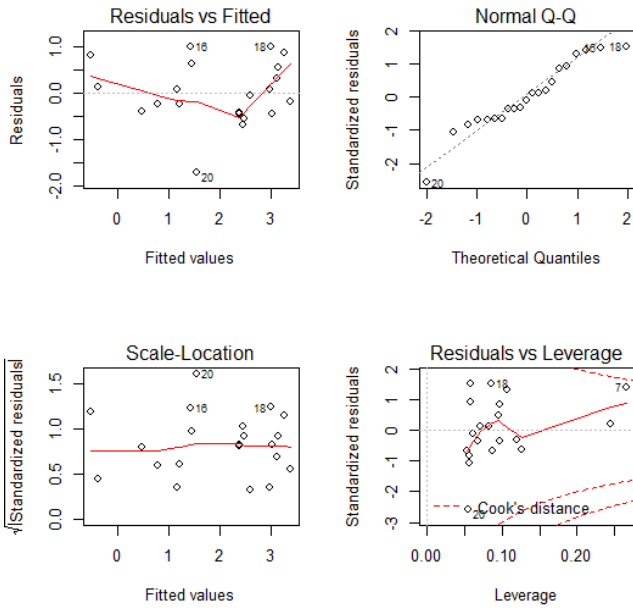
Echelle Annuel



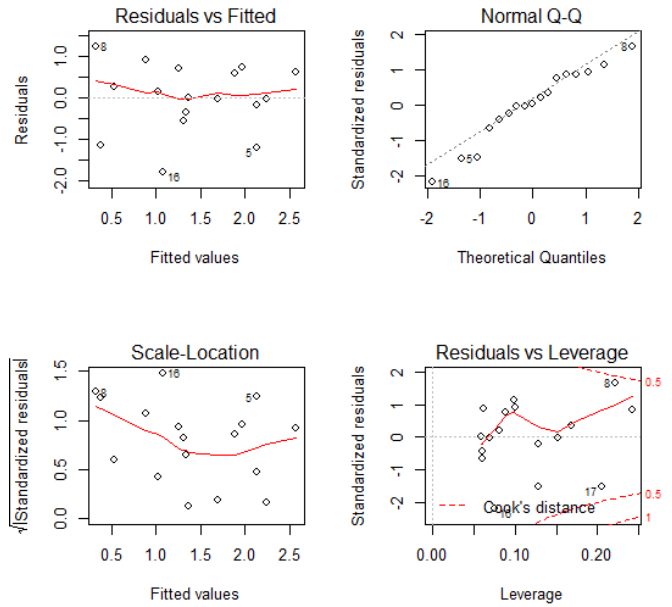
Annexe n°13b: Diagnostic de la régression (Station de Morsott).

Echelle saisonnier

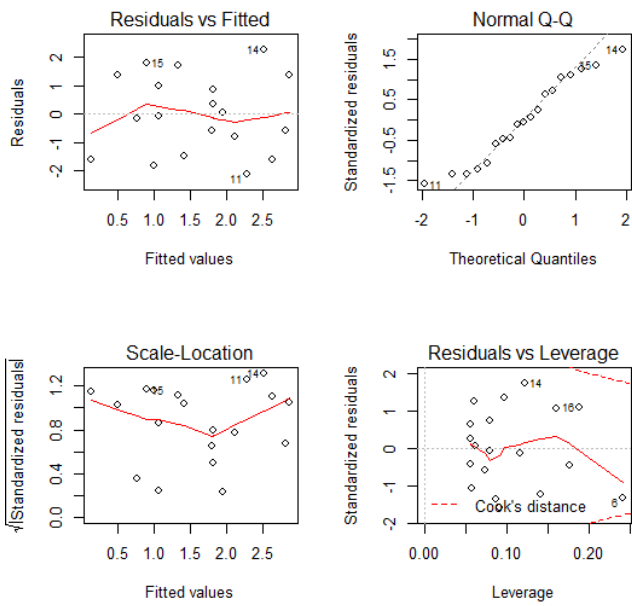
Automne



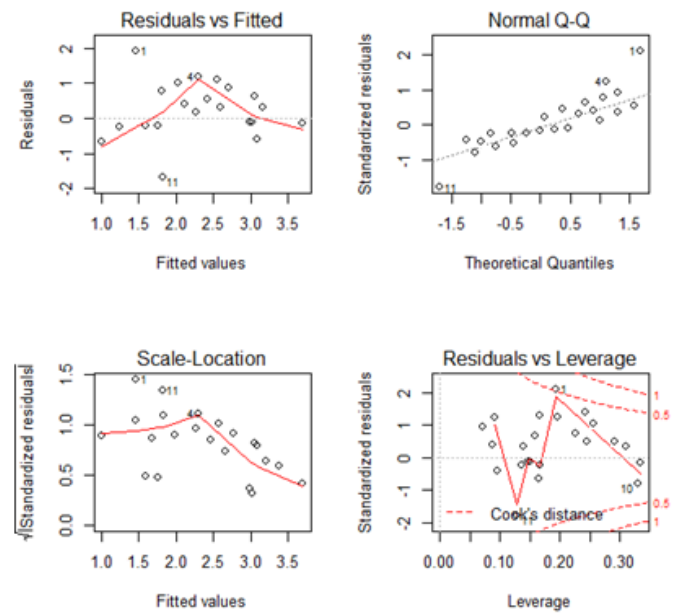
Hiver



Printemps

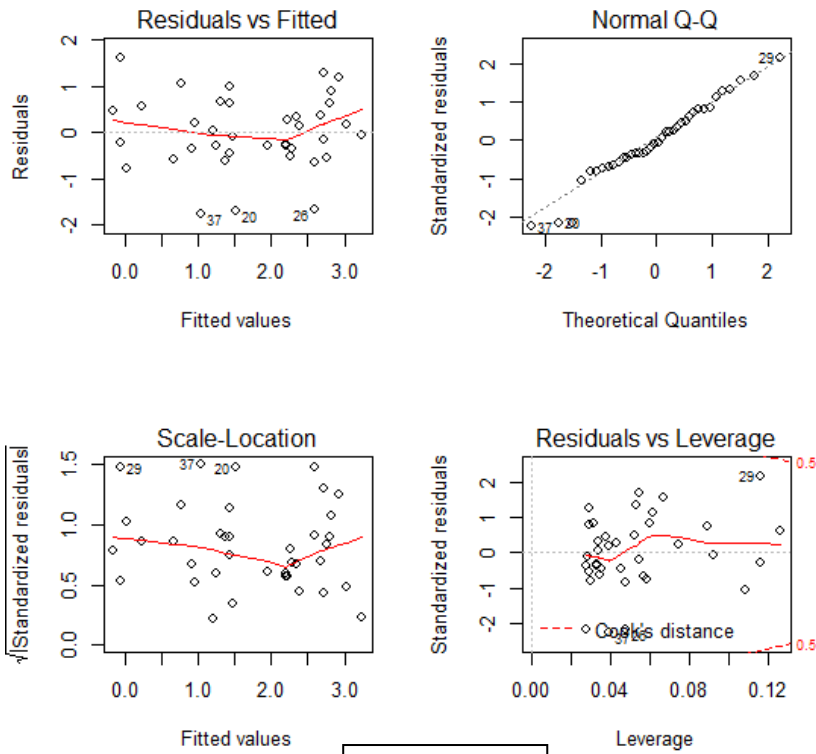


Été

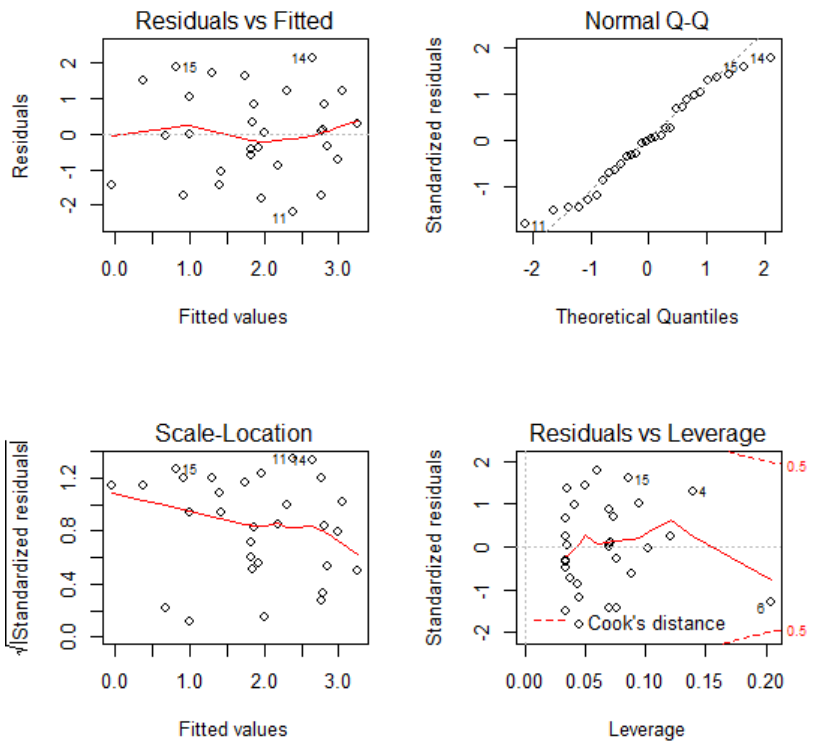


Annexe n°13c : Diagnostic de la régression (Station de Morsott).

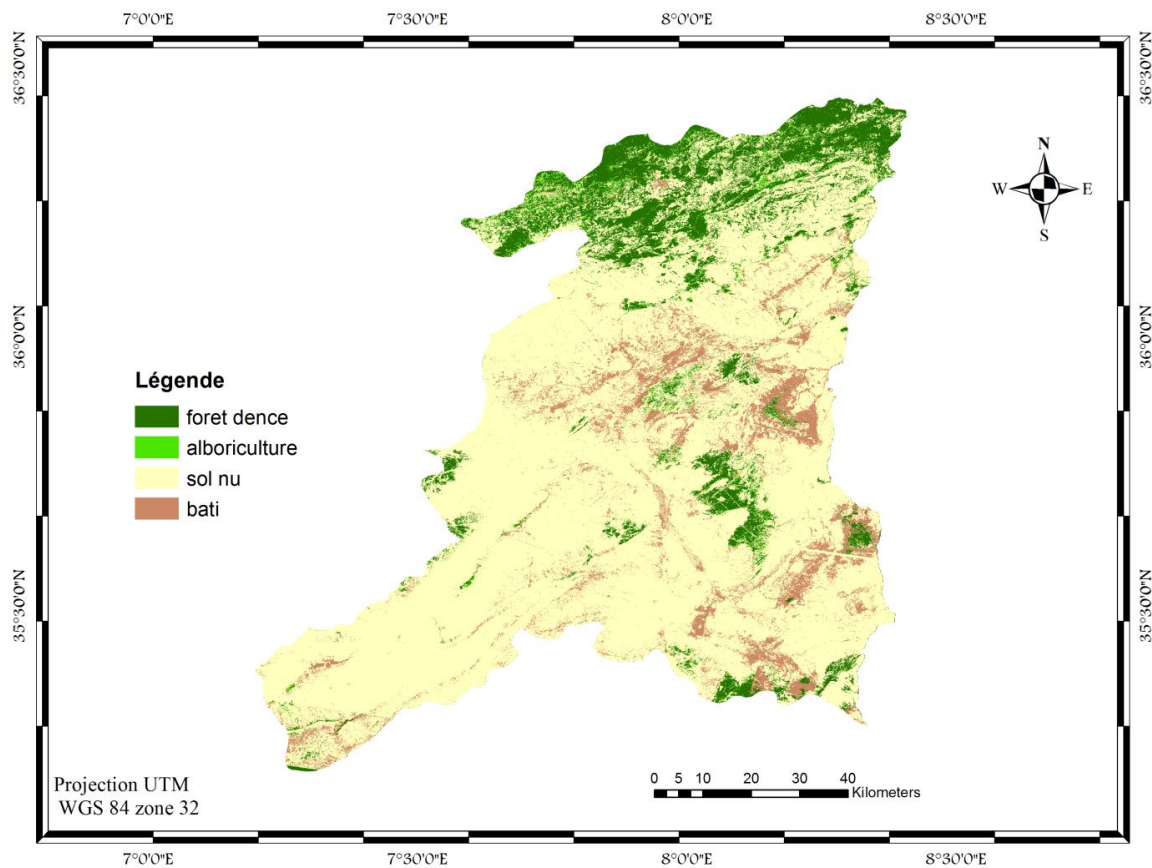
Saison Humide



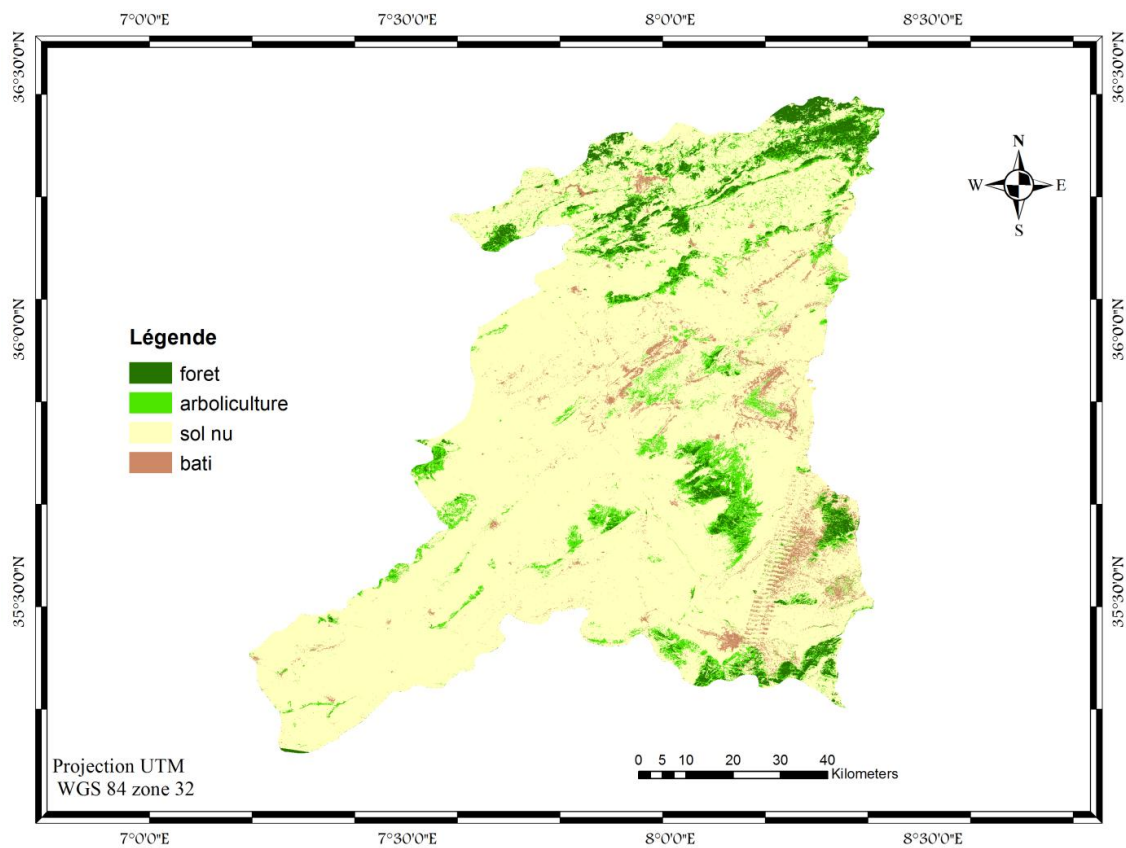
Saison Sèche



Annexe n° 14a : *Carte d'occupation du bassin versant de la Medjerda année 1987.*



Annexe n° 14b : *Carte d'occupation du bassin versant Medjerda année 2009.*



Annexe n° 14c : Carte d'occupation du bassin versant Medjerda année 2016.

