

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Constantine 1
Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de
L'aménagement du territoire

Département de l'aménagement du territoire

Laboratoire : LASTERNE



THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme** de
DOCTORAT 3^{ème} Cycle

En : Hydrologie et gestion des hydrosystèmes

Par : Soufyane ; KHENICHE

Sujet

*Les flux hydro-sédimentaires dans le bassin versant des oueds
Medjerda-Mellegue et l'envasement du barrage d'Ain Dalia
(Algérie orientale)*

Jury :

Président	Azeddine MEBARKI	Professeur à l'université de Constantine 1
Rapporteur	Abdelaziz LOUAMRI	Maitre de conférence (A) à l'université de constantine1
Co-Rapporteur	Mohamed TAABNI	Maitre de conférence (A) à l'université de Poitiers (France)
Examineur	Bouزيد TOUATI	Professeur à l'université de Constantine 1
Examineur	Nadir MAROUF	Professeur à l'université d'Oum el Bouaghi

Mai 2023

Dédicace

À l'esprit de mon cher père, **Ahmed Kheniche**

À ma chère mère **BOUCHELAGHEM Djemaa**

Et à ma belle-mère **GUERMI DALILA** et A mon beau père
AICHOIR ABDELHAMID

À ma famille

À mes frères *Lakhdar* et *Youssef*

À ma chère épouse Aichour *Fatima Zohra* qui s'est sacrifiée et
m'a aidé à réaliser notre rêve

Et à mes enfants *Ahmed Youssef & Sidra*

Et à tous ceux qui portent les noms de **KHENICHE** et **AICHOIR**
dans toutes les régions du monde.

KHENICHE SOUFYANE



Remerciements

Avant tout le monde, merci à Dieu qui m'a donné force, patience et volonté et j'ai pu terminer ce travail.

- ✓ Tout d'abord, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont fait réaliser cette thèse, en particulier ma mère **BOUCHELLAGHEM DJEMAA**, qui a tout sacrifié pour moi au cours de mon parcours universitaire, et pour ma femme **AICHOUR FATIMA ZOHRA** et mes enfants **AHMED YUCEF** et **SIDRA**, ce travail est le fruit de leur patience et de leur sacrifice.
- ✓ Je suis heureux de remercier tous ceux qui m'ont conseillé, guidé, dirigé ou contribué avec moi à la préparation de cette recherche en m'envoyant les références et sources requises à n'importe quelle étape de ses étapes, et je remercie particulièrement mon éminent professeur Mr : **Abdelaziz ; LOUAMRI** pour son soutien et des conseils pour le choix du titre et du sujet ;
- ✓ Mes remerciements vont à l'administration de la Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers –Aménagement de territoire- (Université du Mentouri Constantine) et l'équipe du laboratoire **LASTERNE** Présidé par Mr : **MEBARKI Azeddine**, et mes sincères remerciements à Mr : **Mohamed Taabni**, Co-encadreur pour ses efforts et son assistance à toutes les étapes du travail, en particulier l'équipe du **LABORATOIRE RURALITES DE L'UNIVERSITE DE POITIERS** ;
- ✓ Je tiens à remercier tous les cadres des directions **ANRH, ONM, ANBT** pour leur avoir fourni les données climatiques et hydrométriques qui nous ont permis de mener à bien cette thèse.

Finalement, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Résumé :

L'érosion du sol est un phénomène naturel qui rend compte de certains processus (arrachement des particules, transportation et déposition) induits par différents agents érosifs. Cette étude tente de quantifier l'érosion et les transports solides en suspension dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue situé au Nord-Est de l'Algérie, sur une période d'observation de **24 à 36 ans**. La région d'étude présente un climat semi-aride, avec une pluie moyenne interannuelles de 580 mm à Ain Dalia au Nord ,317mm à Tébessa au sud du bassin versant sur une période de 43 ans,

Le transport solide en suspension est calculé en utilisant les mesures instantanées des débits liquides(l/s) et des concentrations (g/l) prélevées. Dans ce contexte à partir de ces mesures, nous avons calculé la relation entre les débits liquides et les débits solides par la régression exponentielle $QS=bQL^a$ selon l'écriture française aux échelles annuelle (complète) et saisonnière. Un modèle basé sur des statistiques des échantillons a été réalisé à partir des débits liquides des crues sélectionnées. Les données QL-C correspondant aux crues ont été également étudiées.

Les régressions (Ql-Qs) obtenues par l'application de ce modèle sur les stations des sous-bassins (Medjerda, Algérie orientale) sont très encourageantes car les coefficients de corrélation débits liquides-débits solides annuels et saisonniers varient de **0.89 à 0.92**. Les résultats obtenus montrent que la dégradation spécifique moyenne annuelle varie de **39,5 t/km²/an** à **161t/km²/an** à Ouenza (le plus grand bassin jaugé, 4500 km²). Ces valeurs sont faibles par rapport à celles trouvées dans d'autres régions à régime hydrologique similaire.

L'analyse de l'évolution de la concentration des sédiments dans le cours d'eau et la quantification des flux de sédiments ont montré que l'apport sédimentaire se fait essentiellement pendant les crues. Les valeurs maximales des apports solides sont enregistrées durant la saison d'automne et de printemps, dépassant significativement les autres saisons.

L'analyse de l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides durant les crues, montre que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles de courbes d'hystérésis (simple, dans le sens d'une aiguille d'une montre « Clockwise », dans le sens contraire des aiguilles d'une montre « Contre-Clockwise » et forme en huit).

L'analyse réalisée par le modèle PAP/CAR a permis d'identifier cinq principaux états d'érosion. Les cinq classes d'érosion représentent respectivement : 40% pour la classe très faible, l'érosion faible 38%, la classe d'érosion notable 12%, 06% et 04% pour les classes d'érosion élevée et très élevé respectivement. Il y a une prédominance des classes d'érosion faible et très faible (78 %).

Le barrage d'Ain Dalia, dans la wilaya de Souk Ahras, dans le sous bassin de l'oued Medjerda (193km²), avec une capacité de 82Mm³, joue un rôle important dans l'alimentation en eau potable de quelques villes des Wilayas de Souk-Ahras, Oum El Bouaghi, Tébessa et Guelma. Il régularise un apport moyen annuel de 45hm³/an, et présente un taux d'envasement annuel de **0,43% /an**, d'après le levé bathymétrique de 2014 (11,5%).

Mots clés : Transport solide, Hystérésis, Envasement, SIG, PAP/CAR, Algérie septentrionale, Medjerda, Semi-aride.

Abstract:

Soil erosion is a natural phenomenon that accounts for certain processes (particle tearing, transportation and deposition) induced by different erosive agents. This study attempts to quantify erosion and transport of suspended solids in the Medjerda-Mellegue watershed in northeastern Algeria, over an observation period of 24 to 36 years. The study region has a semi-arid climate, with a mean interannual rainfall of 580 mm at Ain Dalia in the north and 317 mm at Tébessa in the south of the catchment over a 43-year period,

Suspended solid transport is calculated using instantaneous measurements of liquid flows (l/s) and concentrations (g/l) collected. Based on these measurements, we calculated the relationship between liquid and solid flows by exponential regression $QS=bQL^a$ according to the French script on annual (complete) and seasonal scales. A model based on sample statistics was generated from the liquid flows of selected floods. The QL-C data corresponding to the floods were also studied.

The regressions (Ql-Qs) obtained by applying this model to sub-basin stations (Medjerda, eastern Algeria) are very encouraging, with annual and seasonal liquid-solid flow correlation coefficients ranging from 0.89 to 0.92. The results obtained show that mean annual specific degradation varies from 39.5 t/km²/year to 161 t/km²/year at Ouenza (the largest basin gauged, 4500 km²). These values are low compared with those found in other regions with similar hydrological regimes.

Analysis of the evolution of sediment concentration in the watercourse and quantification of sediment flows have shown that sediment input occurs mainly during floods. Maximum sediment input values are recorded during the autumn and spring seasons, significantly exceeding other seasons.

Analysis of the evolution of concentrations as a function of liquid flows during floods shows that the response of concentrations to flows follows four hysteresis curve patterns (simple, clockwise, counter-clockwise and figure-of-eight).

The analysis carried out by the PAP/CAR model identified five main erosion states. The five erosion classes represent respectively: 40% for the very low class, low erosion 38%, and the notable erosion class 12%, 06% and 04% for the high and very high erosion classes respectively. Low and very low erosion classes predominate (78%).

The Ain Dalia dam, in the wilaya of Souk Ahras, in the Oued Medjerda sub-basin (193km²), with a capacity of 82Mm³, plays an important role in supplying drinking water to several towns in the Wilayas of Souk-Ahras, Oum El Bouaghi, Tébessa and Guelma. It regulates an average annual inflow of 45hm³/year, and has an annual siltation rate of 0.43% /year, according to the 2014 bathymetric survey (11.5%).

Keywords: *Solid transport, Hysteresis, Siltation, GIS, PAP/CAR, Northern Algeria, Medjerda, Semi-arid.*

الملخص:

تعرية التربة هي ظاهرة طبيعية تمثل عمليات معينة (تفكيك الجسيمات ونقلها وترسيبها) التي تسببها عوامل التعرية المختلفة. تحاول هذه الدراسة تحديد كمية التعرية وانتقال المواد الصلبة العالقة في مستجمع مياه مجردة - ملاق في شمال شرق الجزائر، على مدى فترة مراقبة تتراوح بين 24 و36 سنة. تتسم منطقة الدراسة بمناخ شبه جاف، حيث يبلغ متوسط هطول الأمطار بين السنوات 580 ملم في عين دالية في الشمال و317 ملم في تبسة في جنوب مستجمع المياه على مدى 43 سنة،

تم حساب انتقال المواد الصلبة العالقة باستخدام القياسات اللحظية للتدفقات السائلة (لتر/ثانية) والتركيزات (غرام/لتر) التي تم جمعها. واستناداً إلى هذه القياسات، قمنا بحساب العلاقة بين التدفقات السائلة والصلبة عن طريق الانحدار الأسّي $QS = bQL^a$ وفقاً للنص الفرنسي على المقاييس السنوية (الكاملة) والموسمية. تم إنشاء نموذج قائم على إحصاءات العينة من التدفقات السائلة للفيضانات المختارة. كما تمت دراسة بيانات QL-C المقابلة للفيضانات.

إن الانحدارات (QL-QS) التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق هذا النموذج على محطات الحوض الفرعي (متيجة - ج، شرق الجزائر) مشجعة للغاية، حيث تراوحت معاملات الارتباط السنوية والموسمية للتدفق السائل والصلب بين 0.89 و 0.92. تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن متوسط التدهور النوعي السنوي يتراوح من 39.5 طن/كم²/سنة إلى 161 طن/كم²/سنة في الوزن (أكبر حوض تم قياسه، 4500 كم²). هذه القيم منخفضة مقارنة بتلك الموجودة في مناطق أخرى ذات أنظمة هيدرولوجية مماثلة.

وقد أظهر تحليل تطور تركيز الرواسب في المجرى المائي وتقدير كمية تدفقات الرواسب أن مدخلات الرواسب تحدث بشكل رئيسي أثناء الفيضانات. يتم تسجيل القيم القصوى لمدخلات الرواسب خلال فصلي الخريف والربيع، متجاوزة بشكل كبير الفصول الأخرى.

يُظهر تحليل تطور التركيزات كدالة للتدفقات السائلة أثناء الفيضانات أن استجابة التركيزات للتدفقات تتبع أربعة أنماط منحنى تباطؤ (بسيط، في اتجاه عقارب الساعة، وعكس اتجاه عقارب الساعة، وشكل الثمانية).

حدد التحليل الذي أجراه نموذج PAP/CAR خمس حالات تآكل رئيسية. تمثل فئات التآكل الخمس على التوالي: 40% لفئة التآكل المنخفضة جداً، والتآكل المنخفض 38%، وفئة التآكل الملحوظ 12% و 6% و 4% لفئتي التآكل المرتفع والمرتفع جداً على التوالي. تسود فئات التآكل المنخفضة والمنخفضة جداً (78%).

يلعب سد عين الدالية الواقع في ولاية سوق أهراس في الحوض الفرعي لوادي مجردة (193 كلم مربع)، بسعة 82 مليون م³، دوراً هاماً في تزويد العديد من المدن في ولايات سوق أهراس وأم البواقي وتبسة وقالمة بالمياه الصالحة للشرب. ويضبط متوسط تدفق سنوي يبلغ 45 مليون م³/سنوياً، ويبلغ معدل الطمي السنوي 0.43%/سنوياً، وفقاً لتقنية مسح الأعماق لعام 2014 (11.5%).

الكلمات المفتاحية: انتقال المواد الصلبة، التباطؤ، الترسيب، نظم المعلومات الجغرافية، PAP/CAR، شمال الجزائر، مجردة، شبه قاحلة.

Table des matières

- Dédicace.....	I
- Remerciements.....	II
- Résumé.....	III
- Abstract.....	IV
- ملخص.....	V
- Liste des figures.....	XII
- Liste des tableaux.....	XVI
- Liste des abréviations.....	XIX
- Introduction générale	01
CHAPITRE. I : Présentation de la zone d'étude « bassin de Medjerda-Mellegue »	
I.1 Introduction	04
I.2 Le Bassin versant.....	04
I.2.1 Le sol	05
I.2.2 Les précipitations.....	05
I.2.3 L'évaporation	05
I.2.4 L'interception et le stockage dans les dépressions.....	05
I.2.5 L'infiltration.....	06
I.2.6 Les écoulements.....	06
I.2.7 Le cycle hydrologique	06
I.3 Aperçu général sur le bassin versant de la Medjerda-Mellegue	07
I.3.1 Caractéristiques géométriques.....	09
I.3.1.1 Indice de compacité de Gravelius (KG).....	09
I.3.1.2 Superficie	10
I.3.1.3 Longueur du rectangle équivalent.....	10
I.3.1.4 Largeur du rectangle équivalent.....	10
I.3.1.5 Hypsométrie.....	10
I.3.1.6 L'altitude moyenne.....	16
I.3.1.7 Dénivelée simple	16
I.3.2 Indices des pentes	17
I.3.2. a La pente moyenne du bassin versant.....	17
I.3.2. b L'indice de pente de Roche I P.....	17
I.3.2. c L'indice de pente globale Ig	18
I.3.2. d Dénivelée spécifique Ds.....	18
I.3.3 Les classes des pentes	19
I.3.4 Caractéristiques du réseau hydrographique.....	20
I.3.4.1 Hiérarchisation du réseau.....	22
I.3.4.2 Profil en long du cours d'eau principal.....	22
I.3.4.3 La longueur du cours d'eau principal.....	23
I.3.4.4 La densité de drainage (Dd)	23
I.4 Coefficient de torrentialité.....	23
I.5 Temps de concentration.....	24
I.6 Le couvert végétal.....	24
I.7.1 Cadre général de la géologie	27
I.7.2 Les séries litho-stratigraphiques.....	29
I.7.2.1 Trias	29
I.7.2.2 Jurassique	29
I.7.2.3 Crétacé	29
I.7.2.4 Eocène.....	31

Table des matières

I.7.2.5 Miocène	32
I.7.2.6Pliocène :	32
I.7.3Quaternaire	32
I.8 Impact de la géologie sur l'hydrologie	32
Conclusion.....	34
 CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue 	
II.1 Introduction	35
II.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie :	35
II.3. L'érosion et sa typologie	35
II.3 L'équipement du bassin versant et l'analyse des données pluviométriques.....	35
II.3.1 Stations pluviométriques.....	35
II.4 Méthodologie	37
II.5 Critique des données.....	37
II.5.1 Analyse des données par une loi de probabilité (racine- normal).....	37
II.5.2 Analyse des données avec la méthode des doubles cumuls.....	38
II.5.2.1 Rappel de la méthode des doubles cumuls.....	38
II.5.2.2 Comblement des lacunes avec le logiciel Hydrolab. (Bouche troue) mois par mois.....	39
II.6. Variations spatio-temporelles des précipitations.....	40
II.6. 1.Variation interannuelle des précipitations.....	40
II.6.2- Variation saisonnière des précipitations.....	41
II.6.3 Variation inter mensuelle des précipitations.....	44
II.7 Analyse statistiques des séries pluviométriques.....	46
II.7.1 Notion de temps de retour.....	46
II.8 Estimation de précipitation moyenne dans le bassin.....	47
II.8.1 La moyenne arithmétique	47
II.8.2 La méthode polygones de Thiessen	49
II.8.3 La méthode des isohyètes. (iso- valeurs).....	50
Conclusion.....	53
 CHAPITRE III: Analyse des apports hydrologiques 	
III.1 Introduction.....	54
III.2 Équipement du bassin versant Medjerda Mellegue	54
III.3. Les données disponibles aux stations hydrométriques (mesure des concentrations).....	55
III.3. 1. Mesures directes.....	55
III.3.2. Les échantillons disponibles.....	56
III.3.3. Synthèse sur les données de concentration.....	57
III.4 Débits moyens annuels	59
III.4.1Variations des débits annuels moyens bruts (m3/s)	59
III.4.2 Variations des débits annuels moyens spécifiques (l/s/km2).....	61
III.5. L'irrégularité inter annuelle des modules et leur répartition statistique.....	62
III.5.1 Coefficient de variation.....	62
III.5.2 L'hydraulicité.....	62
III.6 Bilan moyen annuel de l'écoulement.....	64
III.7. Ressources annuelles en eau de surface disponibles.....	64
III.7. 1Débits moyens mensuels et saisonniers.....	65
III.7.1.1 Coefficient mensuel de Débits.....	65

Table des matières

III.7.2 Coefficient de variation.....	67
III.7.3 Débits moyens journaliers.....	68
III.8 Variation des apports liquides moyens interannuels, saisonniers et mensuels	71
III.8. 1 Variation des apports liquides moyens interannuels	71
III.8.2 Variation des apports liquides moyens saisonniers,.....	73
III.8.3 Variation des apports liquides moyens mensuels.....	74
III.9 Étude fréquentielle des débits maximums annuels.....	75
Conclusion.....	77
CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations Ql –Qs et étude du phénomène d’hystérésis	
IV.1. Introduction.....	78
IV.2L’érosion et sa typologie	78
IV.2. 1formes de l’érosion hydrique.....	79
IV.3 Facteurs de l’érosion hydrique.....	80
IV.3.3 Les mécanismes du transport des sédiments.....	81
IV.4. Les Régressions « Ql .C », « Ql. Qs ».....	82
IV.4.1. Relation concentrations en fonction des débits liquides.....	82
IV.4.2. Relation débits solides en fonction des débits liquides.....	82
IV.4.3. Relations débits liquides –concentration (valeurs instantanées).....	82
IV.4.4. Établissement des relations débits liquides –débits solides à l’échelle annelle et saisonnière « régression unique, saisonnière »	83
	90
IV.4.5 Discussion	90
IV.5 Estimation de transport solide spécifique TSS.....	92
IV.5. 1 Méthodologie.....	92
IV.5.2 Estimation des T.S.S par la régression « unique » à l’échelle annuelle	92
IV.5.3 Estimation des T.S.S par la régression « saisonnière » à l’échelle annuelle	92
IV.5.4 Discussion.....	93
IV.5.5 Estimation des T.S.S par régression « unique » à l’échelle saisonnière.....	94
IV.5.6 Estimation des T.S.S, régression « saisonnière » à l’échelle saisonnière.....	95
IV.5.7 Estimation des T.S.S par la régression « unique » à l’échelle mensuelle.....	98
IV.5.8 Estimation des T.S.S par la régression « saisonnière » à l’échelle mensuelle.....	98
IV.5.9 Estimation des T.S.S par régression « saisonnière » à l’échelle journalière	100
IV.4. Modèle d’érosion en fonction de la concentration des sédiments en suspension et du débit liquide durant les crues et le phénomène d’hystérésis.....	105
IV.4.1. Problématique.....	105
IV.4.2. Formes générale des hystérésis.....	105
IV.6.2.1 Hystérésis horaire (ORTHOGRADE).....	105
IV.6.2.2 Hystérésis antihoraire (RETROGRADE)	106
IV.6.3. METHODOLOGIE.....	108
IV.6.3.1 Identification des classes de relation (C-Q).....	108
IV.6.4 Application aux bassins des stations étudiées	114
Conclusion	121

Table des matières

CHAPITRE V : Modélisation et cartographie des risques d'érosion hydrique du Sol par l'application des SIG, télédétection et directives PAP/CAR

V.1. Introduction	122
V.2 Approche méthodologique et matériel utilisé.....	123
V.2.1 La phase prédictive	123
Étape 1 : Élaboration de la carte d'érodibilité par superposition de la carte des pentes et la carte de friabilité	123
A. La carte des pentes.....	123
B. La carte de friabilité.....	125
C. La carte d'érodibilité.....	127
Étape 2 : Réalisation de la carte de protection des sols par superposition de la carte d'occupation du sol et du degré de recouvrement végétal (NDVI).....	129
A. La carte de degré de couvert végétal.....	129
B. La carte d'occupation des sols.....	131
C. La carte de protection des sols.....	133
Étape 03 : Réalisation de la carte des états érosifs.....	135
V.3. Comparaison des résultats obtenues du model PAP/CAR et TSS calculé.....	137
Conclusion.....	144

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.1. Introduction	145
VI.2. Présentation du site de barrage	145
VI.3. Présentation du barrage	146
VI.3.1 Coupe de la digue du barrage d'Ain dalia.....	147
VI.3.2.1 Le coursier	148
VI.3.2.2 Cuillère de dissipation	148
VI. 3.3 Bassin de réception	148
VI.3.4 Retenue	149
VI.3.5 Galerie de dérivation	149
VI.3.6 Galerie de vidange.....	150
VI.3.7 Tour de prise d'eau.....	150
VI.4 Hydrologie du bassin	151
VI.5 Géologie de site.....	151
VI.5.1 En rive gauche.....	151
VI.5.2 En fond de vallée	151
VI.5.3 En rive droite, se présentant en allure plissée dans la moitié inférieure de l'appui	151
VI.6 Évolution de la capacité du barrage d'Ain d'Alia selon le bilan de régularisation mensuelle pour la période 1990-2015.....	152
VI.6.1 : Présentation du schéma théorique de fonctionnement du barrage.....	152
VI.6.2 Remplissage du barrage d'Ain dalia	152
VI.6.3 : Régularisation inter annuelle.....	154
VI.6.4 La régularisation mensuelle	154
VI.6.4.1 Affluents (Apport liquides) et pluies mensuelles.....	154
VI .6.4.2 Défluent	156
VI.7 Envasement des barrages :.....	157
VI.7.1 Les barrages en exploitation suivant les bassins hydrographiques.....	157
VI.7.2 Méthode de détermination du taux d'envasement	158

Table des matières

a. Mesure à l'échosondeur.....	158
b. Méthode de turbidimétrie	158
c. Méthode de stéréophotogrammétrie.....	159
d. Méthode bathymétrique.....	159
VI.8 Dévasement des Barrages	160
VI.8.1. Moyens de lutte contre l'envasement	161
a. Moyens préventifs.....	161
b. La chasse par vidange.....	161
c. Réalisation de barrage de décantation.....	162
d. Le dragage	162
Conclusion	164
Conclusion générale	165
Références bibliographiques	168

LISTE DES FIGURES :

N° Figure	Titre de figure	N° page
Figure 01	Schéma d'un bassin versant	4
Figure 02	Le cycle hydrologique de l'eau	7
Figure 03	Situation géographique de la zone d'étude (Medjerda-Mellegue ; Algérie orientale)	8
Figure 04	Variation de l'indice de Gravelius en fonction de la forme du bassin	9
Figure 05	Carte hypsométrique de la Medjerda-Mellegue	11
Figure 06	Courbes hypsométriques des sous bassins de la zone d'étude	15
Figure 07	Carte des pentes de la Medjerda-Mellegue	19
Figure 08	Réseau hydrographique et les stations hydrométriques du la zone d'intérêt	21
Figure 09	Profil en long du cours d'eau principal de l'Oued Medjerda, Oued Mellegue, et oued Chabro (réalisé à l'aide du logiciel Google Earth Pro).	22
Figure 10	Carte du couvert végétal de la zone d'étude (Medjerda-Mellegue, Algérie orientale)	25
Figure 11	Carte géologique de la zone d'étude (Medjerda-Mellegue, Algérie orientale)	28
Figure 12	Carte des formations lithologiques	31
Figure 13	Carte de perméabilité du bassin versant de la Medjerda	33
Figure 14	Réseau pluviométrique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue	36
Figure 15	Échantillon d'ajustement des données de pluie en racine carré de dixième de mm Poste de Souk-Ahras (Medjerda-Mellegue)	37
Figure 16 (a)+(b)	Échantillon de courbe de double cumuls des données de pluie d'un poste sans rupture, poste de Ras layoun (Medjerda-Mellegue)	38
Figure 17	Variations des précipitations interannuelles dans le bassin de Medjerda-Mellegue	40
Figure 18	Variations saisonnières des précipitations (bassin de Medjerda-Mellegue)	41
Figure 19	Variations mensuelles des précipitations sur le bassin de la Medjerda-Mellegue	44
Figure 20	<i>Ajustement des pluies annuelles avec la loi de Gauss</i>	46
Figure 21	variation des pluies moyenne de bassin	48
Figure 22	carte des pluies selon la méthode des polygones de Thiessen	49
Figure 23	carte de pluies moyennes annuelles 1972/2012 avec Isohyètes	51
Figure 24	Les bassins jaugés unitaire et emboîté	55
Figure 25	Position dans l'année des mesures de concentration (Mai.73_1985)	56
Figure 26	Analyse statistique des classes des mesures Ql-C (%)	59
Figure 27	Variations interannuelles des modules moyens annuels bruts des oueds de la zone d'étude. (Medjerda-Algérie orientale)	60
Figure 28	Variations des débits moyens mensuels des sous bassins de la zone d'étude (Medjerda-Algérie orientale)	65
Figure 29	Variations des débits moyens journaliers d'Oued Chabro à Morsott.	68
Figure 30	Variations des débits moyens journaliers d'oued Mellegue aval à Ouenza	69

Figure 31	Variations des débits moyens journaliers oued Mellegue amont à El Aouinet	70
Figure 32	Variations journalières des débits de l'oued El K'sob à El Azreg	71
Figure 33	Variation des apports liquides moyens interannuels	72
Figure 34	Variation des apports liquides moyens saisonniers	73
Figure 35	Variation des apports liquides moyens mensuels	74
Figure 36	Ajustement des débits max annuels à une loi de Galton	76
Figure 37	L'érosion en ravines	79
Figure 38	L'effet « Splash » sur le sol sous l'impact d'une goutte de pluie	80
Figure 39	a : Relation débits liquides –concentrations, station de El Aouinet (1973/1985) (Échelle arithmétique)	83
Figure 39	b. Relation débits liquides –concentrations, station de El Aouinet (1973/1985) (Échelle bi-logarithmique)	83
Figure 40	Relation débits liquides –débits Solides, des stations, Morsott, Ouenza, El Aouinet, Ain dalia et El Azreg par régressions « unique »	85
Figure 41	Relation (Ql –Qs), station de l'oued Chabro à Morsott « Régressions saisonnier »	86
Figure 42	Relation (Ql –Qs), station d'Ouenza « Régressions saisonnières »	87
Figure 43	Relation Ql –Qs, station de El Aouinet « Régressions saisonnières »	89
Figure 44	Relation débits liquides –débits solides, station de l'oued Medjerda à Ain Dalia « Régressions saisonnières »	89
Figure 45	Variabilité des T.S.S saisonniers pour les stations étudiées pendant la période « 73-74/2008-2009 », régression unique	94
Figure 46	Variabilité des T.S.S saisonniers pour les stations étudiées pendant la période « 73-74/2008-2009 », régression unique	95
Figure 47	Variation des transports solides spécifiques à l'échelle journalière (régression saisonnière)	100
Figure 48	Hydrogramme de variations des transports solides spécifique à l'échelle journalière par régression saisonnière	101
Figure 49	Variations des transports solides spécifiques à l'échelle journalière (régression saisonnière), Ain Dalia	103
Figure 50	Variations des transports solides spécifiques à l'échelle journalière (régression saisonnière), El Azreg	103
Figure 51	Phénomènes d'hystérésis dans la relation entre débit Q et concentration en MES C au cours d'un évènement de crue : (a) hystérésis horaire et (b) hystérésis antihoraire.	105
Figure 52	Relations communes entre la concentration en sédiments en suspension (C) et le débit liquide (Q) ; Identification des stades successifs d'un épisode de fluidité et diagramme schématique expliquant l'évaluation des deux composantes : charge de base (Y S1) Et l'offre de nouvelles sources de sédiments, disponibles dans le bassin versant (Y S2).	107
Figure 53	Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued Mellegue amont à L'El Aouinet et Classification des relations C-Ql	116
Figure 54	Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued Chabro à Morsott et Classification des relations C-Ql	117

Figure 55	Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued Mellegue à Ouenza, et Classification des relations C-QL	118
Figure 56	Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues d'oued Medjerda à Ain Dalia, et Classification des relations C-QL	120
Figure 57	Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued K'sob à El Azreg, et Classification des relations C-QL.	120
Figure 58	Schéma méthodologique de l'approche PAP/CAR (PAP/CAR: Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes.)	122
Figure 59	Carte des classes des pentes du bassin de la Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR	124
Figure 60	Répartition des classes des pentes dans le bassin versant Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR	124
Figure 61	Carte des classes des litho-faciès du bassin versant de la Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR	126
Figure 62	Répartition des classes des litho-faciès du bassin versant de la Medjerda-Mellegue	126
Figure 63	Carte des classes d'érodibilité des matériaux du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR	128
Figure 64	Répartition des classes d'érodibilité du bassin de la Medjerda-Mellegue	128
Figure 65	Carte des classes de degré de couvert végétal du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR	130
Figure 66	Répartition des classes de couvert végétal du bassin l'oued Medjerda-Mellegue	130
Figure 67	Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le Modèle PAP/CAR	132
Figure 68	Répartition des classes d'occupation du sol du bassin l'oued Medjerda-Mellegue	132
Figure 69	Carte de protection des sols du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR	134
Figure 70	Répartition des classes des degrés de protection des sols dans le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue	134
Figure 71	Carte des états érosifs du bassin versant de l'oued Medjerda -Mellegue selon le modèle PAP/CAR	136
Figure 72	Pourcentage des degrés de protection des sols dans le bassin de l'oued	136
Figure 73	Carte des états érosifs du bassin versant d'oued Medjerda à Ain Dalia selon le modèle PAP/CAR	138
Figure 74	Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued Medjerda à Ain Dalia selon le modèle PAP/CAR	138
Figure 75	Carte des états érosifs du bassin versant d'oued Mellegue aval à Ouenza selon le modèle PAP/CAR	139
Figure 76	Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued Mellegue aval à Ouenza selon le modèle PAP/CAR	139

Figure 77	Carte des états érosifs du bassin versant d'oued Mellegue amont à El Aouinet selon le modèle PAP/CAR	140
Figure 78	Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued Mellegue amont à El Aouinet selon le modèle PAP/CAR	140
Figure 79	Carte des états érosifs du bassin versant d'oued El Hourhir à El Azreg selon le modèle PAP/CAR	141
Figure 80	Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued El Hourhir à El Azreg selon le modèle PAP/CAR	141
Figure 81	Carte des états érosifs du bassin versant de l'oued Chabro à Morsott selon le modèle PAP/CAR	142
Figure 82	Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant l'oued Chabro à Morsott selon le modèle PAP/CAR	142
Figure 83	Situation du barrage d'Ain dalia dans le bassin de la Medjerda	146
Figure 84	Profil de la digue du barrage	147
Figure 85	évacuateur de crue	147
Figure 86	Le coursier	148
Figure 87	Conception de l'ouvrage hydraulique (ANBT)	148
Figure 88	(photo de vue de tour de prise d'eau (KHENICHE ; Soufyane 2016)	150
Figure 89	Schéma explicatif des éléments du bilan hydraulique d'un barrage	152
Figure 90	La courbe des variations annuelles de la capacité en fonction des affluents et des défluent du barrage d'Ain Dalia	154
Figure 91	La courbe des variations annuelles des précipitations et de capacité du Barrage d'Ain dalia	155
Figure 92	La courbe des variations annuelles de vidange de fond du Barrage d'Ain Dalia	156
Figure 93	Bassins hydrographiques (ABH)	157
Figure 94	Localisation des barrages moyennement envasés	160

LISTE DES TABLEAUX :

N° Tableau	Titre de tableau	page
Tableau 01	Caractéristiques des unités hydrologiques de la Medjerda-Mellegue	10
Tableau 02	La répartition altimétrique du bassin d'oued Medjerda à Ain Dalia	12
Tableau 03	La répartition altimétrique du bassin d'oued Mellegue à Ouenza	12
Tableau 04	La répartition altimétrique du bassin d'oued Mellegue amont à El Aouinet	13
Tableau 05	La répartition altimétrique du bassin d'oued Chabro à Morsott	13
Tableau 06	La répartition altimétrique du bassin de L'oued K'sob à El Azreg	14
Tableau 07	Altitudes caractéristiques des sous bassins de la Medjerda	16
Tableau 08	Dénivelé simple des sous bassins de la Medjerda	16
Tableau 09	Classification du relief selon Ds et Ig	18
Tableau 10	Classification du dénivelé spécifique selon ORSTOM	18
Tableau 11	Valeurs des densités de drainage, des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations des eaux des sous bassins de la Medjerda-Mellegue	24
Tableau 12	Répartition de couvert végétale par type en (Ha)	26
Tableau 13	Caractéristiques des postes pluviométriques du bassin versant de la Medjerda Mellegue	36
Tableau 14	Caractéristiques des précipitations annuelles de Medjerda-Mellegue	40
Tableau 15	Variations saisonnières des précipitations dans le bassin de Medjerda-Mellegue	42
Tableau 16	Précipitations moyennes mensuelles période (1972/2012)	43
Tableau 17	Variation des caractéristiques des précipitations moyennes mensuelles (période 1972/2012).	45
Tableau 18	Valeurs des précipitations pour des périodes de récurrences données en année humide	47
Tableau 19	variation des pluies moyenne de Bassin par station	48
Tableau 20	Résultats de l'application aux bassins	50
Tableau 21	Résultats d'Application au bassins de méthode de Thissene	51
Tableau 22	Stations hydrométriques du bassin versant de la Medjerda	54
Tableau 23	Les données de concentration disponibles aux stations hydrométriques	56
Tableau 24	Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurées au stations	57
Tableau 25	Qualité des mesures des concentrations et des débits liquides (%)	58
Tableau 26	Débits brutes et spécifiques moyens annuels	60
Tableau 27	Débits spécifiques et lames d'eau écoulées	61
Tableau 28	Valeurs caractéristiques des modules au niveau des bassins versant	62
Tableau 29	Hydraulicité des sous bassins de la zone d'étude. (Medjerda-Algérie orientale)	63
Tableau 30	Bilans moyens annuels de l'écoulement aux différentes stations	64
Tableau 31	Évaluation de l'apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes	64
Tableau 32	Répartition des débits mensuels des sous bassins de la zone d'étude	66

Tableau 33	Modules caractéristiques en (m^3/s) pour les périodes de récurrence	76
Tableau 34	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) par régression « unique »	85
Tableau 35	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant de l'oued Chabro à Morsott	86
Tableau 36	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin versant à la station d'Ouenza	87
Tableau 37	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant l'oued Mellegue amont à El Aouinet	88
Tableau 38	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant l'oued Medjerda à Ain Dalia	88
Tableau 39	Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant l'oued K'sob à l'El Azreg	90
Tableau 40	Répartition des T.S.S annuels pour les stations étudiées, régression unique	92
Tableau 41	Répartition des T.S.S annuels pour les stations étudiées, régression saisonnière	92
Tableau 42	Répartition des T.S.S saisonnier pour les stations étudiées, régression 'Unique '	94
Tableau 43	Répartition des T.S.S saisonnier pour les stations étudiées, régression « saisonnière »	95
Tableau 44	Répartition des T.S.S mensuels pour les stations étudiées, régression unique	98
Tableau 45	Répartition des T.S.S annuels pour les stations étudiées, régression saisonnière	98
Tableau 46	Résultats des transports solides spécifique à l'échelle journalière par régression saisonnière	100
Tableau 47	Résultats des transports solides spécifique à l'échelle journalière par régression saisonnière	101
Tableau 48	Résultats des transports solides spécifique à l'échelle journalière par régression saisonnière	102
Tableau 49	Résultats des transports solides spécifique à l'échelle journalière par régression saisonnière	104
Tableau 50	Écart entre le TSS calculé par la régression saisonnière appliquée sur les débits moyens journaliers et les débits moyens mensuels	104
Tableau 51	Différentes classes d'hystérésis dans les relations MES-débit et leurs interprétations	106
Tableau 52	Description des formes des Hystérésis	109
Tableau 53	Chronologie des crues sélectionnées	113
Tableau 54	Répartition saisonnières des différentes classes	114
Tableau 55	Fréquence des différentes classes d'évolution de la relation C-QI des crues au niveau des stations étudiées	115
Tableau 56	Classes de pentes selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	123
Tableau 57	Classes de Litho-faciès selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	125
Tableau 58	Matrice d'érodibilité des sols selon le modèle PAP/CAR (Directives PAP/ CAR, 1998).	127
Tableau 59	Degrés d'érodibilité é selon le modèle PAP/CAR (Directives PAP/ CAR, 1998)	127

Tableau 60	Classes du degré de couvert végétal selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	129
Tableau 61	Classe d'occupation du sol selon le modèle PAP/CAR (PAP/ CAR, 1998)	131
Tableau 62	Matrice de protection des sols selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	133
Tableau 63	Classes du degré de protection des sols selon PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	133
Tableau 64	Matrice des états érosifs des sols selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	135
Tableau 65	Classes des états érosifs selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)	135
Tableau 66	Résultats quantitatives et qualitatives de l'érosion hydriques au niveau de La Medjerda-Mellegue	143
Tableau 67	Caractéristiques de la digue du barrage d'Ain Dalia (ANBT)	147
Tableau 68	Caractéristiques de la digue (barrage en chiffres)	149
Tableau 69	Caractéristiques de la retenue du barrage	149
Tableau 70	Caractéristiques de la galerie de dérivation	149
Tableau 71	Caractéristiques de la galerie de vidange	150
Tableau 72	Caractéristiques de la Tour de prise d'eau	150
Tableau 73	Bilan de régularisation inter annuelle du barrage d'Ain Dalia pour la période (1990-2015)	153
Tableau 74	les barrages dans « Constantinois - Seybouse – Mellegue » (ONS)	158
Tableau 75	Les barrages moyens envasés de l'Algérie septentrionale (Remini, b en 2017)	160

Liste des abréviations :

- **ANBT** : Agence Nationale des Barrages et transfert
- **ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
- **C** : Concentration des matières en suspension (g/l)
- **ESRI** : Environmental System Research Institute
- **FAO** : l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
- **GPS** : Global positioning system (Système de positionnement par satellites)
- **MEH-SAFER** : Modèle d'Érosion hydrique semi-aride de Forte Énergie de Relief
- **MES** : Matières en suspension
- **MNT** : Model numérique du terrain ou **DEM** (Digital élévation model)
- **NDVI**: Normalized Difference Vegetation Index.
- **ONM** : Office National de la Météorologie
- **O.R.S.T.O.M** : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, organisme.
Aujourd'hui remplacé par **I'IRD** (Institut de recherche pour le développement).
- **PAP/CAR** : Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires
- **Ql** : débit liquide (m³/s)
- **Qs** : débit solide
- **RUSLE** : Revised Universal Soil Loss Equation
- **SOGREAH**: Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques)
- **(SIG)** : Système d'Information Géographique
- **(SWAT)** : Soil and Water Assessment Tool
- **TSS** : transport solide spécifique (ton/km²/an)
- **UTM** : Universal Transverse Mercator

Introduction générale

Introduction générale

Dans les zones semi-arides, généralement couvertes d'une végétation clairsemée pendant la majeure partie de l'année, les précipitations sont souvent intenses et responsables d'une forte érosion et d'un apport important de sédiments (Langbein et Schumm, 1958 ; Scott et al., 2006). Par conséquent, une évaluation appropriée de l'érosivité des précipitations revêt une importance particulière en raison des effets négatifs causés par l'épuisement des nutriments et de la matière organique (Vörösmarty et al., 2003), et de la charge excessive de sédiments dans les eaux réceptrices des réservoirs (Dutta, 2016).

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 encore les pays en développement. 56% des pertes en sols sont attribuables à l'érosion hydrique, et 30% à l'érosion éolienne (FAO, 1994). Ce problème est très répandu en Algérie dont elle menace les potentialités en eau et en sol. Les particules solides détachées sont entraînées par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau, les barrages et aussi les retenues. Les matériaux transportés en suspension ou par charriage peuvent être quantifiés.

Les précipitations sont les principaux facteurs d'arrachement et de mobilisation des particules. Selon (Meddi et al., 2016), les fortes pluies menacent 14 millions d'hectares de terres arables, avec des conséquences qui affectent le stockage de l'eau, génèrent le ruissellement qui assure le transport des matières en suspension. Cependant, le couvert végétal, a une influence très importante sur le milieu, en protégeant les sols contre plusieurs problèmes diversifiés (glissement, mouvement de masse), Il joue un rôle essentiel sur le cycle hydrologique et le transport de matières.

L'Algérie dispose à fin septembre 2019, de 80 barrages achevés (dont 65 sont exploités) sur l'ensemble du territoire national avec une capacité totale de stockage de 8 milliards de mètres cubes, ces barrages reçoivent annuellement une quantité de vase estimée à 32 Hm³ (Remini, 2017) ; ces quantités de matières proviennent de l'accélération de l'érosion des bassins versants due aux conditions physiques, géomorphologiques, hydro climatiques et socio-économiques favorables. À cause des conséquences gênantes de ce phénomène, l'Algérie a déployé de grands efforts depuis l'indépendance pour réduire les dépôts dans les barrages, ce qui a engendré la prolongation de vie de plusieurs barrages. (Remini, 2005).

Pour mieux lutter contre ce phénomène, il est nécessaire d'identifier ses causes et ses conséquences. Il s'agit d'élaborer une carte des états érosifs et de localiser les zones à risques nécessitant prioritairement la réalisation de travaux d'aménagement contre l'érosion hydrique. La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour sa caractérisation qualitative (Boardman, 2006).

Grâce à la cartographie de l'érosion, il est possible d'incorporer ce phénomène comme facteur dans le processus d'aménagement du territoire, et plus particulièrement dans le processus de la gestion intégrée (Desmet et al. 1995). La capacité d'intégrer les deux méthodologies ; la cartographie de l'érosion et la gestion intégrée dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) facilite l'application de ces deux éléments comme outil perfectionné pour orienter les décisions en matière d'aménagement du territoire (Okoth, 2003).

Cette thèse vise à examiner le processus de production des sédiments et dégager les principaux facteurs et la relation entre les précipitations, l'écoulement et le sol, en se basant sur les résultats du modèle de régression $Qs=bQI^a$ et l'utilisation du modèle PAP/CAR dans le but d'élaborer un ensemble de cartes thématiques représentant les facteurs entrant dans le processus érosif, ainsi que l'établissement d'une carte synthèse d'état érosive dans le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue.

L'étude du bassin au barrage d'Ain dalia, pour but de quantifier l'envasement de l'ouvrage. La bathymétrie, réalisée en 2014 par l'ANBT, a révélé un taux d'envasement assez élevé estimé à 11,5% soit un taux annuel de 0,43%/an.

État des connaissances

De par sa position géographique au Nord-Est de l'Algérie, le bassin versant de la Medjerda fait partie des bassins méditerranéens et totalise une superficie entre l'Algérie et la Tunisie de 23700 km², dont 7841 km² en territoire algérien.

Il est caractérisé par un climat de type semi-aride, à aride. Les irrégularités des précipitations dans le temps et dans l'espace ont engendré 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 transport solide en suspension et de quantifier TSS. On notera les travaux de : (Demmak, 1982 ; Ghachi, 1982 ; Bourouba, 2003 ; Terfous, 2001, et 2003 ; Meddi, 1999 et 2004).

Le bassin versant de la Medjerda, a fait l'objet de plusieurs études, soit initiées par les pouvoirs publics, soit des études universitaires (thèses, mémoires).

- David. L, (1956), dans sa thèse a axé sur l'étude géologique des monts de la haute Medjerda.
- Demmak A, (1982) dans sa thèse, a axé sur la Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale, Univ. Paris, France.
- Mebarki A, (2005) dans sa thèse d'Etat, a étudié les apports annuels des cours d'eau et leur- disparité spatiale de l'Est algérien. Il a procédé à l'analyse des bilans de l'écoulement des débits d'étiage, des rejets et protection des hydro systèmes « méditerranéens ». Par ailleurs, l'auteur a utilisé des moyens modernes: analyse géostatistique de données sur Modèle Numérique de Terrain (M.N.T), Cartographie automatique.
- Belloula .M, (2008) dans son magister, a axé l'étude sur la Modélisation des écoulements et perspectives de prévention contre les risques d'inondation dans quelques bassins de la Medjerda (Confins Algéro-Tunisiens).
- DJABA. H, (2010) dans son Magister, a axé l'étude sur les ressources en eau et perspectives de gestion intégrée dans le bassin versant de la Medjerda (Souk-Ahras Nord-Est d'Algérie).

Dans le monde plusieurs études ont été menées sur la même thématique, nous citerons les études suivantes:

- GOUBERT E., MENIER D. (2005), dans leurs rapports : étude de l'évolution morpho-sédiment logique de l'estuaire de la vilaine de 1960 à 2003 (valorisation des campagnes bathymétriques).
- BERTRAND, M., (2009), dans son Master a fait une étude de la caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l'Arc en Maurienne. Mise en place d'un Système d'Information Géographique, analyse spatiale et segmentation de l'espace, Université Jean Monnet, St-Etienne.
- FOUGERIT, V. (2011). Dans son rapport a fait une étude Caractéristiques des flux hydro-sédimentaires sur le bassin de l'Arvan et modélisation, École Centrale Paris.

Organisation de la thèse : cette thèse est rédigée en six chapitres

- ✓ **Premier Chapitre :** présentation du cadre physico- géographique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue (orographie, géologie, morphométrie, couvert végétal, sol) et leur interaction dans le comportement hydrologique de ce bassin.
- ✓ **Deuxième chapitre :** il porte sur l'étude de la pluviométrie pour découvrir la lame d'eau précipitée et l'action des pluies sur le phénomène d'érosion dans les sous bassins jaugés d'étude.
- ✓ **Troisième chapitre :** l'étude du comportement hydrologique basée sur le traitement statistique des données hydrométriques, met en lumière les aspects fondamentaux de l'écoulement et l'évaluation des apports liquides annuels, saisonniers, mensuels, et des crues dans le bassin concerné.
- ✓ **Quatrième chapitre :** aborde l'étude des régressions qui lient les débits liquides, les concentrations, les débits liquides et les débits solides (Q_l-C et Q_l-Q_s). La modélisation permettra par la suite d'évaluer les quantités des sédiments transportés et de préciser la dynamique érosive durant les crues par le phénomène des hystérésis 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.
- ✓ **Cinquième chapitre :** a pour objet de cartographier et d'estimer l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue par le modèle PAP /CAR intégré dans le SIG. Les résultats obtenus seront comparés avec des calculs empiriques qui ont été faits au niveau des bassins jaugés.
- ✓ **Sixième chapitre :** aborde l'étude du bilan de régularisation du barrage et l'estimation de la vase déposée dans la retenue d'Ain dalia.
- ✓ Enfin, la conclusion générale fait une synthèse des principaux résultats.

CHAPITRE I :

***Caractéristiques physico-
géographiques du bassin versant de la
Medjerda-Mellegue »***

1. Introduction

Dans les bassins versants du Nord-Est Algérien la détermination des caractéristiques physiques du milieu est très utile car elle permet d'expliquer l'ampleur et l'évolution du processus d'érosion sur les versants. C'est pourquoi, nous avons consacré ce chapitre à l'étude des caractéristiques physiques du bassin versant de Medjerda-Mellegue, pour montrer l'influence des facteurs naturels et humains, sur le régime des cours d'eau, et d'autre part, sur l'érosion ainsi que sur le transport solide et la stabilité du milieu.

I.2 Le bassin versant

Un bassin versant ou un bassin hydrographique est une zone de la terre drainée par un cours d'eau et ses affluents (CE, 2000), (Figure 30). L'ensemble des eaux qui tombent sur cet espace convergent vers un même point de sortie appelé exutoire.

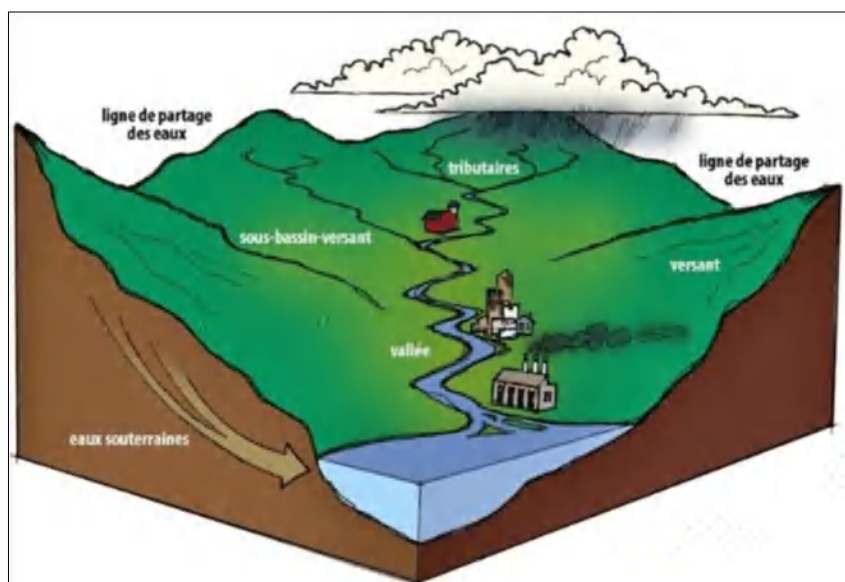


Figure 01: Schéma d'un bassin versant

(Source : Office national de l'eau et des milieux aquatiques ONEMA, France)

Dans un bassin versant, l'eau se fraye des chemins sur et dans le sol et prend en charge des particules solides comme des fractions minérales, de la matière organique ainsi que de la matière dissoute.

Les actions menées en amont d'un bassin versant, comme les aménagements inadaptés et les mauvaises pratiques agricoles peuvent fortement accentuées ou diminuer la qualité des eaux du ruissellement. Ainsi, les pratiques agricoles à risques se répercutent, généralement, en aval et la multiplication de petites perturbations peuvent modifier considérablement la réponse hydrologique en aval en termes de volume d'eau et matières associées.

I.2.1 Le sol

Le sol joue un rôle prépondérant sur le cycle de l'eau et sur l'émission des éléments chimiques vers l'eau. Il joue un rôle sur le partage entre infiltration et ruissellement. Il joue le rôle de réserve en eau pour les plantes et de milieu pour les êtres vivants présents dans le sol. Il est au cœur des transferts d'eau entre l'atmosphère, les nappes d'eau souterraine et les cours d'eau. Le sol stocke et transforme de nombreux produits épandus au sol, qu'ils soient solides ou liquides, minéraux ou organiques, d'origine agricole, industrielle ou urbaine. Les sols des zones humides, saturés en eau en hiver, ont un rôle tampon d'un point de vue hydrologique, permettant l'extension latérale de la nappe, et hydro-chimique, favorisant les transformations biogéochimiques en lien avec les battements de nappe.

I.2.2 Les précipitations

Sous l'impulsion des vents, les nuages se déplacent dans l'atmosphère. Lors d'un changement climatique et par effet de gravité, les nuages s'alourdissent et retombent sur le sol sous forme d'eaux pluviales, de grêle ou de neige, 79 % des précipitations tombent sur les océans et les 21 % restants sur la terre et alimentent les nappes phréatiques, soit par infiltration, soit par ruissellement. Un peu moins de la moitié des précipitations va servir à recharger les nappes souterraines, le reste repart en évaporation (Musy et al, 2014). L'eau qui ne parvient pas à s'infiltrer directement dans le sol, ruisselle le long des pentes pour se jeter ensuite dans les lacs et les rivières. Cette eau suivra le cours pour rejoindre les mers et les océans. Toutes les eaux issues du ruissellement (ruisseaux, rivières, fleuves, lacs) sont appelées cours d'eau de drainage. L'eau dans la nappe peut stagner jusqu'à des milliers d'années avant de retourner dans les océans.

I.2.3 L'évaporation

L'évaporation est un phénomène de changement de phase lent de l'état liquide vers l'état gazeux d'un liquide à une température inférieure à la température d'ébullition à la pression ambiante (Forestier, 2011).

Les facteurs qui conditionnent l'évaporation sont les suivants : les rayonnements solaires et atmosphériques, la température de l'eau et de l'air, l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, le vent, la profondeur et la dimension des nappes d'eau, la qualité de l'eau et les caractéristiques du bassin (exposition des versants au soleil, au vent, pentes, sol...etc.).

I.2.4 L'interception et le stockage dans les dépressions

L'interception est le processus par lequel une partie des précipitations est captée et retenue par la végétation puis évaporée sans avoir atteint la surface du sol. Son importance et souvent marginale et donc souvent négligée sous climat semi-aride où la végétation est éparse. Le stockage est l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une averse. Comme l'interception, le stockage dans les dépressions est, souvent associé aux pertes.

CHAPITRE. I : Caractéristiques physico- géographique du bassin versant de la Medjerda-Melleque »

La rétention d'eau varie considérablement. Elle peut atteindre jusqu'à 30% de la précipitation totale pour une forêt mixte, 25% pour les prairies et 15% pour les cultures (André et Christophe, 2004). L'effet respectif de l'interception et du stockage dans les dépressions est très variable et diminue au cours de l'averse. Il provoque en général un retard dans le démarrage et la réaction hydrologique qui peut être perçue à l'exutoire du bassin.

I.2.5 L'infiltration

En hydrologie, l'infiltration est le processus par lequel les précipitations ou l'eau pénètrent dans les sols souterrains et se déplacent dans les roches à travers les fissures et les pores. La majeure partie de l'eau de pluie et de la neige fondue finit par s'infiltrer. L'eau peut être absorbée par le sol et y rester longtemps jusqu'à ce qu'elle s'évapore progressivement. Si la végétation est abondante, l'eau infiltrée puis absorbée par les racines des plantes et transpirée plus tard. L'infiltration se produit dans les couches supérieures du sol mais peut aussi se poursuivre plus bas dans la nappe phréatique.

I.2.6 Les écoulements

La pluie ou la fonte des neiges excessives peuvent produire un écoulement de surface vers les ruisseaux et les fossés. En hydrologie de surface, le terme " écoulement " désigne exclusivement la circulation de l'eau dans le réseau hydrographique. Il s'agit d'un phénomène qui peut se quantifier par des mesures directes de débits. En dehors du réseau hydrographique, on parle de ruissellement, pour qualifier un écoulement de surface se produisant exclusivement sur les versants.

I.2.7. Le cycle hydrologique

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est un phénomène naturel qui représente le parcours entre les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou de vapeur d'eau sur Terre à partir des océans, de l'atmosphère, des lacs, des cours d'eau et nappes d'eaux souterraines ou encore des glaciers (Figure 02). Le « moteur » du cycle est l'énergie solaire qui favorise l'évaporation de l'eau et entraîne l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau (Laborde 2009). Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées variables. Une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années (Laborde, 2009).

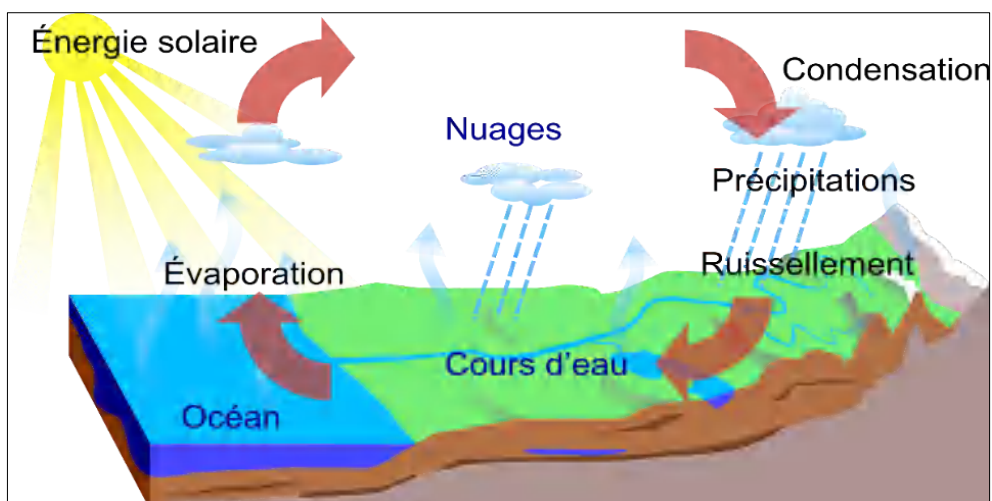


Figure 02 : Le cycle hydrologique de l'eau
(Source : <https://fr.science-questions.org>)

I.3 Aperçu général sur le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Le bassin d'intérêt prend le code 12 d'après l'ANRH. Le bassin versant de Medjerda qui s'étale entre l'Algérie et la Tunisie occupe une superficie de 23700 km² dont 7841 km² en territoire algérien entre les méridiens de 7°14' Est et 8°25' et les parallèles 35°25' et 36°47' Nord. Ce dernier est bordé au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois, à l'Ouest par les bassins d'oued Seybouse et des Hauts Plateaux Constantinois, au Sud par le bassin de Chott Melghrir, et à l'Est par la Tunisie. Ce bassin est aussi traversé par un des principaux oueds maghrébins, l'oued Medjerda au Nord et l'oued Mellegue au Sud. Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-Ouest Nord-Est (Figure 03).

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.

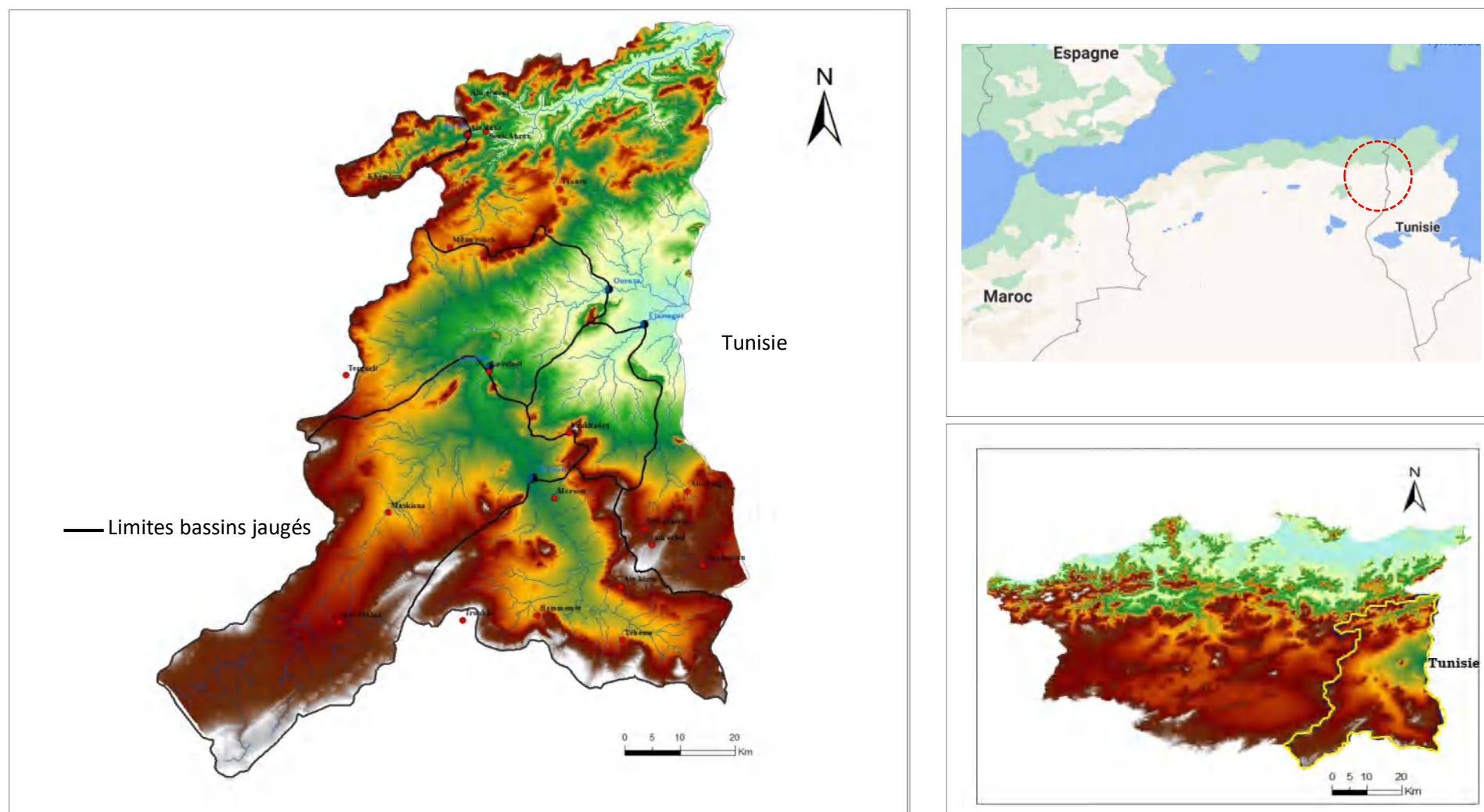


Figure 03 : Situation géographique de la zone d'étude (Medjerda-Mellegue)

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 m, projection (WGS84 /zone 32)

I.3.1Caractéristiques géométriques

La forme du bassin affecte l'hydrogramme afférent à une averse donnée et en particulier le débit de pointe à l'exutoire dudit bassin. Plusieurs efforts ont été déployés afin de développer un facteur permettant de décrire la forme d'un bassin versant. Les bassins tendent en général vers la forme d'une " poire plus ou moins ovale". Cependant des contraintes géologiques peuvent modifier cette forme. Plusieurs indices sont utilisés pour décrire la forme d'un bassin, tels que la surface et le périmètre qui représentent les éléments les plus importants.

I.3.1.1Indice de compacité de Gravelius (K_G)

Cet indice, comme son nom l'indique, présente la plus ou moins grande compacité du bassin. Autrement dit, ce paramètre doit rendre compte la plus ou moins grande vitesse de concentration, à l'exutoire, des eaux de ruissellement en provenance des diverses parties dudit bassin. L'indice de compacité est donné par : ($K_g = 0,28(\frac{P}{\sqrt{A}})$)

Où

A. la superficie (Km^2)

P. le périmètre stylisé (Km) du bassin.

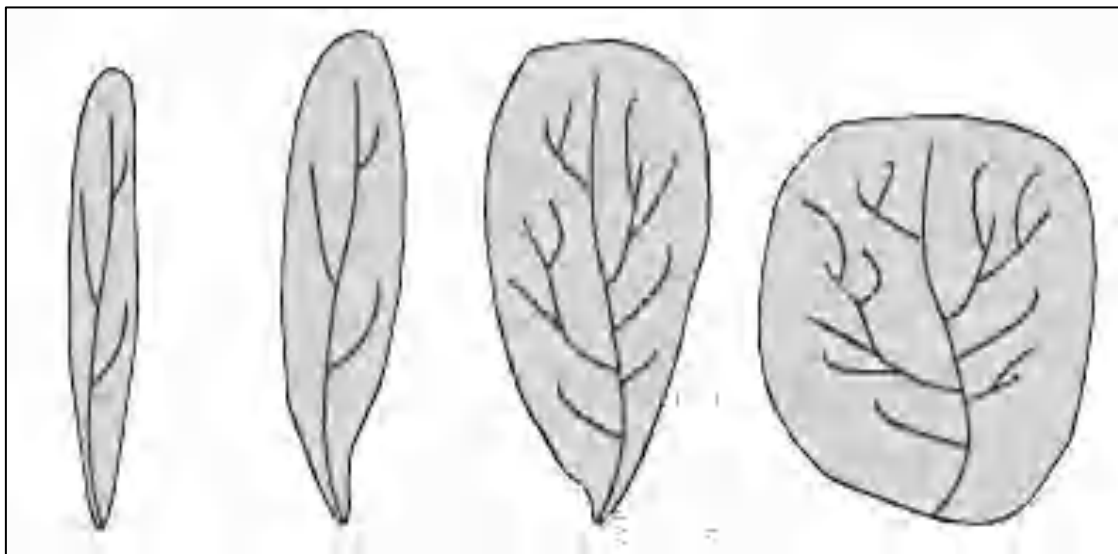


Figure 04 : Variation de l'indice de **Gravelius** en fonction de la forme du bassin

<https://www.medhycos.mpl.ird.fr>

A titre indicatif, cet indice est égal à **1** pour un cercle et **1.128** pour un carré, et plus indique un rectangle. Les valeurs de l'indice de compacité (tableau 01) montrent que le bassin d'oued El Azreg est le plus compactes ($K_g < 1.4$), alors que les bassins les plus allongés correspondent à celui d'Ouenza ; El Aouinet ; Morsott et Ain Dalia ($K_g = 1.46$ à $1,7$). Outre ces données extrêmes toutes les autres valeurs sont très rapprochées, les formes des bassins correspondants étant donc plus ou moins semblables.

I.3.1. 2 Superficie

Ce paramètre est mesuré directement à partir du MNT à l'aide des logiciels (MapInfo, Global-mapper et Arc-Gis), la surface totale est de de **7841** km² (en détail les sous bassins jaugés, Ouenza (4534 km² comprend El Aouinet et Morsott), El Aouinet (3226 Km² comprend Morsott), Morsott (1313 km²), El Azreg (509,13 km²), Ain Dalia (193 dont 213 km²), soit 70% de la Medjerda.

I.3.1.3 Longueur du rectangle équivalent

Pour apprécier la forme (Belloula,2017), et par la suite les dimensions, du bassin versant, on assimile ce dernier à un rectangle ayant la même superficie, le même périmètre et la compacité. Ce rectangle, appelé rectangle équivalent, est caractérisé par sa longueur (L en Km) qu'on peut calculer à l'aide de la formule ci-dessous :

$$L = \frac{Kg\sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kg}\right)^2}\right)$$

I.3.1.4 Largeur du rectangle équivalent

Outre le périmètre et la superficie, la largeur moyenne (l) en (Km) du bassin versant constitue un autre paramètre géométrique. Elle obtenue par la relation suivante.

$$l = \frac{Kg\sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1,12}{Kg}\right)^2}\right)$$

Tableau .01 : Caractéristiques des unités hydrologiques jaugées de la Medjerda-Mellegue

<i>Nom de bassin</i>	<i>Ain Dalia</i>	<i>El Azreg</i>	<i>Morsott</i>	<i>El Aouinet</i>	<i>Ouenza</i>
Code ANRH	12-01 -01	12-05-15	12-03-09	12-04-04	12-04-01
Surface (km²)	193	509	1313	3526	4534
Périmètre km	72,37	110,9	202,7	360	440
Kg (indice)	1,46	1,38	1,57	1,7	1,83
L (km)	29,47	43,53	85,49	156	195,59
l (km)	6,55	11,69	15,36	22,60	23,18

Les sous bassins de la Medjerda Mellegue présentent, dans l'ensemble, une forme allongée. L'influence du relief est déterminante.

I.3.1.5 Hypsométrie

Les caractéristiques du système altimétrique jouent un rôle important dans la description d'un bassin versant et la compréhension de son comportement hydrologique(Guesri,2021), car la principale force qui affecte l'écoulement de surface est la gravité. Et, de ce fait, plusieurs processus hydrologiques dépendent directement des caractéristiques altimétriques. De même, les conditions climatiques locales sont influencées par la variabilité altimétrique et de l'écoulement résultant d'un événement pluvieux (Musy & Higy, 2004).

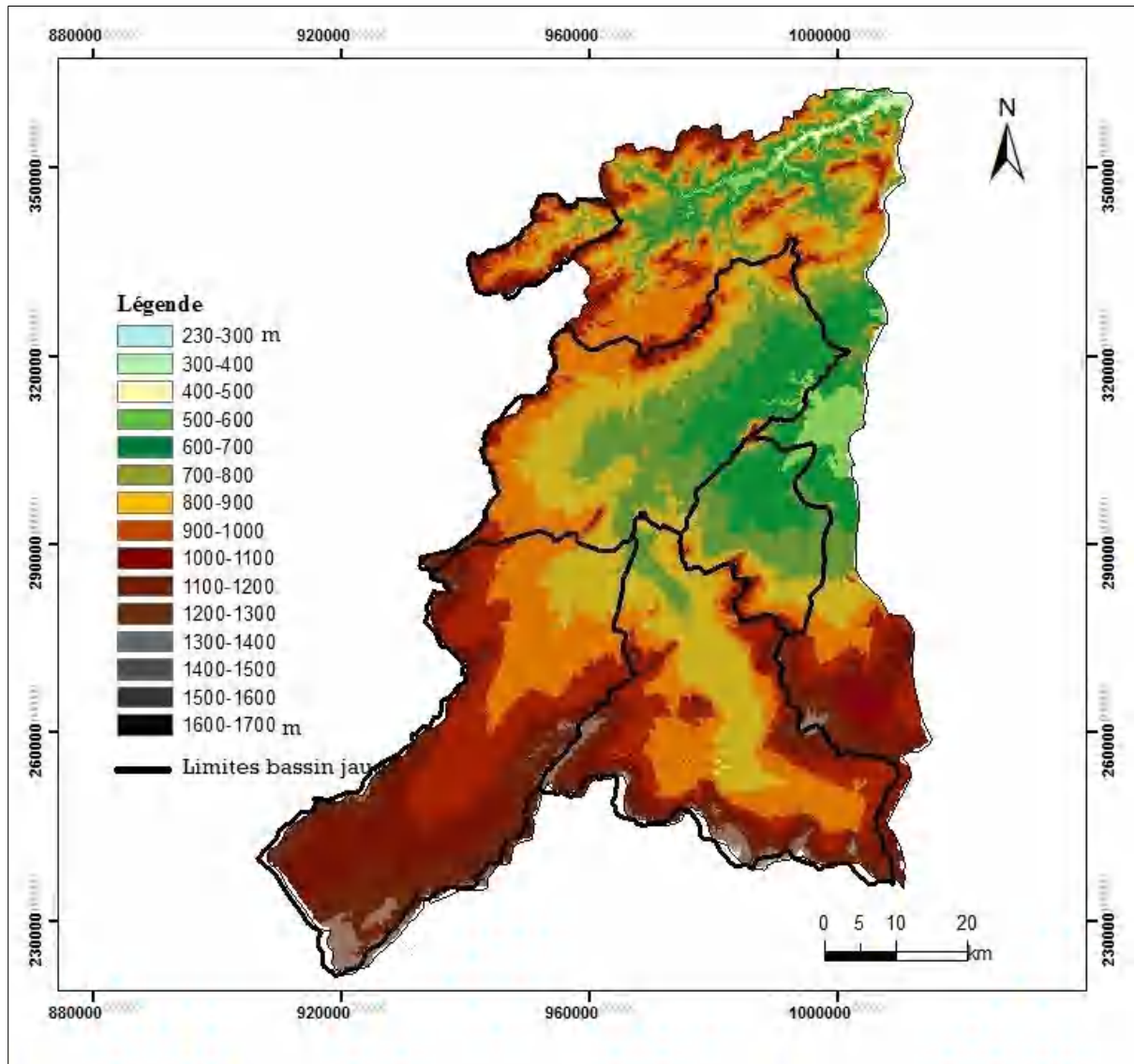


Figure 05 : Carte hypsométrique de la Medjerda-Mellegue

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, Projection (WGS84 /zone 32)

a) - Oued Medjerda à Ain Dalia

Le bassin d'oued Medjerda à Ain Dalia, d'une superficie de 193 km² est caractérisé par des pentes assez abruptes dépassant généralement 25% aux abords de l'oued. Au Nord et au sud du bassin les pentes sont faibles à moyennes (de 3% à 12%). Le relief de la région d'étude est assez accidenté situe au Nord et au Sud. On distingue deux types de zone dans ce relief :

- 1.Zones de montagne (massifs de Ras El Alia, Tiffech)
- 2.Zones de plaine (plaine de Tiffech, M'daourouch).

Tableau 02. La répartition altimétrique du bassin d'oued Medjerda à Ain Dalia

Altitude (m)	ai (km ²)	ai (%)	ai cumulé	ai % cumulé
1200-1298	1,4	0,7253886	1,4	0,7253886
1100-1200	4,1	2,12435233	5,5	2,84974093
1000-1100	25,28	13,0984456	30,78	15,9481865
900-1000	52,68	27,2953368	83,46	43,2435233
800-900	59,4	30,7772021	142,86	74,0207254
700-800	41,46	21,4818653	184,32	95,5025907
627-700	8,68	4,49740933	193	100
TOTAL	193	100		

Le tableau montre la classe dominante celle de 800 à 1000m par 57%, et de 700 à 800m 21%, La forme de la courbe est caractéristique d'un bassin à l'état de jeunesse allant vers l'équilibre, d'où un potentiel érosif assez important.

b) - Oued K'sob à El Azreg

L'unité hydrologique (Bassin de l'oued K'sob à El Azreg) se caractérise par des reliefs moyens (500-700m) soit 64 % de la surface du bassin et des pentes modérées de la classe 0 à 5%, elle englobe la zone de piedmont et une grande partie de de la plaine.

Tableau.03. La répartition altimétrique du bassin de L'oued K'sob à El Azreg

Altitude(m)	ai (km ²)	ai (%)	ai cumulé	Ai en % (cumulé)
1400-1410	0,008	0,001	0,008	0,00157171
1300-1400	0,184	0,036	0,192	0,03772102
1200-1300	0,49	0,096	0,682	0,13398821
1100-1200	1,268	0,24	1,95	0,38310413
1000-1100	5,6	1,10	7,55	1,48330059
900-1000	18,1	3,5	25,65	5,03929273
800-900	45,55	8,94	71,2	13,9882122
700-800	90,46	17,77	161,66	31,7603143
600-700	172,8	33,94	334,46	65,7092338
500-600	159,7	31,37	494,16	97,0844794
462-500	14,84	2,91	509	100
TOTAL	509	100		

c)- Oued Chabro à Morsott

Le fossé d'effondrement qui occupe une grande partie sur la région de Tébessa et orienté Sud-Ouest, Nord- Est ouvert au Nord est sur la plaine de Morsott et changer d'orientation en sud-Ouest en allant vers la frontière Tunisienne, se prolongé ainsi de Bakkaria à El Kasrine en Tunisie.

Tableau.04. La répartition altimétrique du bassin d'oued Chabro à Morsott

Altitude (m)	ai (km ²)	ai (%)	ai (cumulé)	ai en % (cumulé)
1600-1624	0,09	0,006854532	0,09	0,00685453
1500-1600	2,82	0,214775324	2,91	0,22162986
1400-1500	14,19	1,08073115	17,1	1,30236101
1300-1400	36,8	2,802741813	53,9	4,10510282
1200-1300	77,2	5,87966489	131,1	9,98476771
1100-1200	147,2	11,21096725	278,3	21,195735
1000-1100	186,1	14,17364813	464,4	35,3693831
900-1000	282,1	21,48514851	746,5	56,8545316
800-900	337,1	25,67402894	1083,6	82,5285605
703-800	229,4	17,47143945	1313	100
TOTAL	1313	100		

Il est bordé par des accidents majeurs ayant joué en faille normales au moins dès le crétacé inférieure. Les pentes au niveau du bassin sont en majorité fortes, 30 % de la superficie est à pente de 15 à 25%. Cette classe de pente est localisée principalement au Nord-Est et au Sud du bassin correspondant à la zone montagneuse (les montagnes de Tébesa). Au niveau du Le fossé d'effondrement qui occupe une grande partie sur la région, les pentes s'adoucissent et oscillent entre 0 et 3% occupant environ de 45 % de la superficie du bassin. À partir de cette zone, les pentes augmentent pour atteindre des valeurs de 3 à 12% s'étalant sur le reste de la superficie du bassin.

d)- Oued Mellegue amont à El Aouinet

Le bassin versant occupe une superficie de 3221 Km² avec une altitude maximale de 1624 m. La longueur du thalweg principal est de 115 km.

Tableau 05 : La répartition altimétrique du bassin d'oued Mellegue amont à El Aouinet

Altitude (m)	ai (km ²)	ai (%)	ai (cumulé)	ai en % (cumulé)
1500-1624	3,2	0,09	3,2	0,09
1400-1500	21	0,59	24,2	0,69
1300-1400	120,7	3,42	144,9	4,11
1200-1300	212,5	6,02	357,4	10,14
1100-1200	419,15	11,88	776,55	22,02
1000-1100	651,58	18,47	1428,13	40,50
900-1000	721,49	20,46	2149,62	60,96
800-900	742,18	21,04	2891,8	82,01
700-800	538,6	15,27	3430,4	97,29
614-700	95,6	2,71	3526	100
TOTAL	3526	100		

CHAPITRE. I : Caractéristiques physico- géographique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue »

La superficie de ce dernier est répartie entre les classe d'altitudes 800-900 ,900-1000, et 1000-1100, respectivement (21%,20%,18%). La tranche des hautes altitudes de 1400 à1600 constituées qu'environ de 1% de la surface du bassin,

e) - Oued Mellegue à Ouenza

Le bassin jaugé d'**oued Mellegue à Ouenza** occupe une superficie de 4534 km². Le relief assez varié est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées. La longueur du thalweg principal est de 158 km.la classe de700 à100m constitue 56% de la surface totale du bassin versant.

Tableau 06 : La répartition altimétrique du bassin d'oued Mellegue à Ouenza

Altitude (m)	ai (km²)	Ai (%)	ai (cumulé)	ai en% (cumulé)
1500-1624	3,37	0,07	3,37	0,00
1400-1500	21	0,46	24,37	0,01
1300-1400	121	2,67	145,37	0,03
1200-1300	212,12	4,68	357,49	0,08
1100-1200	424,86	9,37	782,35	0,17
1000-1100	667,93	14,73	1450,28	0,32
900-1000	788,03	17,38	2238,31	0,49
800-900	965,3	21,29	3203,61	0,71
700-800	820,08	18,09	4023,69	0,89
600-700	372,5	8,22	4396,19	0,97
500-600	136,3	3,01	4532,49	1,00
483-500	1,51	0,03	4534	1,00
TOTAL	4534	100		

L'accentuation de pente de la courbe vers les basses altitudes indique que la partie amont du bassin d'oued Mellegue est bien occupée par la plaine importante de Meskiana et la plaine d'Ouenza.

Vers les hautes altitudes, le relief accentué à l'amont du bassin est bien mis en évidence par la forme de la courbe hypsométrique. Les pentes sont en général très accentuées, dépassant les 25% au niveau des zones montagneuses. Entre ces zones à relief fort, on retrouve des pentes plus douces (entre 0 et 10%). Cette zone plus ou moins aplatie est localisée.

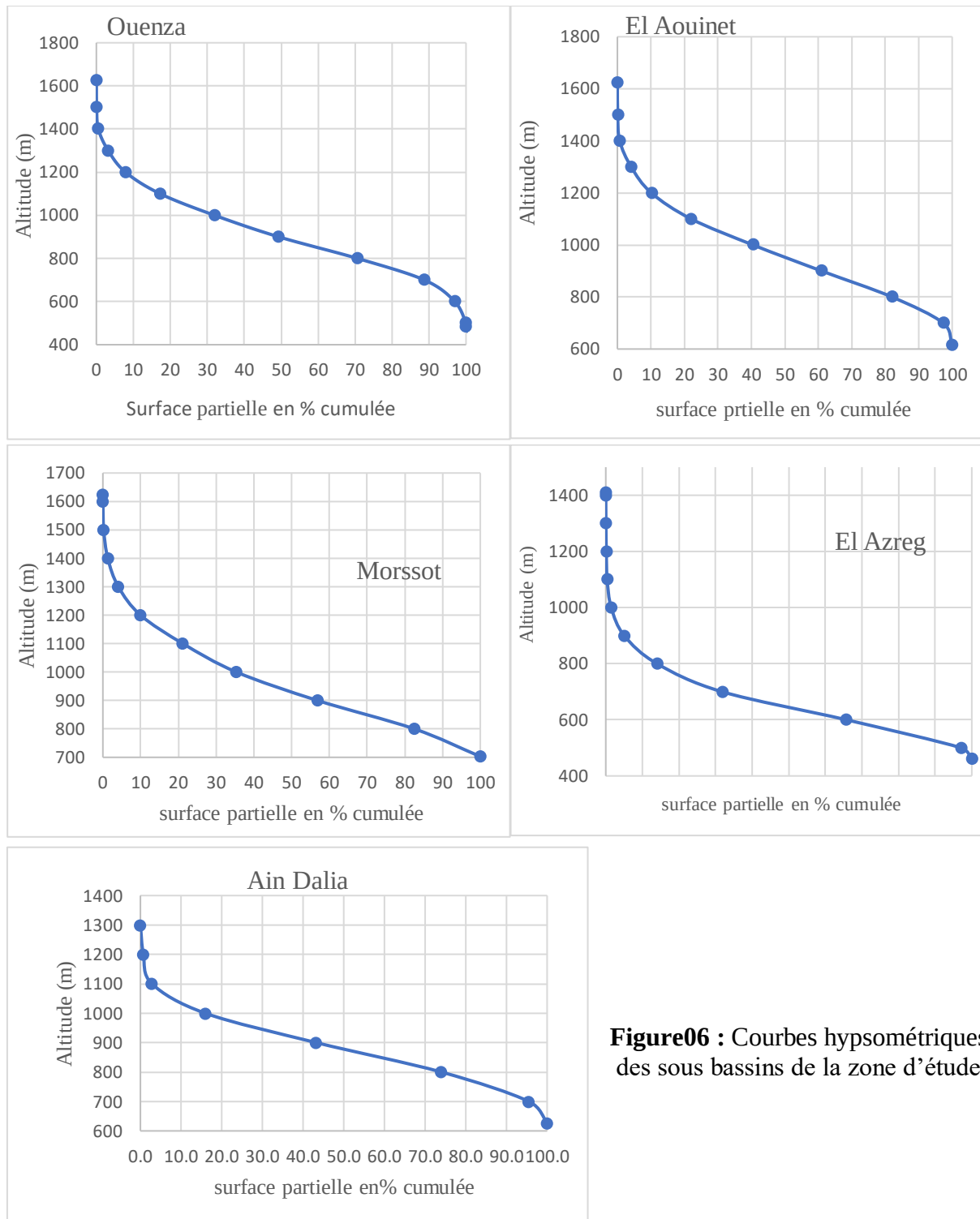


Figure06 : Courbes hypsométriques des sous bassins de la zone d'étude

L'élévation maximale d'un bassin versant représente la plus haute altitude au-dessus du niveau de la mer. Tandis que l'altitude minimale considère exutoire. Ces deux paramètres deviennent particulièrement importants lors de l'élaboration d'équations impliquant des variables climatiques telles que la température, les précipitations et la couverture neigeuse. Ils sont également utilisés pour déterminer l'amplitude altimétrique du bassin versant et le calcul de sa pente.

I.3.1.6 L'altitude moyenne

L'altitude moyenne d'un bassin versant peut-être déduite directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture de la carte topographique. L'altitude moyenne d'un bassin versant est souvent utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques et peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N si \frac{(hi + hi + 1)}{2}$$

Où

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin [m] ;

Si : Superficie de la zone comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

hi : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : Superficie totale du bassin versant [km²].

Tableau 07 : Altitudes caractéristiques des sous bassins de la Medjerda Mellegue

Nom des bassins jaugés	L'Altitude la plus fréquente	H 50 % (m)	H95 % (m)	H moyennes (m)
Ain Dalia	800-900	1080	700	882,89
Morsott	800-900	1280	740	961,82
El Aouinet	800-900	1280	720	968,01
El Azreg	600-700	900	510	666,52
Ouenza	800-900	1240	630	899,97

I.3.1.7 Dénivelée simple

Ce paramètre est défini comme étant la différence d'altitude : **$D = H_{5\%} - H_{95\%}$**

Tableau .08 : Dénivelée simple des sous bassins de la Medjerda

Nom des bassins jaugés	H 50 % (m)	H95 % (m)	Dénivelée simple. D en (m)
Ain Dalia	1080	700	380
Morsott	1280	740	540
El Aouinet	1280	720	560
El Azreg	900	510	390
Ouenza	1240	630	610

I.3.2 Indices des pentes

I.3.2. a) - La pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne est un paramètre important car il nous offre des informations sur la topographie du bassin versant. Il est considéré comme une variable indépendante et donne une bonne indication du temps de parcours du ruissellement direct et donc du temps de concentration (**tc**) est à une influence directe sur le débit de pointe après une pluie.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne des bassins versants, toutes basées sur la lecture d'une carte topographique exacte ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D \cdot L}{A}$$

Où :

i_m : est la pente moyenne [m/km] ou en [‰] ;

L : est la longueur totale des courbes de niveau [km] (à ne pas confondre avec la longueur du rectangle équivalent) ;

D : est l'équidistance entre les courbes de niveau [m] ; et **A** est la surface du bassin versant [km²].

I.3.2. b) L'indice de pente de Roche I_p

Les méthodes précédentes donnent de bons résultats dans le cas de reliefs modérés et lorsque les lignes de contour sont simples et régulièrement espacées. Cependant, lorsque les courbes de niveau se tordent et tournent, il est difficile de déterminer leur longueur totale L . Afin de surmonter ce problème et les incertitudes qui résultent du lissage des courbes de niveau. Roche (1963) a proposé un indice de pente basé sur le rectangle équivalent et la courbe hypsométrique du bassin versant. L'idée est d'appliquer la méthode du rectangle équivalent à chaque ligne de contour dans le bassin versant, de sorte que chaque ligne de contour soit transformée géométriquement en lignes droites parallèles sur le rectangle équivalent. L'indice de pente I_p est exprimé en pourcentage sous la forme :

$$i_p = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{n_i \cdot (a_i - a_{i-1})}{L}}$$

Où :

n_i est la fraction de la surface totale entre deux courbes de niveau consécutives de l'altitude (**a_i** et **a_{i-1}**) ;

L est la longueur du rectangle équivalent.

I.3.2. c) L'indice de pente global (Ig)

Cet indice également basé sur l'équation décrit la distribution des altitudes du bassin versant (c'est-à-dire la courbe hypsométrique), est l'indice de pente global, qui est exprimé en m/km et défini comme :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Où, $H_{5\%}$, $H_{95\%}$ sont les fractiles de 5% et 95% de la courbe hypsométrique du bassin, et L est la longueur du rectangle équivalent.

I.3.2. d) Dénivelée spécifique (Ds)

L'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient, elle dérive de la pente globale I_g en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à $\sqrt{A}$

$$D_s = I_g * \sqrt{A}$$

Où : I_g : Indice de pente global (m/Km).

A : aire du bassin (km²).

Tableau 09 : Classification du relief selon D_s et I_g

$D_s < 10 \text{ m}$	Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{ m/km}$	Relief très faible
$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$	Relief faible
$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$	Relief assez faible
$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$	Relief modéré
$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$	Relief assez fort
$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$	Relief fort
$D_s > 500$	Relief très fort	$0.5 \text{ m/km} < I_g$	Relief très fort

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D_s = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L). Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins.

Tableau 10 : Classification du dénivelé spécifique selon ORSTOM

Nom des bassins jaugés	« D_s »	Relief selon « D_s »
Ain Dalia	179,14	Relief assez fort
ElAzreg	202,13	Relief assez fort
Morssot	228,88	Relief assez fort
El Aouinet	212,58	Relief assez fort
Ouenza	210,01	Relief assez fort

Toutes les valeurs de D_s ($179.14 < D_s < 228.8$), ce qui permet de les ranger dans la classe de relief assez fort.

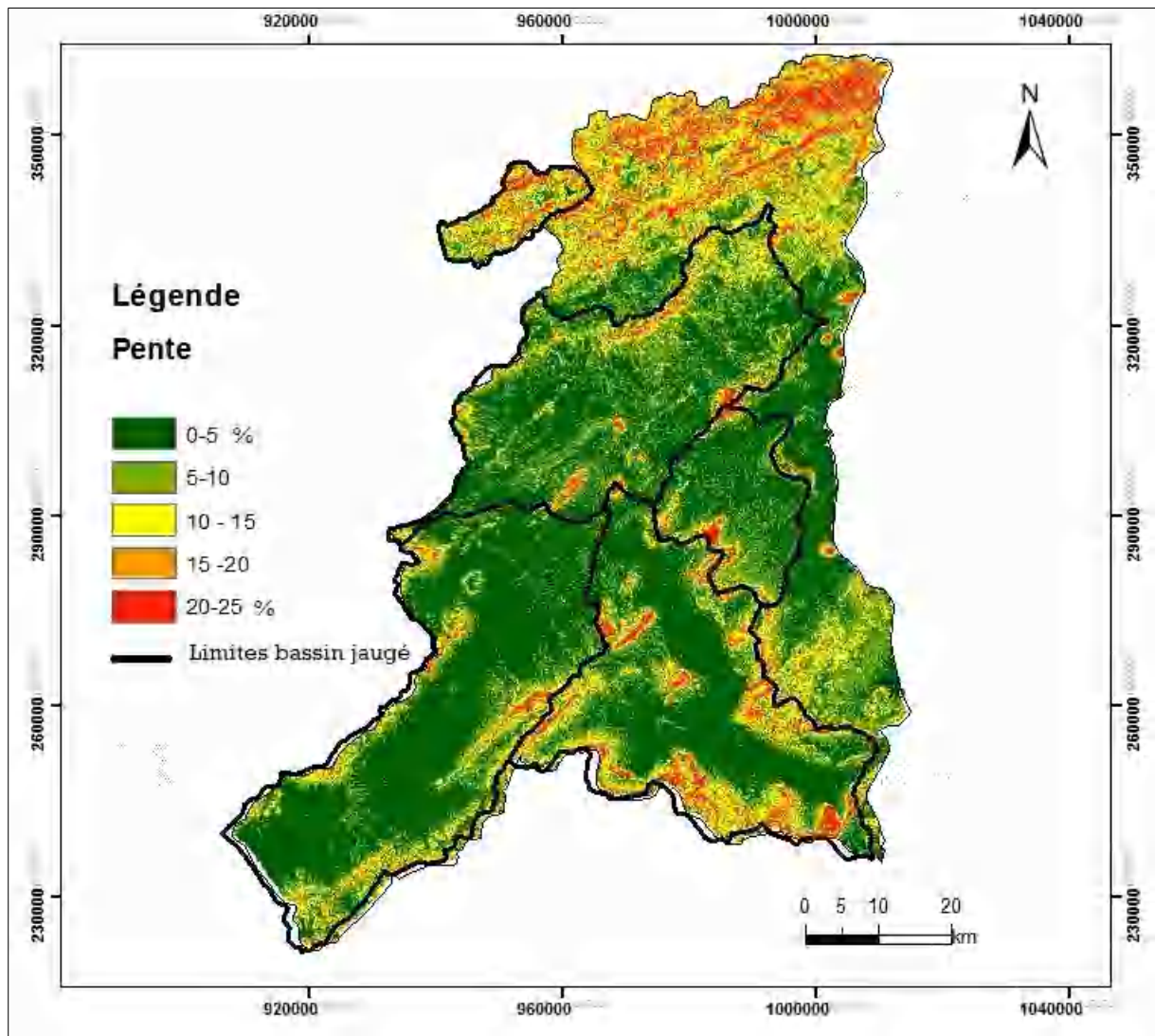


Figure 07 : Carte des pentes du bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

I3 3 Les classes des pentes

Classe 1 : Les pentes comprises entre 0% et 5 %, elle représente la plus grande partie 53% de la surface de bassin. Elle occupe la majorité du moyen et base Medjerda (Mellegue Amont et Meskiana).

Classe 2 : C'est la classe des pentes 5% et 10 %, une partie moyennement grande. Elle occupe 29% de la surface du bassin.

Classe 3 : Les pentes comprises entre 10% et 15%, elles occupent 10% de la surface globale et concernent les zones des pieds mont et surtout la partie nord du bassin où l'absence du couvert végétal favorise l'accélération de ruissellement.

Classe 4 : C'est la classe de fortes pentes supérieures à 25%, elles occupent 8% par rapport à la surface totale, on les trouve surtout dans les sommets (Massifs de Ouenza) et (Monts de Zoïu, djebel Doukhān, etc.).

I.3.4 Caractéristiques du réseau hydrographique

L'analyse du réseau de drainage consiste à quantifier l'organisation topologique des cours d'eau qui sont contenus dans un bassin versant (Smart, 1978). La recherche géomorphologique classique, dont Horton a été le pionnier (Horton, 1945), a démontré l'association entre les mesures topologiques de la taille des cours d'eau ou de la position du réseau par exemple (l'ordre des cours d'eau). La topologie du réseau de drainage a été liée aux propriétés des eaux de ruissellement du bassin (Kirkby, 1976 ; Rodríguez-Iturbe et Valdes, 1979 ; Naden, 1992 ; Rice et al, 2016) et aux caractéristiques des habitats des cours d'eau qui affectent l'abondance et la diversité des espèces aquatiques (Vannote et al, 1980 ; Stenger-Kovács et al, 2014).

D'autre part, les systèmes d'information géographique (**SIG**) sont couramment utilisés pour effectuer des tâches d'analyse des réseaux de drainage. En effet, les méthodes automatisées d'analyse basées sur les **SIG** sont efficaces et reproductibles par rapport aux méthodes manuelles (Dawson et al, 2002). Les données numériques des cours d'eau utilisées dans les **SIG** sont généralement obtenues soit en numérisant les cours d'eau à partir de cartes existantes, de photographies aériennes et d'images satellites. Toutefois, ce sont les méthodes d'analyse du réseau de drainage basées sur les **MNT** qui sont le plus souvent mises en œuvre dans les logiciels SIG disponibles et sont donc plus largement utilisées dans la pratique.

L'oued Medjerda draine un ensemble de région hétérogène des hautes altitudes au Nord a sa tête par un relief accidenté où les écoulements ont un régime torrentiel. Le profil en long irrégulier du talweg principal (oued Medjerda) et ses principaux affluents tels que : oued Djedra, oued Chouk, oued Hammam et oued Er Rnem.

L'oued Mellegue résulte de la jonction de deux affluents : oued Chabro et oued Meskiana qui coulent respectivement selon les directions Sud-Est Nord-Ouest et Sud- Ouest Nord-Est. Oued Chabro résulte de la confluence des oueds Faïd Lebba et K'sob, ce dernier résulte de la jonction d'oued Aïn Chabro et oued Serdiès qui prennent naissance à Djebel Serdiès selon une direction Nord-Ouest Nord-Est.

Oued Aïn Chabro reçoit les eaux d'oued El Kebir qui draine la plaine de la Merdja. Oued Smara se déverse dans oued Meskiana sur sa rive droite, ainsi que oueds Melah et Ahmed Ben Mohamed qui coulent de Djebel Amamt El Kebir et Djebel Fedjidjet. Oued Guergoub El Melah se déverse dans oued Meskiana sur sa rive gauche et coule dans la même direction qu'oued Meskiana. Oued Guergoub El Melah reçoit les eaux provenant des Djebels Hamemir et Tadinart au Sud et Bou Tokhma et Tafernt à l'Ouest de ce dernier.

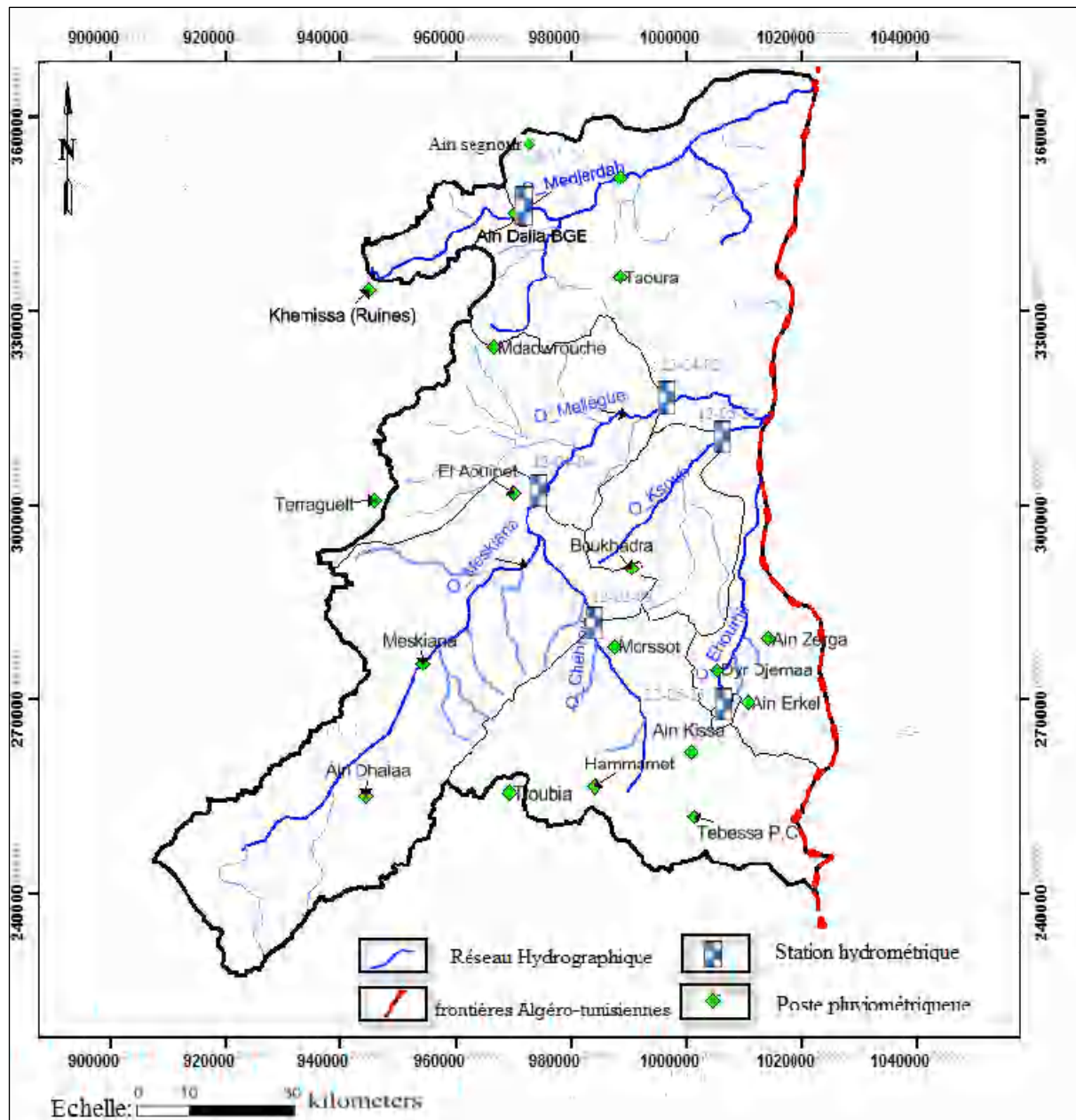


Figure 08 : Réseau hydrographique et les stations hydrométriques du la zone d'étude

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

Oued Mellegue reçoit sur sa rive gauche les eaux d'oued Kebarit qui rencontre sur son trajet oued Guefara, Oued Merah El Bel et oued Maksouba, et dans sa rive droite oued Mellegue reçoit les eaux d'oued El Besbes.

I.3.4.1 Hiérarchisation du réseau

En hydrologie, la structure des réseaux hiérarchiques dans les systèmes physiques a longtemps été caractérisée en se basant sur nombreuses méthodes. La méthode la plus simple et la moins

CHAPITRE. I : Caractéristiques physico- géographique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue »

ambiguë pour effectuer une classification topologique d'un réseau de drainage a été proposée par Horton en 1945, et modifié par Strahler en 1957.

Le système de Strahler « Stream Order », qui est toujours le plus utilisé, est basé sur les principes suivants :

- ✓ Tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre **1** ;
- ✓ Au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre **$n+1$**
- ✓ Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par: **$n + n = n + 1$ et, $n+m = \max (n, m)$.**

Dans le cas d'oued Medjerda au nord du bassin versant de la Medjerda Mellegue, le réseau hydrographique est d'ordre **4**, et au niveau d'oued Mellegue au sud du bassin le réseau est d'ordre **5**.

I.3.4.2 Profil en long du cours d'eau principal

La pente hydrographique, ou profil en long du cours d'eau, peut-être déterminée sur la carte ou mesurée sur le terrain par un nivellement de précision. Cette pente exprimée généralement en m/km conditionne : - La vitesse de l'eau dans le chenal ; - La vitesse de l'onde de crue ; - Le tirant d'eau de la rivière :

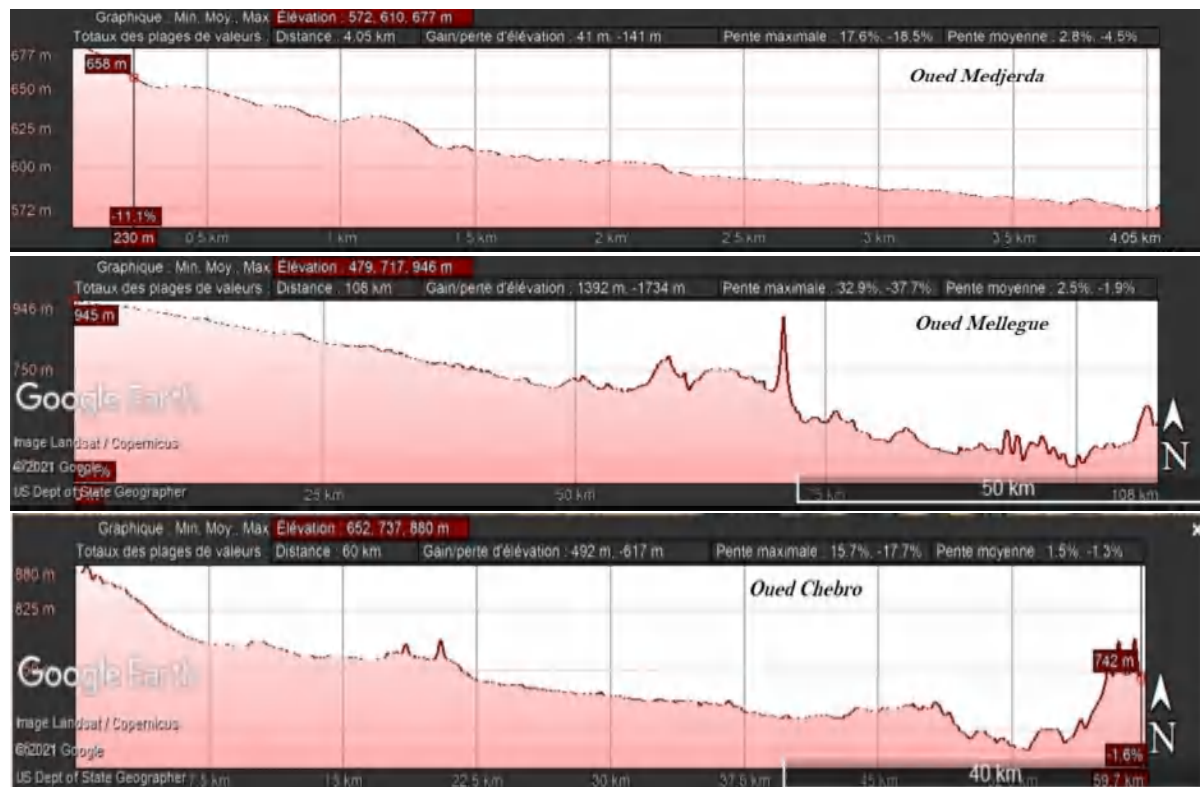


Figure 09 : Profil en long du cours d'eau principal de l'Oued Medjerda, Oued Mellegue, et oued Chabro (réalisé sur une image satellitaire de Google Earth).

Pour un même débit et une même largeur une rivière plus pentue a une vitesse d'écoulement plus grande et donc, généralement, une profondeur plus faible. La pente hydrographique varie plus ou moins irrégulièrement pour un même cours d'eau selon les structures géologiques traversées et diminue en général d'amont en aval (forme concave des profils en long). La figure suivante représente le profil en long du cours d'eau principal de l'oued Medjerda, Mellegue. Elle est créée en utilisant le logiciel Google Earth Pro.

I.3.4.3 La longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (**L**) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

Le calcul donne pour Oued Medjerda une longueur **L = 80.83 km**, et l'oued Mellegue une longueur de **168km**

I.3.4.4 La densité de drainage (Dd) :

Exprimé en Km/Km²; se définit étant le rapport de la longueur total (**L_x**), en Km à la superficie totale du bassin (**A**) en Km² soit :

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

Où,

Dd : densité de drainage en km/km²

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km².

I.4 Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$Ct = Dd * F1$$

Avec :

Dd : densité de drainage

F1: fréquence des thalwegs élémentaires **F1= N1/A** avec N1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1

Les valeurs de densité de drainage obtenues sont comprises entre 1.98 et 2.37 km/km². Les plus petites valeurs correspondent aux plus petit sous bassin (Ain Dalia 193km). Ces résultats indiquent que nos sous bassins versants sont en général assez bien drainés.

I.5 Temps de concentration

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau tombée à un point élevé du bassin versant, pour atteindre l'exutoire, il est exprimé par la formule de **Giandoti** :

$$TC = \frac{(4\sqrt{A}) + 1,5L_{wp}}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Où,

Tc : temps de concentration (heures)

A : superficie du bassin (km²)

L : longueur du thalweg principal L_{wp} (km)

H_{moy} : altitude moyenne (m)

H_{min} : altitude minimale (m)

La détermination du temps de concentration nous permettra de mieux connaître la réponse hydrologique du bassin ; le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface, mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief. D'après les résultats obtenus, le bassin versant Medjerda-Mellegue présente un temps de concentration varie de 8 heures à 31 heures.

Tableau .11. Valeurs des densités de drainage, des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations des eaux des bassins jaugés de la Medjerda-Mellegue

Nom de bassins jaugés	Densité de drainage (km/km²)	Temps de concentration (heurs)	Coefficient de torrentialité
Ain Dalia	1,98	8h 42mn	8,4
El Azreg	2,15	12h 54mn	8,4
Morsott	2,31	16h 30mn	9,5
El Aouinet	2,27	27h 12mn	9,2
Ouenza	2,22	31h 6mn	8,9

I.6 Le couvert végétal

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol, elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement des cours d'eau, en diminuant l'écoulement des eaux et en favorisant leur infiltration. Cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

L'action complexe du couvert végétal, s'exerce aussi bien sur les paramètres climatiques notamment l'évaporation que sur les bilans hydriques des sols. La végétation donne de l'ombre, ce qui conserve l'humidité, l'activité biologique nécessaire à l'équilibre du sol, l'infiltration en profondeur est facilitée par les fissurations préparées au sein du sol par le réseau racinaire.

CHAPITRE. I : Caractéristiques physico- géographique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue »

D'une manière générale, la composition végétale de la zone d'étude est diversifiée constituée de forêts, de maquis et de reboisement, le reste de la surface se répartissant entre les terres agricoles et les terres improductives (Figure 10).

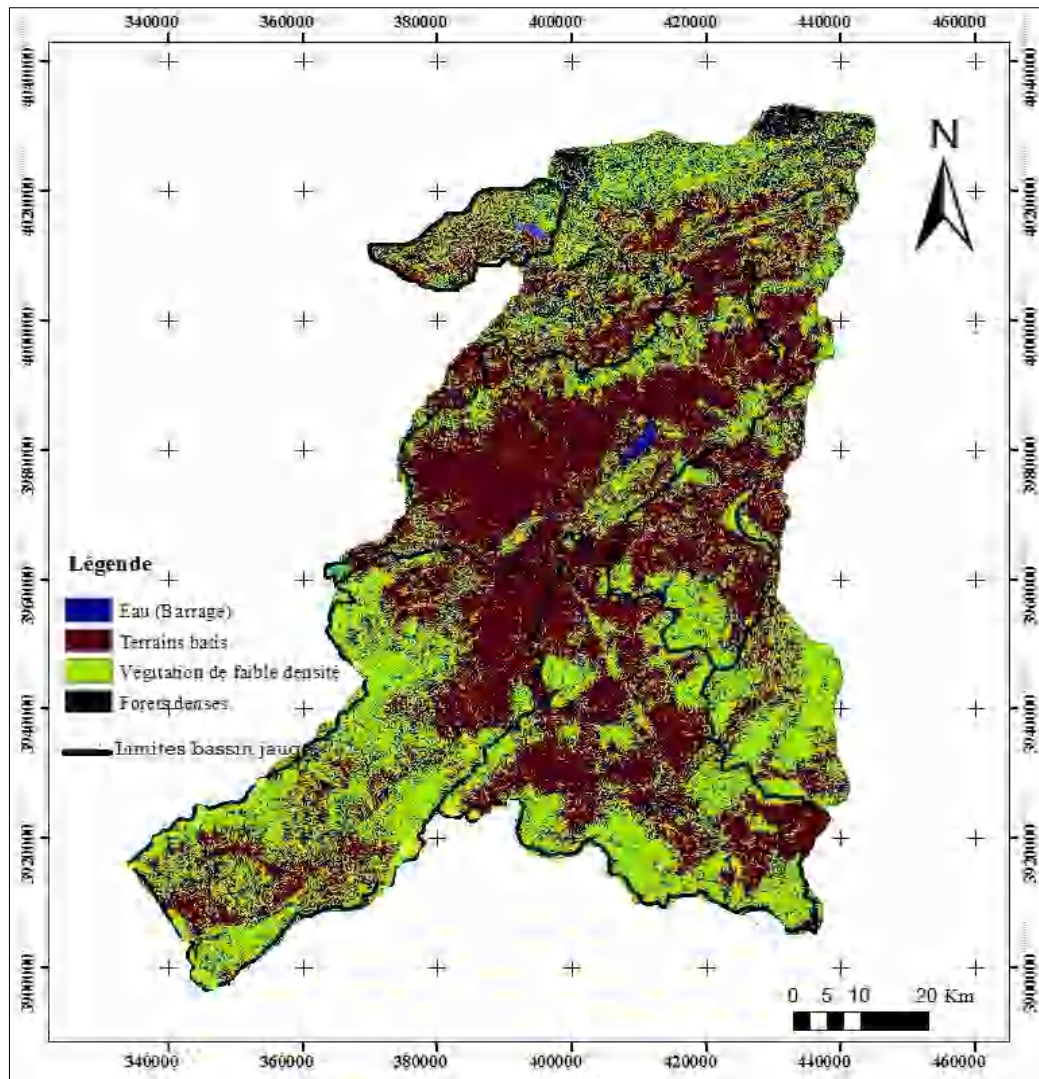


Figure 10 : Carte du couvert végétal de la zone d'étude (Medjerda-Mellegue)

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur photos satellitaires Landsat8 et MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

La carte de densité de recouvrement du bassin versant d'Oued Medjerda-Mellegue a été réalisée à partir de la combinaison des images satellitaires LANDSAT8 novembre 2021 avec une résolution de 30 m.

D'après Toualbia (2015) et Belloula (2017), dans la Haute Medjerda la superficie forestière est estimée à 114 341,03 hectares soit 44,41 % de la superficie totale des communes et elle est concentrée essentiellement au niveau des communes de Mechroha (75,48 %), Ouled-Moumen (50,01 %), Ain-Zana (52,98 %) et Zaarouria (49,53 %). Les céréales représentent 87 % des cultures herbacées et que ces derniers représentent 62 % de la superficie agricole utile.

CHAPITRE. I : Caractéristiques physico- géographique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue »

La partie médiane : 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.

Dans le bassin d'Oued Mellegue (Basse Medjerda), la quasi-totalité des forêts est située dans les zones montagneuses. Dans la partie Sud-Est, la zone de Djebel Tella et Djebel Anoual est couverte de forêt de Pin d'Alep et Genévriers, ainsi que la zone de Djebels Tadinart et Hammamir dans la partie Sud-Ouest (tableau 12).

A l'Est et à l'Ouest de Oued Ksob, on y rencontre également les forêts de Pin d'Alep sur Djebel Zitouna à l'Est et à Djebel Metloug à l'Ouest. Les versants Est d'oued Chébro sont couverts de forêt de Pin d'Alep et de broussaille. Enfin, la zone limitée par djebel Ouenza au Nord-Est et Djebel Guelb au Sud-Ouest sont constituées par une vaste zone forestière de Pin d'Alep, de broussaille et de Maquis.

Tableau .12. Répartition de couvert végétale par type en (Ha)

Type	Pin d'Alep	Chêne liège	Chêne Zeen	Cyprès	Eucalyptus	Broussailles	Maquis	Foret	Totale
S Ha	42 415	12 000	9 650	200	500	5879	3 247	31855	105746

D'après Toualbia (2015) et Belloula (2017), la végétation, qui a une influence mécanique certaine sur l'écoulement fluvial pour le bassin (Medjerda-Mellegue) est très faible, le bassin est caractérisé par un taux faible du couvert végétal permanent voisin de 18%(figure.08)

I.7 Cadre général de la géologie

Dans ce contexte, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de la Medjerda-Mellegue et passer ensuite à une description des formations rencontrées au niveau du bassin versant qui fait l'objet de cette étude en essayant de mettre en relief et leur impact sur l'hydrologie.

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 (grés, calcaires, dolomies,). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type de dépôts alluvionnaires.

I.7.1 Mise en place des unités structurales

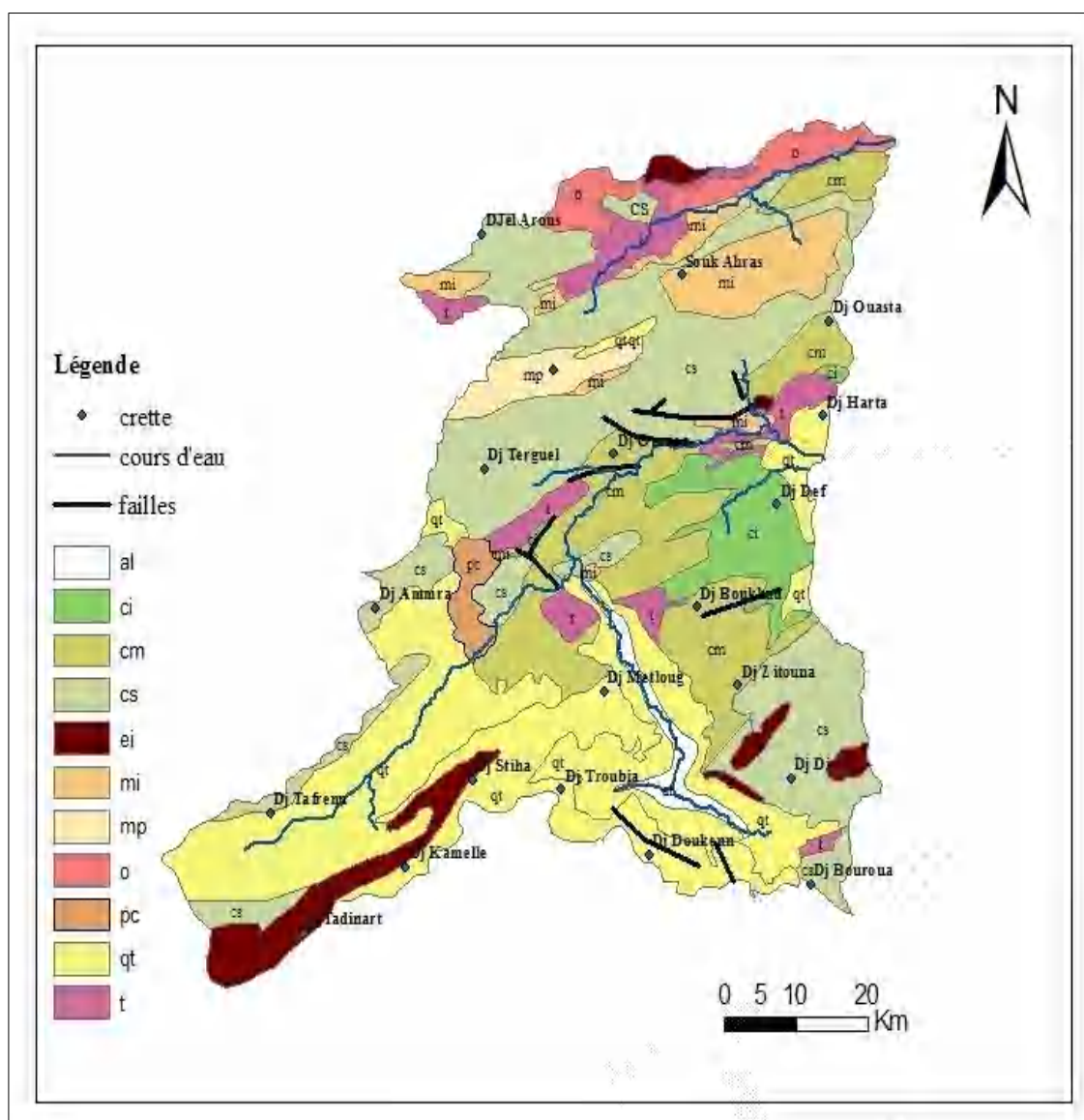
Le bassin d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir: L'Atlas Tellien au Nord et saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Au Nord le bassin d'étude présente un relief accidenté et

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 Antée-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 écaïlles 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 (*Figure 11*).



	Alluvions actuelles		Miocène continental
	Crétacé inferieur		Oligo miocene
	Crétacé moyen (marin ou lagunaire)		Pliocene continental
	Crétacé supérieur marin		Quaternaire continental
	Éocène inferieur marin		Trias
	Miocène inferieur	//	//

Figure 11 : Carte géologique de la zone d'étude (Medjerda-Mellegue, Algérie orientale)
Source La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur la carte géologique de l'Algérie 1/500 000 ,2ème édition 1952)

I.7.2 Les séries litho-stratigraphiques

I.7.2.1 Trias :

Les affleurements les plus importants sont ceux des Monts de Mechrouha, Mellegue, de l'Ouenza, de Boukhadra, de Mesloul, de Hameimat Nord, de Djebessa et Belkfif. A Essaoubaa par contre, le trias n'affleure pas en surface. Dans les Monts de Mellegue 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.7.2.2 Jurassique

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

I.7.2.3 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 Mesloul et le long de l'oued Batma et au NW de Dehar Mesloul *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 Mesloul, 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 gris 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 arbolines, 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 Mellegue 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 Mesloul, 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) Céno-manien :

Dans les monts de Mellegue, une série monotone de marnes argileuses verdâtre s'installe au céno-manien inférieur. Au Céno-manien moyen, ces marnes admettent diverses intercalations calcaires peu développées avec une faune plus au moins abondante. Au Céno-manien supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation céno-manienne est estimée entre (750 et 1100 m). Au nord - est d'Essouabaa, le Céno-manien 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 lumachelique 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. À 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)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 (Dubourdiou, 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).

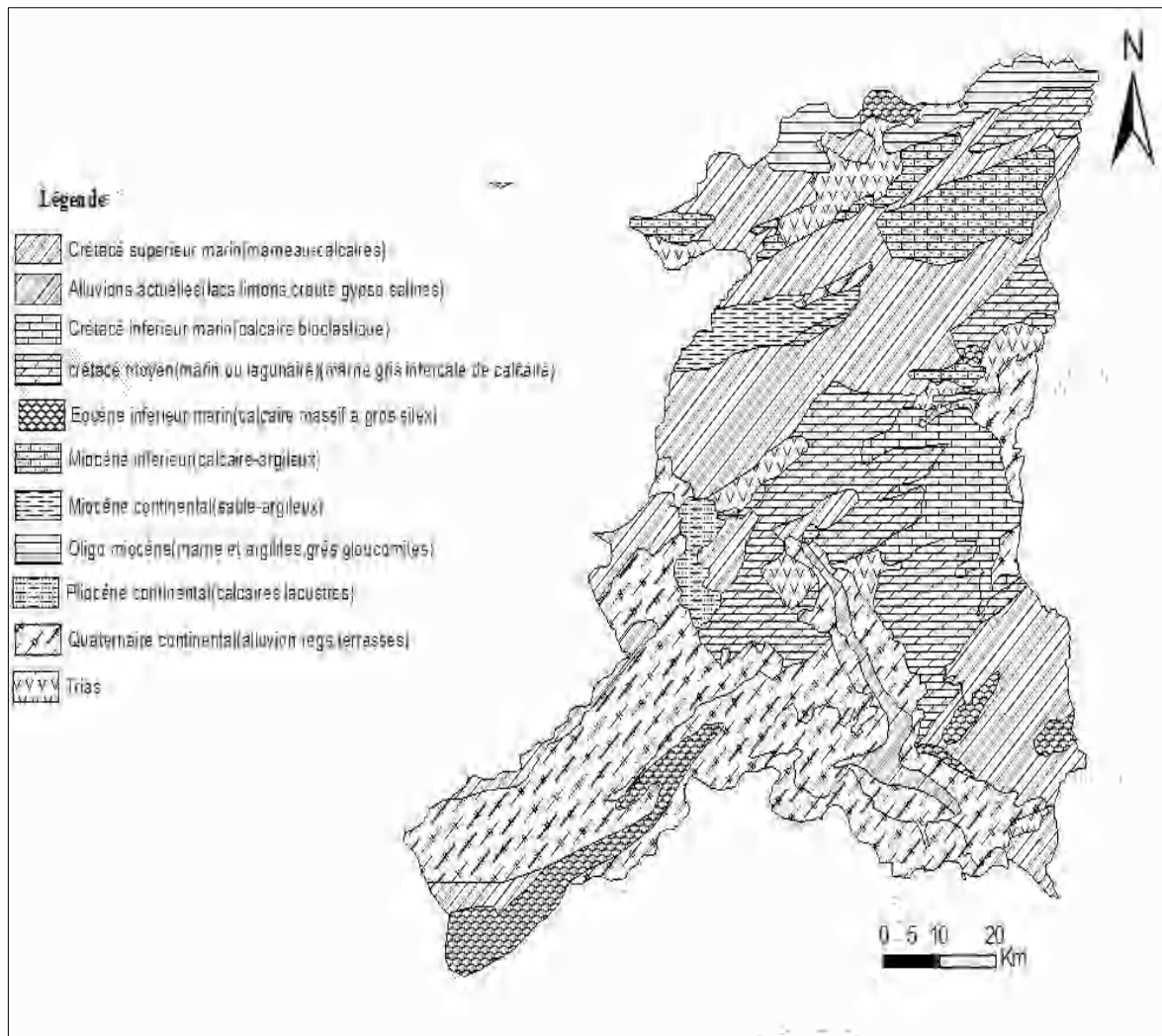


Figure 12 : Carte des formations lithologiques du bassin versant de la Medjerda Mellegue
 Source La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur la carte géologique de l'Algérie 1/500 000 ,2ème édition 1952)

I.7.2.4 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 Mellegue. Il affleure également aux environs de Taoura et au Nord de Djebel M'sid à Souk Ahras. Leurs puissances sont de (200mètres).

I.7.2.5 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 peu 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.7.2.6 Pliocène

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.7.3 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 ; Mellegue, K'seub 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 Mellegue, des terrasses alluviales de Mellegue, 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 Esegghir. Ils assurent ainsi le comblement des fossés d'effondrements.

I.8 Impact de la géologie sur l'hydrologie

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants à 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.

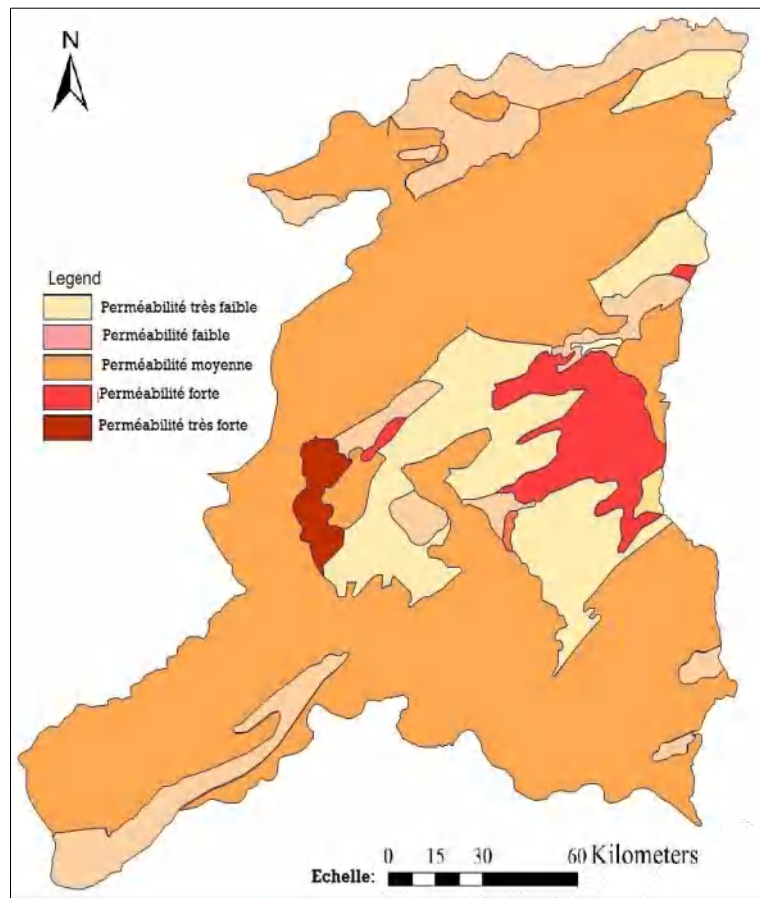


Figure 13 : Carte de perméabilité du bassin versant de la Medjerda Mellegue

Source La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur la carte géologique de l'Algérie 1/500 000 ,2ème édition 1952)

Les sous bassins de la Medjerda sont formés essentiellement par des formations de perméabilité moyenne, occupant les monts de Tébessa, Meskiana, Mellegue 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, Mellegue amont et Mellegue aval, sont représentées par des formations de perméabilité faible à très faible (Alluvions fines et argile) favorisant ainsi le ruissellement de surface (Figure 13).

Conclusion

Les oueds Medjerda, Mellegue drainent un bassin qui occupe une superficie de 7841 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. En outre l'analyse physico-géographique permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'écoulement, leurs influences 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 différentes unités du bassin.

L'analyse morphométrique et géométrique est la base de toute étude hydrologique, elle permet de quantifier les différentes caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant. Le bassin versant de la Medjerda présente une forme moyennement allongée. La valeur du coefficient de torrencialité (Ct) 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. On peut dire que le réseau hydrographique se caractérise par un chevelu hydrographique bien hiérarchisé et moyennement dense. Notre sous bassins peut avoir un rôle déterminant dans le processus d'érosion.

CHAPITRE II :

*Étude de la pluviométrie et estimation
de la lame d'eau précipitée dans le
bassin versant de la Medjerda-
Mellegue*

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

II.1 Introduction :

Les ressources en eaux superficielles ou souterraines sont conditionnées par les précipitations. L'analyse de la variabilité pluviométrique est très importante pour la prévision, la gestion des ressources hydriques. Afin de mieux l'étudier, il est intéressant, de chercher à situer le changement temporel de la pluviométrie constatée depuis **43 années** dans la chronologie pluviométrique de cette période, dans laquelle on dispose d'enregistrements dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue. Les données pluviométriques proviennent essentiellement de la banque de données de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (**ANRH**). Elles sont enregistrées à partir de **19** postes pluviométriques, repartis sur le bassin versant et dont la taille des observations varie d'une station à une autre.

L'étude a été menée dans ce chapitre en mettant en lumière le climat de l'Algérie du Nord, l'équipement du bassin et les données obtenues. Après avoir examiné les données avant de les utiliser, nous avons utilisé la loi de probabilité racine normale, puis la méthode des doubles cumule, puis nous avons rempli les lacunes en utilisant la méthode de bouche-trous. L'étude a porté sur les variations pluviométriques annuelles, saisonnières et mensuelles, ainsi que l'étude des périodes de retour jusqu'à l'estimation de la lame d'eau précipitée sur le bassin de Medjerda Mellegue.

II.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie du Nord:

Le climat de l'Algérie, surtout 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 journalières 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.

II.3 L'équipement du bassin versant et l'analyse des données pluviométriques :

II.3.1 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 (Mebarki, 2005).

Pour cette étude, nous avons retenu des stations considérées représentatives pour notre zone mais dont les périodes d'observations sont différentes d'une station à une autre, Notre bassin d'étude compte (19) stations pluviométriques réparties de la manière suivante :

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Tableau 13: Caractéristiques des postes pluviométriques du bassin versant de la Medjerda Mellegue.

STATION	Code - Station	X (km)	Y (km)	Z (m)	Période
<i>Ain Dalia au Barrage</i>	12 01 15	963,95	341,65	717	1988/89-2011/12
<i>Souk Ahras</i>	12 01 01	967,25	342,25	590	1968/69-2011/12
<i>Taoura</i>	12 01 05	980,55	331,55	850	1970/71-2010/11
<i>Khemissa</i>	12 01 04	945,5	332,5	900	1971/72-2011/12
<i>M'Daourouch</i>	12 04 03	960,85	320,65	870	1967/68-2011/12
<i>El Aouinet</i>	12 04 02	967,8	297,4	650	1967/68-2011/12
<i>Terraguelt</i>	14 01 15	942	296,7	868	1970/71-2008/09
<i>Boukhadra</i>	12 03 02	982,25	285,95	900	1969/70-2011/12
<i>Ain Zerga</i>	12 05 10	1003,65	274,95	850	1972/73-2011/12
<i>Morsott</i>	12 03 18	979,7	273,7	728	1972/73-2011/12
<i>Meskiana</i>	12 02 01	949,7	271	845	1970/71-2011/12
<i>Dyr Djamaa</i>	12 05 19	995,9	268	975	1971/72-2011/12
<i>Ain Erkel</i>	12 05 14	997,2	265	1080	1971/72-2011/12
<i>Ras layoun</i>	12 05 01	1006,5	261,2	995	1972/73-2011/12
<i>Hammamet</i>	12 03 04	976,5	251,75	875	1969/70-2011/12
<i>Ain Kissa</i>	12 03 06	991,65	257,2	985	1970/71-2011/12
<i>Dhalaa</i>	12 02 02	940,85	250,4	980	1969/70-2010/11
<i>Tébessa</i>	12 03 01	991,9	247,2	890	1968/69-2011/12
<i>Troubia</i>	06 23 07	963,1	250,9	1252	1971/72-2010/11

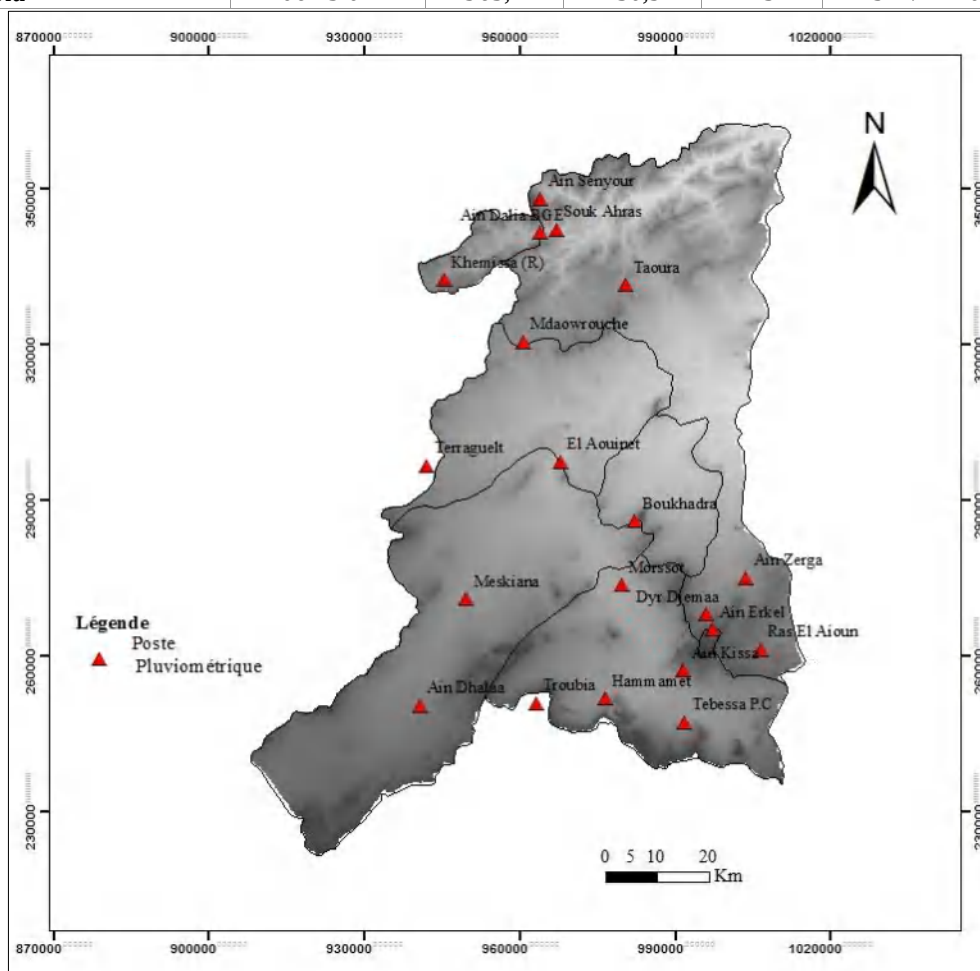


Figure 14: Réseau pluviométrique du bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

II.4 Méthodologie

Les séries pluviométriques utilisées dans cette étude, sont testées par la méthode de double cumul. Pour confirmer l'ajustement des chroniques des pluies à une loi statistique, nous avons utilisé la loi : racine normale appliquée sur des données en dixièmes des racines des millimètres des pluies. Les séries lacunaires sont comblées par la méthode de bouche-trou en utilisant le logiciel Hydrolab. 2010.

C'est ainsi qu'on a pu retenir dans cette étude 19 séries pluviométriques complètes et homogènes qui représentent la période entre 1971 et 2012. Pour mieux saisir l'irrégularité des pluies durant cette période, nous avons calculé la moyenne interannuelle, inter mensuelles, saisonnière, l'écart-type et le coefficient de variation. Les méthodologies utilisées dans ce chapitre ont pour sources Dubreuil (1973) et Laborde (2009).

II.5 Critique des données

II.5.1 Analyse des données par une loi de probabilité (racine- normale)

L'ajustement des pluies annuelles a été réalisée par la loi racine- normale des pluies annuelles exprimée en racines de dixièmes de millimètres. Il est nécessaire de vérifier l'homogénéité des données par la méthode des doubles –cumuls.

Rappel : La fonction de répartition de la loi normale est donnée par l'expression :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad \text{Du (fréquence au non dépassement).}$$

Elle est tabulée en fonction **u** où **u** représente la variable réduite de Gauss. Dans le cas de la loi racine normale la variable **u** est égal à :

$$u = \frac{\sqrt{x} - \overline{\sqrt{x}}}{\sqrt[3]{x}}$$

Avec : $\overline{\sqrt{x}}$: moyenne arithmétique de la série $x^{0.5}$ et $\sqrt[3]{x}$ écart type de la série

La transformation $\sqrt{x} = \overline{\sqrt{x}} + \sqrt[3]{x} \cdot u$ Est l'équation de la droite de Henry ajustant les données transformées en racine, à la loi de Gauss.

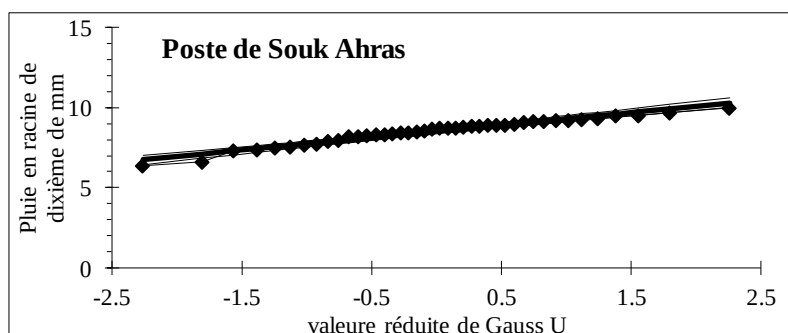


Figure.15 : Échantillon d'ajustement des données de pluie en racine carré de dixième de mm poste de Souk-Ahras (Medjerda-Mellegue)

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

II.5.2 Analyse des données avec la méthode des doubles cumuls

II.5.2.1 Rappel de la méthode des doubles cumuls

La méthode des doubles -cumuls est basée sur la comparaison des totaux mensuels ou annuels cumulés de la série que l'on veut contrôler ($y(i)$) par rapport à une série de références ($x(i)$), qui peut être soit celle d'un poste fiable, soit une série fictive correspondant à une moyenne régionale (indice régional).

La station de référence utilisée dans ce travail est une série fictive calculée par la moyenne de cinq postes pluviométriques : Khemissa ,Tébessa , Meskiana, El Aouinet ,et enfin Terraguelt. On trace donc pour chaque station un graphique avec des points constitués par les couples de cumuls progressifs : pour j variant de 1 à n , dans l'ordre chronologique (n étant la taille des échantillons concomitants de $x(i)$ et de $y(i)$). Lorsque la courbe moyenne, ajustée aux points, présente une cassure nette, on peut localiser en ce point une cassure datée. D'autre part, on considère une variation climatique quand une rupture est vérifiée dans les stations voisines, alors qu'un changement qui ne se manifeste que dans la station choisie, est considéré comme une hétérogénéité dans la série. La méthode des doubles cumuls a l'avantage d'être simple, et très rapidement réalisable. Par contre, l'interprétation des graphes obtenus n'est pas toujours aisée et, surtout, la méthode ne propose aucune graduation en probabilité des défauts constatés : un test, au sens statistique, est donc exclu. Enfin, elle permet de détecter l'erreur, et éventuellement de la corriger, du moins pas directement. Après une analyse approfondie d'une situation critique constatée, une correction peut être toutefois envisagée.

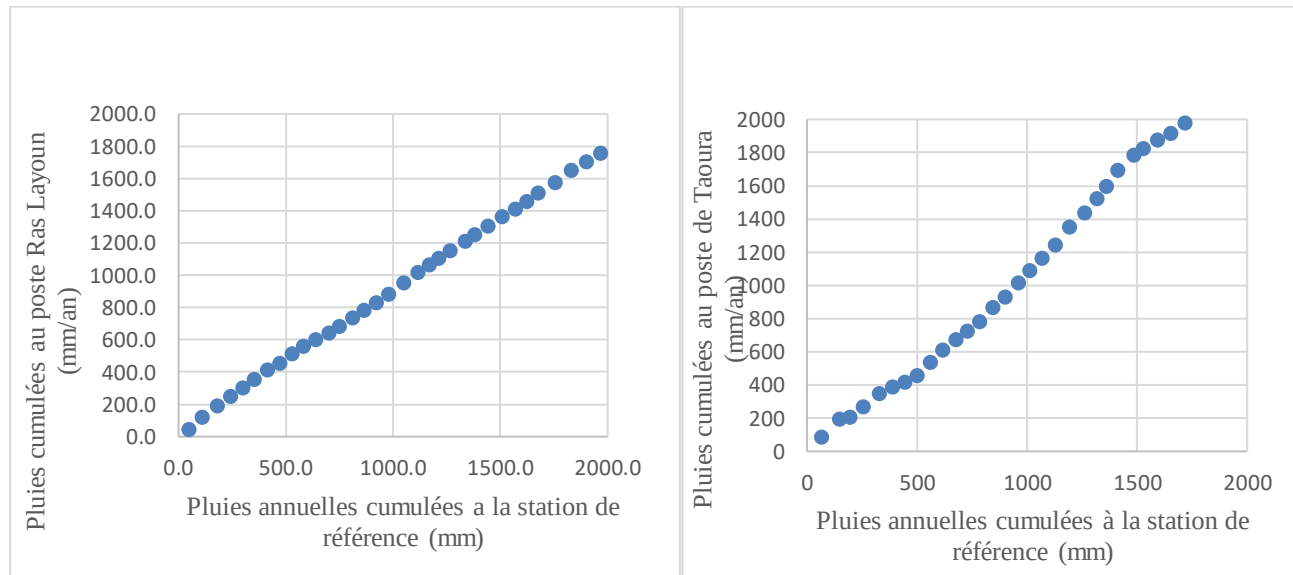


Figure16 a : graphique de double cumuls des données de pluie d'un poste sans rupture, poste de **Ras Layoun** (Medjerda-Mellegue

Figure16 b : graphique de double cumuls des données de pluie d'un poste sans rupture, poste de Taoura (Medjerda-Mellegue

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

II.5.2.2 Comblement des lacunes avec le logiciel Hydrolab. (Bouche trous) mois par mois

Le logiciel Hydrolab a été développé par J.P. Laborde, professeur à l'université de Sofia Antipolis, en octobre 1998. Intégré sous Excel, il permet une utilisation simple d'outils hydrologiques, il est libre et gratuit. Ce logiciel traite essentiellement des points suivants:

- **L'analyse univariée (ajustements),**
 - L'analyse multivariée (Régressions multiples),
 - L'analyse en composantes principales,
 - Le comblement de lacunes dans des séries de données,
 - La détection d'anomalies dans les séries de données,
 - L'analyse spatiale.
 - L'ajustement aux lois de probabilité les plus utilisées en hydrologie (loi normale, log-normale, racine normale Gumbel),
 - Des fonctions liées à l'évapotranspiration potentielle,
 - Une fonction pour passer de l'évapotranspiration potentielle à réelle,
 - Des fonctions de passage des coordonnées géographiques à différentes coordonnées Lambert.
- Source : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/hydrolab>

II.6. Variations spatio-temporelles des précipitations :

Après avoir suivi le processus de comblement des lacunes des données de précipitations manquantes, en utilisant la macro bouche trous du programme Hydrolab, nous avons reconstitué les tableaux des pluies des stations étudiées.

II.6. 1Variation interannuelle des précipitations

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 43 années (1969/2012), montre que l'année (1972/73) 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). Les postes pluviométriques situés au Sud connaissent parfois une diminution très importante des pluies annuelles.

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue



Figure .17. Variations des précipitations annuelles dans le bassin de Medjerda-Mellegue (1972-2012).

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Tableau 14 : Caractéristiques des précipitations annuelles de Medjerda-Mellegue (1972-2012).

Station	P moyenne (mm)	Ecart- type	Cv	Cv%	Année Max		Année Min		PM/pm	Nbr Année> P _{moy}
Ain Dalia	531,5	140,1	0.264	26,4	1972/73	870,9	1987/88	283,5	307,2	22
Dhalaa	218,5	84,7	0.388	38,8	1979/80	385,7	1993/94	78,9	488,7	19
Ain Erkel	368,9	131,7	0.357	35,7	1972/73	1012,5	2000/01	187,2	541,0	17
Ain kissa	290,2	140,8	0.485	48,5	1972/73	938,0	1993/94	129,6	723,6	16
Ain Zerga	306,4	120,3	0.393	39,3	2008/09	665,5	1993/94	150,1	443,3	18
Boukhadra	279,4	119,3	0.427	42,7	1999/00	519,8	1982/83	85,0	678,4	19
Dyr Djamaa	296,2	113,7	0.384	38,4	1972/73	746,2	1982/83	122,6	608,6	19
El Aouinet	249,1	88,7	0.356	35,6	2008/09	471,6	1991/92	97,3	484,6	19
Hammamet	260,0	119,3	0.459	45,9	1972/73	565,2	1993/94	53,1	1220,7	20
Khemissa	388,7	138,9	0.357	35,7	1972/73	875,2	1982/83	213,5	410,0	21
Mdaorouch	289,6	110,8	0.383	38,3	2002/03	541,0	1969/70	83,6	647,1	20
Meskiana	234,0	100,1	0.428	42,8	1971/72	513,5	1996/97	86,2	595,7	16
Morsott	217,4	86,1	0.396	39,6	1972/73	397,5	1984/85	65,3	608,7	22
Ras Layoun	275,5	109,3	0.397	39,7	1972/73	627,9	1993/94	127,1	520,0	18
Souk Ahras	451,8	146,7	0.325	32,5	1970/71	727,7	1993/94	150,5	535,1	19
Taoura	445,0	192,8	0.433	43,3	1972/73	1101,7	1998/99	117,6	936,8	17
Tébessa	317,0	112,7	0.355	35,5	1995/96	573,9	1982/83	139,6	411,1	19
Terraguelt	205,6	95,1	0.463	46,3	1971/72	481,1	2007/08	73,9	651,0	20
Troubia	210,6	119,9	0.569	56,9	1975/76	584,1	2007/08	46,3	1261,5	20

Les « CV » prouvent que la variabilité interannuelle des pluies est très importante, supérieure à 25% pour tous les postes pluviométriques.

II.6.2 Variation saisonnière des précipitations :

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les saisons agricoles

Automne : (22 septembre, 21 décembre), **l'hiver** (22 décembre, 21mars), **printemps** (22mars, 21 juin), **été** (22 juin, 21 septembre). (Tableau 14).

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

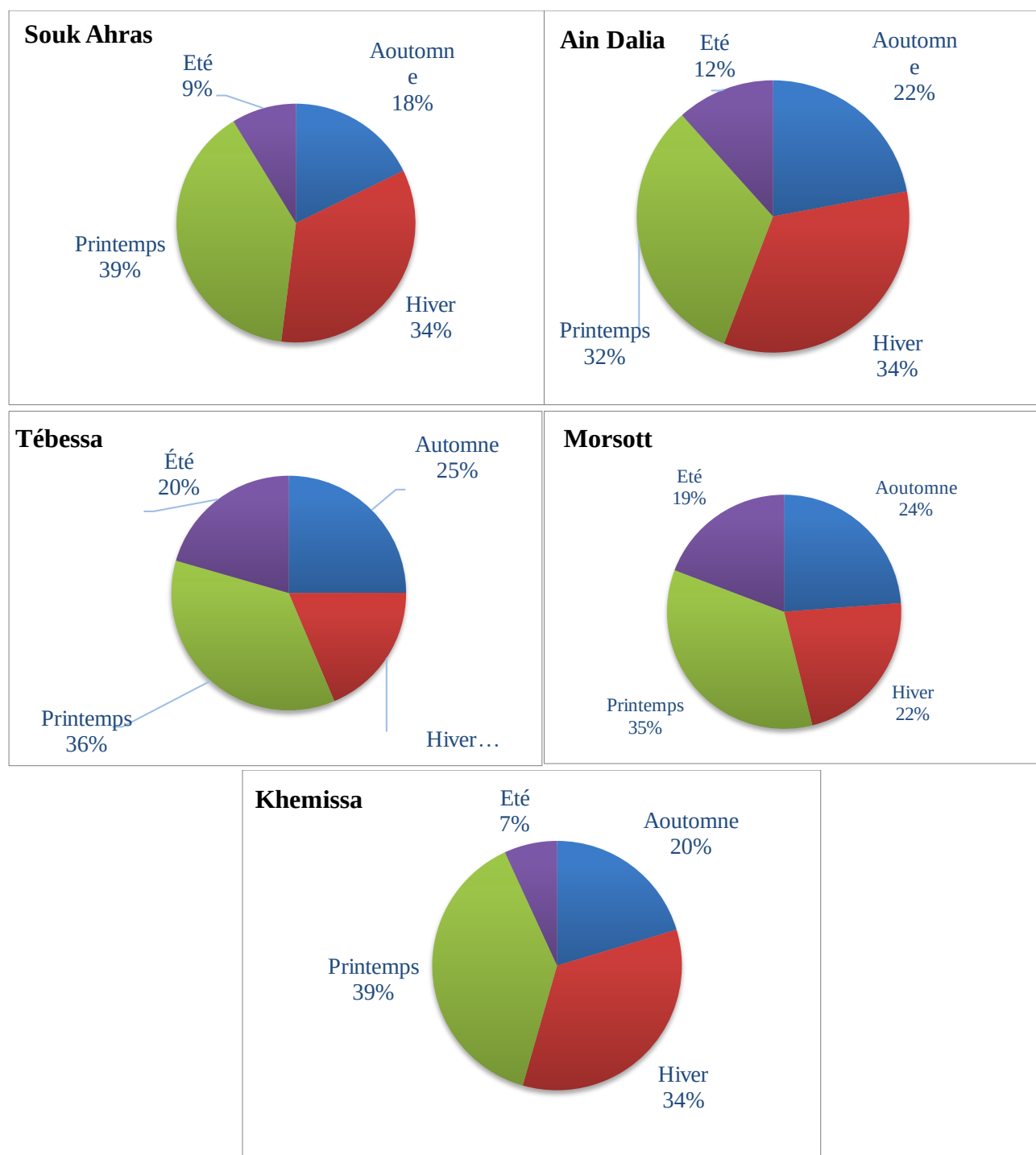


Figure 18: Variations saisonnières des précipitations du bassin versant Medjerda-Mellegue

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Concernant la variation saisonnière des précipitations au niveau du bassin versant de Medjerda-Mellegue, la grande tranche de la lame d'eau précipitée se situe en hiver et en printemps dans la majorité des postes pluviométriques (figure18).

Tableau 15: Variations saisonnières des précipitations dans le bassin de Medjerda-Mellegue.

Saison	Automne		Hiver		Printemps		Été	
Station	P (mm)	%	P (mm)	%	P (mm)	%	P (mm)	%
Ain Dalia	117,2	22,0	179,7	33,8	172,7	32,5	61,9	11,6
Dhalaa	51,7	23,7	44,4	20,3	87,3	40,0	35,1	16,0
Ain Erkel	93,5	25,4	74,5	20,2	139,7	37,9	61,1	16,6
Ain kissa	65,3	22,5	61,2	21,1	103,9	35,8	59,8	20,6
Ain Synour	118,0	15,1	310,9	39,8	304,1	39,0	47,5	6,1
Ain Zerga	72,5	23,7	64,5	21,1	119,1	38,9	50,3	16,4
Boukhadra	69,0	24,6	59,9	21,4	110,8	39,5	40,5	14,5
Dyr Djamaa	71,3	24,1	64,7	21,8	110,5	37,3	49,7	16,8
El Aouinet	52,9	21,2	55,2	22,1	100,6	40,3	40,9	16,4
Hammamet	65,1	25,0	49,3	19,0	100,9	38,8	44,7	17,2
Khemissa	79,1	20,4	132,5	34,1	150,4	38,7	26,7	6,9
Mdaorouch	58,0	20,0	78,0	27,0	114,8	39,6	38,7	13,4
Meskiana	54,6	23,3	47,1	20,2	93,0	39,8	39,2	16,8
Morsott	51,8	23,8	48,5	22,3	75,4	34,7	41,8	19,2
Ras Layoun	74,5	27,0	58,3	21,1	101,1	36,7	41,6	15,1
Souk Ahras	80,3	17,8	154,5	34,2	177,4	39,3	39,6	8,8
Taoura	96,7	21,7	129,7	29,1	172,8	38,8	45,8	10,3
Tébessa	79,1	25,0	59,2	18,7	113,5	35,8	65,1	20,6
Terraguelt	43,8	21,3	47,3	23,0	84,8	41,3	29,7	14,4
Troubia	47,8	22,7	46,9	22,3	78,1	37,1	37,8	17,9

II.6.3 Variation inter 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 conditionnent l'écoulements et les apports aux nappes. La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionne l'écoulement et par la même le régime des cours d'eau. 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 (Tableau16).

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Tableau.16 : Précipitations moyennes mensuelles période (1972/2012).

mois	sept	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	annuel
Ain Synour	40,0	67,3	10,7	10,7	163,8	136,5	126,4	119,2	58,5	25,1	8,1	14,3	780,5
Ain Dalia	38,6	67,6	11,0	11,0	87,2	81,5	80,8	70,9	21,0	13,2	37,7	11,0	531,5
Dhalaa	28,1	20,6	3,0	3,0	22,1	19,3	28,7	26,8	31,8	16,7	3,7	14,6	218,5
Ain Erkel	42,5	47,3	3,8	3,8	36,8	33,9	53,0	44,1	42,6	27,4	12,1	21,6	368,9
Ain kissa	33,6	28,7	3,1	3,1	31,8	26,4	38,2	33,0	32,6	25,8	10,9	23,2	290,2
Ain Zerga	36,1	33,0	3,4	3,4	32,7	28,4	42,2	41,4	35,4	21,6	9,4	19,3	306,4
Boukhadra	37,1	28,3	3,6	3,6	32,4	23,9	30,0	38,8	42,0	21,0	5,0	14,5	280,1
Dyr Djamaa	36,3	32,0	3,0	3,0	32,8	28,9	36,9	38,0	35,5	22,3	9,3	18,1	296,2
El Aouinet	27,7	23,1	2,2	2,2	25,8	27,2	27,2	34,1	39,3	23,2	4,9	12,7	249,6
Hammamet	34,4	28,3	2,4	2,4	25,0	21,9	34,8	27,1	39,0	21,7	8,4	14,7	260,0
Kehmissa	33,9	40,4	4,9	4,9	68,3	59,3	65,3	49,7	35,4	15,6	2,2	8,9	388,7
Mdaorouch	28,3	26,7	3,0	3,0	38,2	36,8	37,9	41,2	35,7	17,1	6,9	14,6	289,6
Meskiana	27,1	25,4	2,1	2,1	25,4	19,6	27,9	27,9	37,2	19,7	4,5	15,0	234,0
Morsott	27,0	21,8	3,0	3,0	24,0	21,4	24,1	24,4	26,9	18,8	7,5	15,5	217,4
Ras layoun	34,3	37,2	2,9	2,3	30,4	25,5	36,4	33,0	31,8	16,1	4,8	20,7	275,5
Souk Ahras	33,6	41,4	5,3	5,3	80,1	69,2	73,4	62,0	42,0	15,5	7,4	16,7	451,8
Taoura	47,1	44,6	5,1	5,1	70,4	54,2	69,0	63,8	40,0	20,2	11,7	13,9	445,0
Tébessa	41,8	34,4	2,9	2,9	30,3	26,0	40,1	36,0	37,4	27,4	14,4	23,4	317,0
Terraguelt	21,3	20,5	1,9	1,9	26,2	19,3	26,7	29,1	29,1	16,4	4,9	8,4	205,6
Troubia	21,2	24,4	2,2	2,2	23,4	21,3	27,6	22,0	28,5	20,6	5,0	12,1	210,6

Les histogrammes qui représente, de la variation mensuelle des précipitations au niveau du bassin versant de la Medjerda Mellegue révèlent deux périodes distinctes :

- Une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué.
- Les mois de novembre et décembre présentent une pluviométrie moyenne faible, plus faibles que les mois d'été :
- Une période humide qui correspond au reste de l'année.
- Les maximums mensuels touchent deux périodes : les mois de septembre – octobre, et les mois de janvier à mai.

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

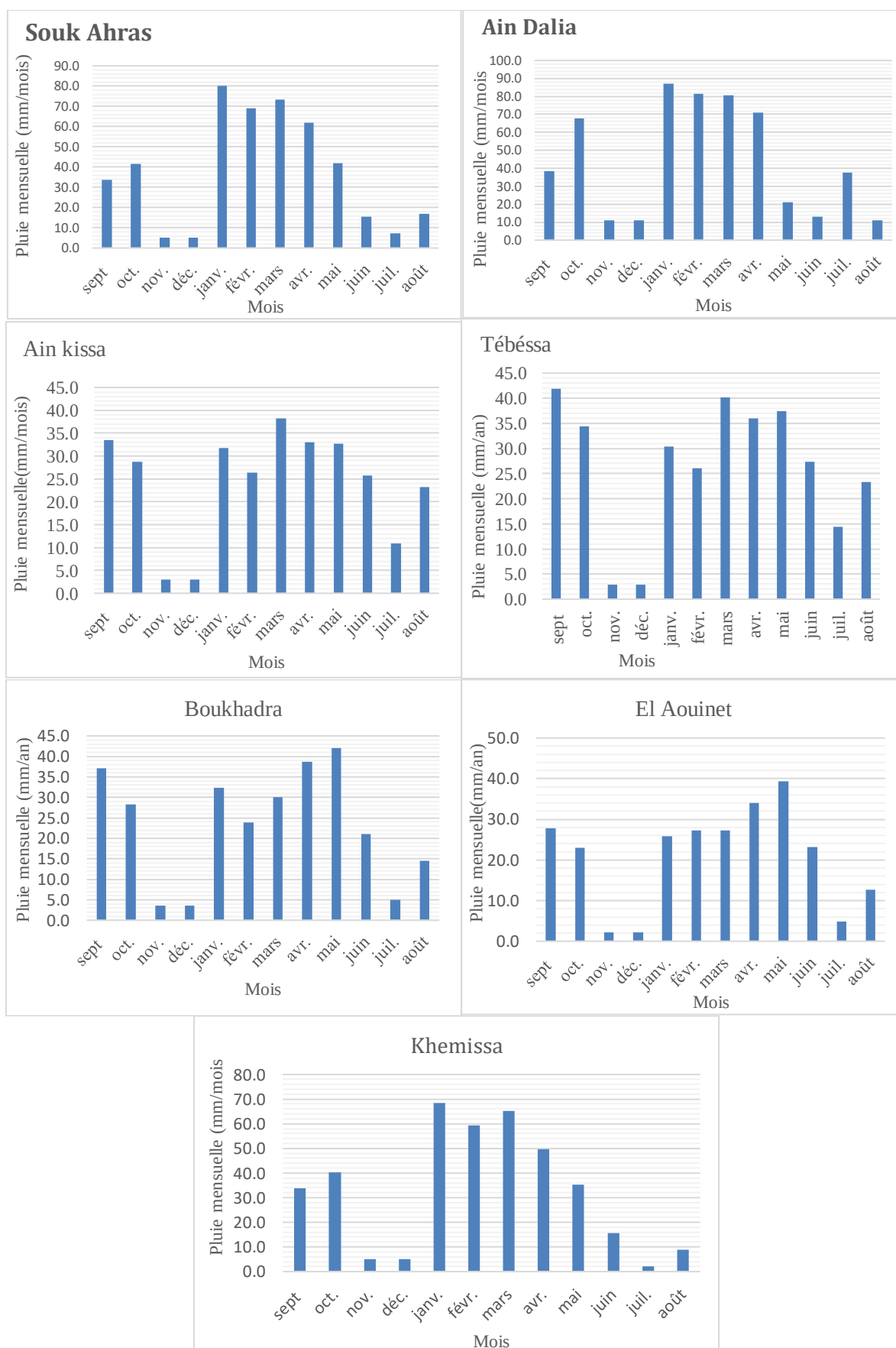


Figure 19: Variations mensuelles des précipitations sur le bassin de la Medjerda-Mellegue.

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Tableau.17: Variation des caractéristiques des précipitations moyennes mensuelles (période 1972/2012).

Paramètres	sept	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	Ann
Ain Dalia													
P moy	38,6	67,6	11,0	11,0	87,2	81,5	80,8	70,9	21,0	13,2	37,7	11,0	531,5
Ecart-type	22,6	66,1	8,5	8,5	70,6	45,3	41,6	35,6	18,0	16,2	24,8	11,5	140,1
Cv	0.58	0.98	0.78	0.78	0.81	0.56	0.51	0.50	0.86	1.23	0.66	1.05	0.26
Cv %	58.50	97.66	77.84	77.84	80.96	55.57	51.44	50.1	85.89	122.6	65.81	104.7	26.3
Pj max	89,0	321,3	35,2	35,2	269,0	201,5	196,5	166,5	72,0	79,6	108,7	55,3	870,9
Souk Ahras													
P moy	33,6	41,4	5,3	5,3	80,1	69,2	73,4	62,0	42,0	15,5	7,4	16,7	451,8
Ecart-type	28,7	34,9	4,9	4,9	65,0	66,6	46,5	47,6	37,1	20,5	13,0	24,0	146,7
Cv	0.85	0.84	0.93	0.93	0.81	0.96	0.63	0.77	0.88	1.32	1.76	1.44	0.32
Cv %	85.47	84.26	93.49	93.49	81.16	96.35	63.34	76.80	88.28	131.68	176.08	143.63	32.46
Pj max	116,4	132,2	16,0	16,0	298,6	315,2	206,7	228,5	138,5	93,9	60,2	136,7	805,3
Khemissa													
P moy	33,9	40,4	4,9	4,9	68,3	59,3	65,3	49,7	35,4	15,6	2,2	8,9	388,7
Ecart-type	25,0	28,4	4,7	4,7	60,9	53,1	55,4	39,4	34,1	18,5	3,4	8,6	138,9
Cv	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	1.0	1.2	1.6	1.0	0.4
Cv %	73.7	70.3	95.0	95.0	89.1	89.6	84.9	79.3	96.4	118.8	155.7	95.9	35.7
Pj max	117,1	135,7	17,2	17,2	281,6	217,3	358,1	187,4	149,5	91,3	12,2	25,5	875,2
Morsott													
P moy	27,0	21,8	3,0	3,0	24,0	21,4	24,1	24,4	26,9	18,8	7,5	15,5	217,4
Ecart-type	24,8	16,5	3,4	3,4	25,0	23,0	20,6	19,0	20,2	18,7	10,5	19,9	86,1
Cv	0,9	0,8	1,2	1,2	1,0	1,1	0,9	0,8	0,8	1,0	1,4	1,3	0,4
Cv %	0.92	0.76	1.15	1.15	1.04	1.07	0.85	0.78	0.75	0.99	1.40	1.29	0.40
Pj max	91.72	75.91	115.07	115.07	104.14	107.13	85.38	77.99	75.38	99.31	139.85	128.68	39.60
Meskiana													
P moy	27,1	25,4	2,1	2,1	25,4	19,6	27,9	27,9	37,2	19,7	4,5	15,0	234,0
Ecart-type	27,6	29,9	2,3	2,3	26,4	21,7	25,2	20,6	36,8	27,2	9,0	18,8	100,1
Cv	1,0	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	0,9	0,7	1,0	1,4	2,0	1,3	0,4
Cv %	1.02	1.18	1.08	1.08	1.04	1.10	0.90	0.74	0.99	1.38	1.98	1.26	0.43
Pj max	101.81	117.91	108.31	108.31	104.00	110.46	90.21	73.73	98.93	138.28	197.50	125.63	42.76
Ain Erkel													
P moy	42,5	47,3	3,8	3,8	36,8	33,9	53,0	44,1	42,6	27,4	12,1	21,6	368,9
Ecart-type	29,3	60,7	3,6	3,6	33,5	28,4	58,3	30,1	27,2	26,8	12,6	22,4	131,7
Cv	0,7	1,3	1,0	1,0	0,9	0,8	1,1	0,7	0,6	1,0	1,0	1,0	0,4
Cv %	0.69	1.28	0.95	0.95	0.91	0.84	1.10	0.68	0.64	0.98	1.04	1.04	0.36
Pj max	69.06	128.47	95.24	95.24	90.90	83.87	109.87	68.19	63.79	97.55	104.37	103.75	35.71
Hammamet													
P moy	34,4	28,3	2,4	2,4	25,0	21,9	34,8	27,1	39,0	21,7	8,4	14,7	260,0
Ecart-type	29,6	28,2	2,9	2,9	26,3	21,8	33,4	20,5	39,6	22,0	10,4	15,8	119,3
Cv	0.86	1.00	1.19	1.19	1.05	0.99	0.96	0.76	1.02	1.02	1.25	1.08	0.46
Cv %	85.91	99.70	118.62	118.62	105.42	99.44	95.97	75.63	101.55	101.56	124.76	107.61	45.88
Pj max	109,0	120,0	12,2	12,2	131,4	79,9	155,2	83,1	224,2	83,6	46,0	61,6	565,2
Tébessa													
P moy	41,8	34,4	2,9	2,9	30,3	26,0	40,1	36,0	37,4	27,4	14,4	23,4	317,0
Ecart-type	36,3	33,6	2,9	2,9	28,8	25,2	34,6	30,4	22,4	25,6	17,4	23,3	112,7
Cv	0.87	0.98	0.99	0.99	0.95	0.97	0.86	0.85	0.60	0.94	1.21	1.00	0.36
Cv %	86.67	97.75	99.34	99.34	94.90	96.96	86.14	84.61	59.93	93.59	120.63	99.94	35.54
Pj max	171,8	151,1	12,0	12,0	127,0	88,0	164,2	144,1	89,9	89,0	67,5	93,0	573,9
•	La ligne des Pj max correspond à des pluies se rapportant à des années déférentes à chaque fois.												

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Aux variations spatiales des précipitations annuelles s'ajoutent des variations temporelles qui restent toutefois moins marquées qu'à l'échelle mensuelle. Le phénomène de variabilité interannuelle des modules pluviométriques est bien exprimé par le coefficient de variation (CV) traduisant la dispersion relative des pluies. Les valeurs du coefficient de variation relatives à la période (1969/70-2011/12) pour quelques stations importantes du bassin (Tableau.17) oscillent entre 0.3 et 0.4, ce qui implique une variabilité assez forte dans l'ensemble, mais moins forte que la variabilité des précipitations mensuelles et des **Pj max** qui s'exprime parfois par un coefficient de variation cinq fois plus élevé. Il est à remarquer que la variabilité interannuelle est légèrement plus forte dans la station de Hammamet (0.5), autrement dit l'irrégularité pluviométrique s'accroît là où la hauteur de pluie est la plus faible.

II.7 Analyse statistiques des séries pluviométriques

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 avons recours à une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles, dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer des valeurs fréquentielles.

L'ajustement graphique des séries pluviométriques des différentes stations de la Medjerda-Mellegue pour la période (1970/2012), montre que la pluie s'ajuste en général à la loi de **Gauss**. En outre nous avons calculé pour quelques stations situées dans nos bassins d'étude, les précipitations fréquentielles relatives à des récurrences données.

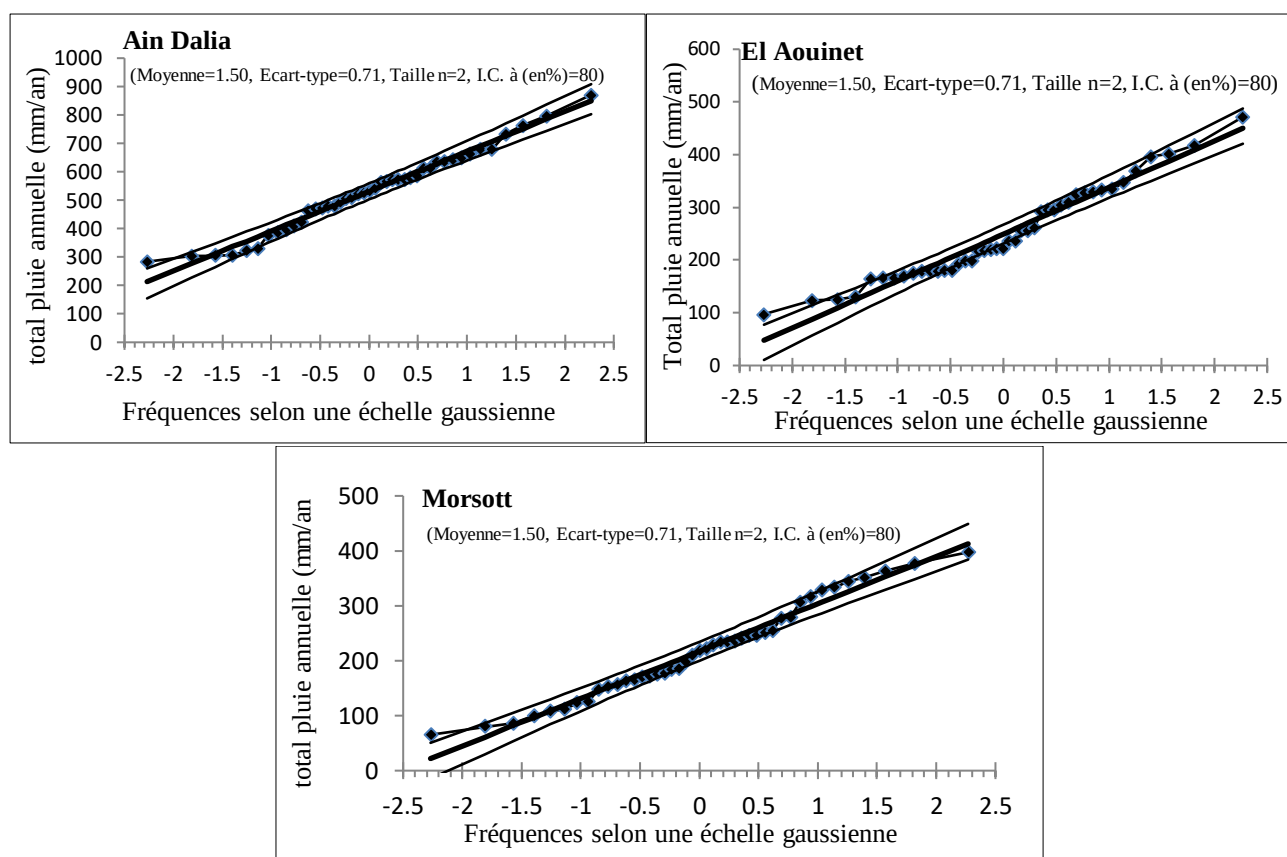


Figure.20 : Ajustement des pluies annuelles à la loi de Gauss

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

II.7.1 Notion de temps de retour

Les projets d'aménagements hydrauliques ou hydrologiques sont souvent définis par rapport à une averse type associée aux fréquences probables d'apparition. Lorsque l'on étudie des grandeurs comme les précipitations (caractérisées à la fois par leur hauteur et leur durée) ou les débits de crue d'un point de vue statistique, on cherche donc et, en règle générale, à déterminer par exemple la probabilité pour qu'une intensité i ne soit pas atteinte ou dépassée (i.e. soit inférieure ou égale à une valeur x_i).

Cette probabilité est donnée, si i représente une variable aléatoire, par la relation suivante, selon Dubreuil (1973) et Laborde (2009).

$$F(x) = P(i \leq xi)$$

On nomme cette probabilité fréquence non-dépassement ou probabilité de non-dépassement. Son complément à l'unité $1 - F(x_i)$ est appelé probabilité de dépassement, fréquence de dépassement ou encore fréquence d'apparition.

On définit alors le T d'un événement comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de

l'événement. Soit : $T = \frac{1}{1-F(x_i)}n$

Tableau.18: Valeurs des précipitations pour des périodes de récurrences données en année humide.

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Fréquence (f)	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Souk Ahras	451,84	575,3	639,83	693,12	753,1	793,09
Tébessa	316,97	411,79	461,35	502,28	548,35	579,06
Khemissa	388,74	505,62	566,71	617,16	673,94	711,8
Meskiana	233,96	318,17	362,18	398,53	439,44	466,72
Ain Dalia	531,46	649,4	711,05	761,97	819,27	857,47
El Aouinet	249,06	323,68	362,69	394,9	431,15	455,32
Morsott	217,4	289,87	327,74	359,03	394,23	417,7

II.8 Estimation des précipitations moyennes dans le bassin

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

II.8.1 La moyenne arithmétique

La méthode la plus simple à utiliser qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, elle donne des résultats de plus en plus représentatifs si la pluie est répartie de façon relativement homogène et si la répartition des postes est suffisamment homogène sur la région d'étude. La pluie moyenne sur le bassin, est calculée de la manière suivante :

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{ni}$$

Avec : (P_i): les hauteurs des précipitations mesurées dans les stations
(ni) : le nombre des stations.

Tableau 19 : variation des pluies moyennes des stations du bassin de la Medjerda Mellegue

Station	Moyenne (mm)	Station	Moyenne (mm)
Ain Dalia	531,5	Khehmissa	388,7
Dhalaa	218,5	Mdawrouch	289,6
Ain Erkel	368,9	Meskiana	234,0
Ain Kissa	290,2	Morsott	217,4
Ain Zerga	306,4	Souk Ahras	451,8
Boukhadra	279,4	Taoura	445,0
Dyr Djamaa	296,2	Tébessa	317,0
El Aouinet	249,1	Terraguelt	205,6
Hammamet	260,0	Troubia	210,6
Moyenne	303,9		

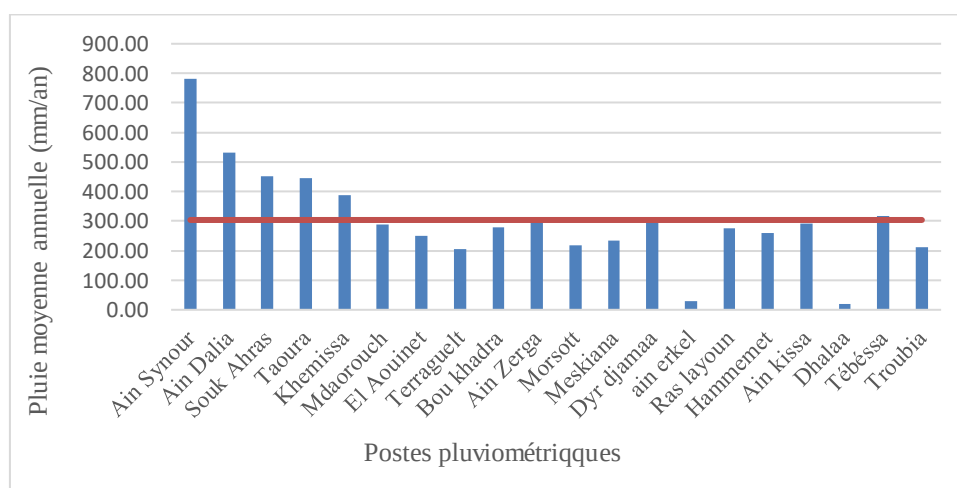


Figure.21 : Variation des pluies moyennes des stations de Medjerda mellegue 1971- 2012

En Algérie, l'influence de l'altitude sur la distribution géographique des précipitations est variable. Il y a une hausse des précipitations en fonction de l'altitude dans les stations exposées aux flux pluvieux, avec une variation du gradient du Nord vers le Sud comme dans la figure 21, où une classification est réalisée selon les coordonnées (y) des stations pluviométriques (latitude). Quoiqu'il en soit, l'altitude n'est pas toujours le facteur le plus important dans la distribution géographique des précipitations. D'autres facteurs tels que la distance de la station par rapport aux sommets, la position du relief par rapport à la mer jouent aussi un rôle important.

II.8.2 La méthode des polygones de Thiessen

La deuxième méthode que nous décidons d'étudier est celle des polygones de **Thiessen**, qui se base sur la triangulation de Delaunay utilisant la méthode des médiatrices entre deux stations. Pour cela,

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

nous avons utilisé une fonctionnalité d'**ArcGis**. Nous avons utilisé le fichier Excel contenant les coordonnées en Lambert 93 des 19 stations de pluviométrie. Les polygones de Thiessen obtenues sont représentés par la figure 22.

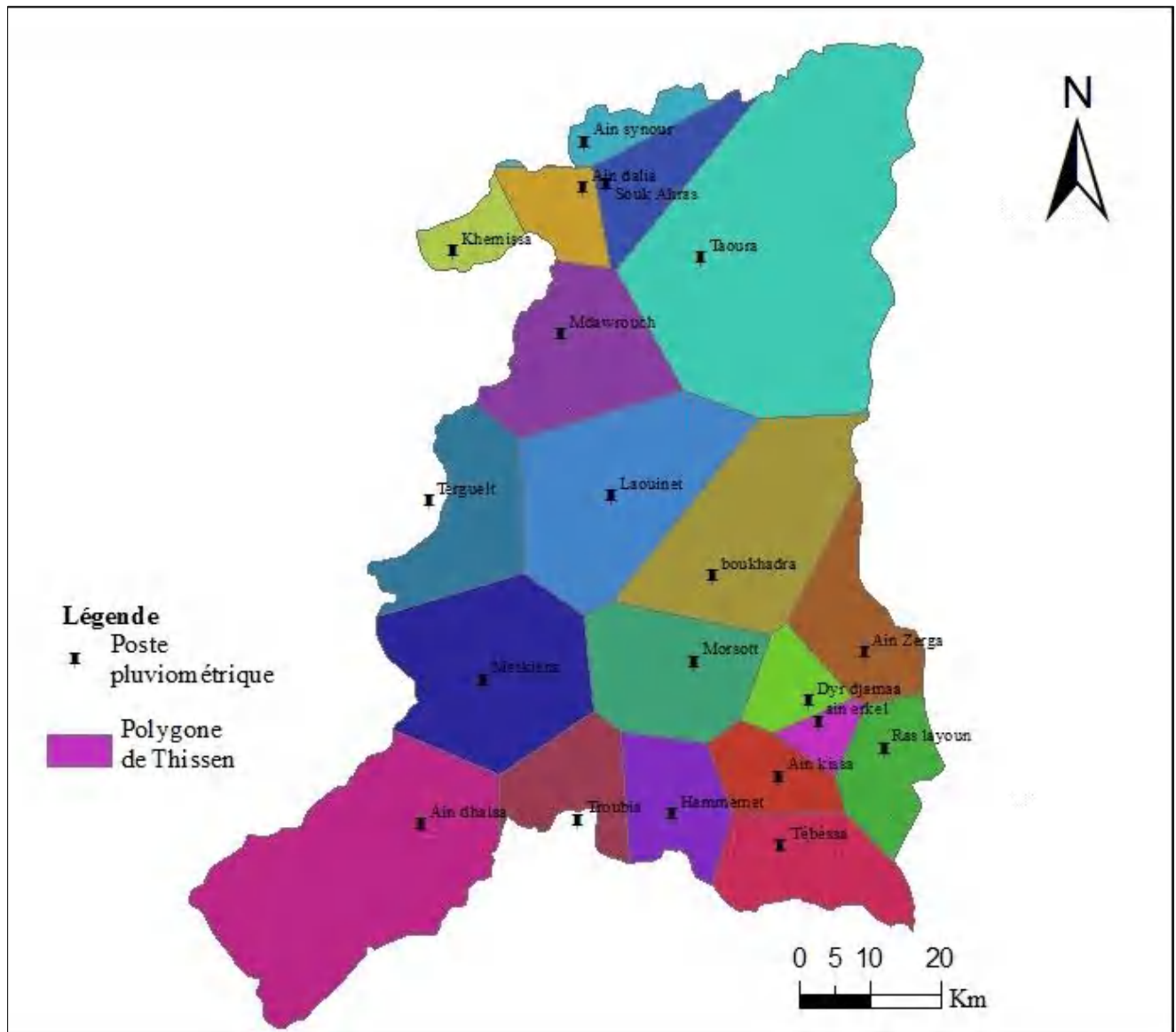


Figure.22 : Partage du bassin par les polygones de Thiessen

Source : La carte a été réalisé par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32), et les données pluviométriques annuelles.

L'intersection de la couche des limites du bassin versant avec celle des polygones de Thiessen permet d'obtenir les tracés des polygones sur notre sous bassin versant. La fonctionnalité d'ArcGis permettant de calculer la surface de chaque polygone. Il suffit ensuite de calculer un pourcentage par rapport aux surfaces.

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Tableau.20: Résultats de l'application aux bassins

N° polygone	Station	P moyenne	Ai (km²)	Ai%	Ai*Pi
1	Meskiana	234,00	609,26	7,770	142566,84
2	Ain Erkel	368,90	70,87	0,904	26143,94
3	Mdaorouch	289,60	433,17	5,524	125446,03
5	Hammamet	260,00	247,78	3,160	64422,80
6	Dhalaa	218,50	991,28	12,642	216594,68
7	Morsott	217,40	391,95	4,999	85209,93
8	Troubia	210,60	247,55	3,157	52134,03
9	Tébessa	317,00	255,34	3,256	80942,78
10	Ain Zerga	306,40	277,25	3,536	84949,40
11	Dyr Djamaa	296,20	133,88	1,707	39655,26
12	Ain kissa	290,20	173,93	2,218	50474,49
13	Boukhadra	279,40	660,24	8,420	184471,06
14	Ras layoun	275,50	221,02	2,819	60891,01
15	El Aouinet	249,10	648,03	8,265	161424,27
16	Terraguel	205,60	346,49	4,419	71238,34
17	Ain Dalia	531,50	171,94	2,193	91386,11
18	Souk Ahras	451,80	218,22	2,783	98591,80
19	Taoura	445,00	1501,67	19,152	668243,15
20	Khemissa	388,70	109,46	1,396	42547,10
Total			7841,00	100,00	2307534,61
P moyenne =			294,3		

Le bassin versant de la Medjerda Mellegue reçoit en moyenne annuellement (294 ,3 mm/an) lorsqu'on utilise la méthode de Thiessen.

II.8.3 La méthode des isohyètes. (iso- valeurs)

La méthode la plus rigoureuse mais qui présente l'inconvénient de demeurer lourde en dépit des moyens actuels, est fondée sur l'utilisation des isohyètes. Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (iso-valeurs de pluies annuelles, mensuelles, journalières, etc.). Grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes, on peut tracer les courbes d'isohyètes. Le tracé des isohyètes est effectué avec le maximum de vraisemblance compte tenu de la région, du réseau, de la qualité de la mesure, etc. Il existe aujourd'hui des méthodes automatiques qui effectuent le tracé d'iso-valeurs par des moyens statistiques élaborés (technique de krigeage). Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i.P_i}{A} \quad \text{où} \quad P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec :

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 d'isohyètes,

P_i : moyenne des hauteurs *h* de précipitations entre deux isohyètes *i* et *i+1*.

CHAPITRE II : Étude de la pluviométrie et estimation de la lame d'eau précipitée dans le bassin versant de la Medjerda-Mellegue

Tableau.21: Résultats d'Application de méthode des isohyètes au bassins de la Medjerda mellegue

Isohyètes	Pi (mm)	Ai (km ²)	Ai (%)	Pi.Ai
inf. 300	229	5723,44	73,0	1310667,8
300_400	350	1011,29	12,9	353951,5
400_500	450	357,04	4,6	160668
500_600	550	283,32	3,6	155826
600_700	650	222,43	2,8	144579,5
700_800	750	99,6	1,3	74700
800_900	850	91,37	1,2	77664,5
super 900	953	52,51	0,7	50042,03
Total		7841	100	
P moyenne	296,91			

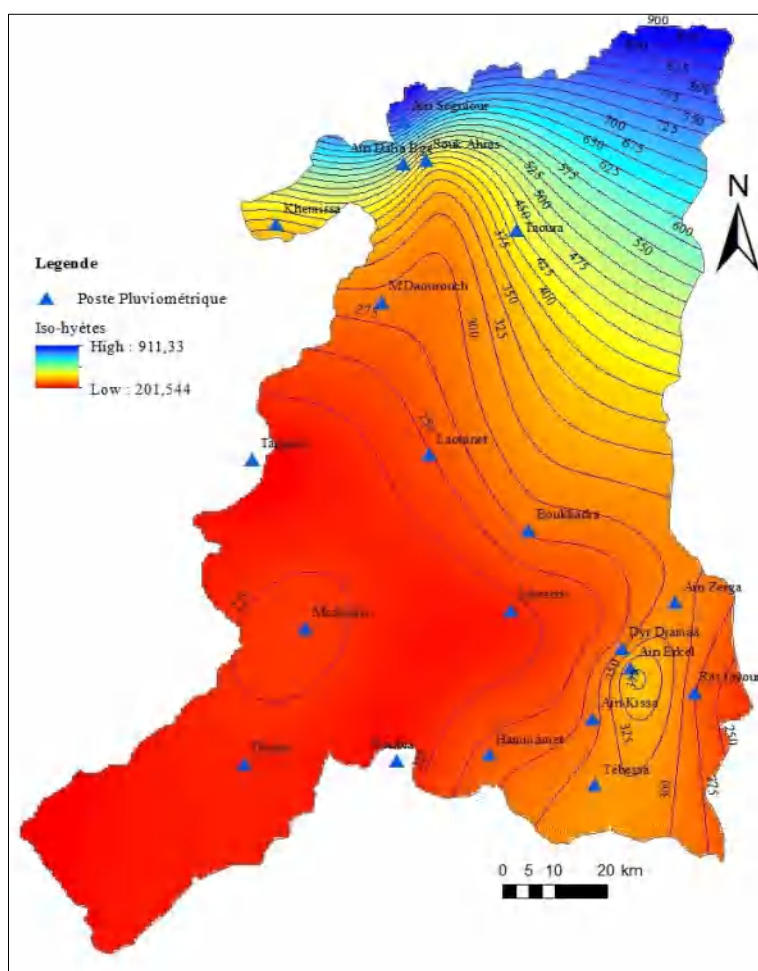


Figure 23 : Carte de pluies moyennes annuelles de la période 1972/2012

Source : La carte a été réalisé par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32), et les données pluviométriques annuelles.

L'analyse de la carte des pluies moyennes annuelles pour la période 1969/70-2011/12, indique qu'il y'a une décroissance des pluies annuelles du Nord-Est vers le Sud-Ouest du bassin-versant de Medjerda-Mellegue. Les valeurs supérieures à 500 mm sont concentrées au Nord-Est. Les isohyètes de 325 mm à 225 mm couvrent la majorité de la surface du bassin versant au Sud.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la pluviométrie de 19 postes pluviométriques dont les données ont été collectées auprès de l'A.N.R.H. et O.N.M sur une période de 43 ans (1969 –2012), Les données présentant des lacunes ont fait l'objet d'une étude d'homogénéisation basée sur l'utilisation des méthodes classiques (doubles cumuls, la loi- racine normale) puis le comblement des lacunes en utilisant le programme Hydrolab (macro bouche trous).

Cette étude a permis de conclure, que le bassin versant de la Medjerda-Mellegue qui est caractérisé globalement par un climat typiquement semi-aride de type continental (hiver froid et été chaud) reçoit une précipitation moyenne annuelle estimée à 296,91,9 mm, d'après la méthode des isohyètes, et 294,3 d'après la méthode Thiessen.

CHAPITRE III:

Étude des apports hydrologiques

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

III.1 Introduction

Les observations hydrométriques expriment le comportement hydrologique du bassin versant en un point donné et en un temps déterminé. Elles traduisent statistiquement l'interférence des facteurs physico-géographiques. Dans notre analyse nous nous sommes basés sur les données de cinq stations (Ain Dalia, Ouenza, Laouinet, Morsott, et El Azreg), les mesurés concernant la période (19972/1973 à 2008/2009).

Les données disponibles sont les chroniques des débits journaliers et les débits maximaux journaliers (moyens et instantanés) qui permettent d'étudier les crues. Les caractéristiques de ces stations hydrométriques sont consignées au tableau n° 22, figure 24.

III.2 Équipement du bassin versant Medjerda Mellegue

Le bassin versant de la Medjerda compte (05) stations hydrométriques. Toutes ces stations appartiennent au réseau hydrologique de l'A.N.R.H, les surfaces contrôlées des bassins jaugés calculée par logiciel Arc gis à l'aide du MNT de 30 mètres de résolution.

Tableau.22 Stations Hydrométriques du bassin versant de la Medjerda Mellegue

Stations	OUED	Code ANRH	Surface contrôlée (km ²)	Cordonnées		Période d'observation
				X (Km)	Y (Km)	
Morsott	Chabro	12-03-09	1313	975,98	277,48	1973/74-2008/09
El Aouinet	Mellegue amont	12-04-04	3526	968	298,28	1973/74-2001/02
Ouenza	Mellegue aval	12-04-01	4534	989,6	312,73	1973/74-2008/09
El Azreg	El Hourhir	12-05-22	513,9	995,99	306,17	1985/86-2008/09
Ain Dalia (1)	Medjerda	12-01-01	217	963,95	341,65	1973/74-1989/90
Ain Dalia (2)	Medjerda	12-01-01	193	963,95	341,65	1990/2015

(1) Le bassin versant d'oued Medjerda à la station hydrométrique de Souk Ahras 217 km²

(2) Le bassin versant au barrage d'Ain Dalia 193km²

- Les bassins jaugés (Morsott, El Aouinet, Ouenza) sont emboîtés

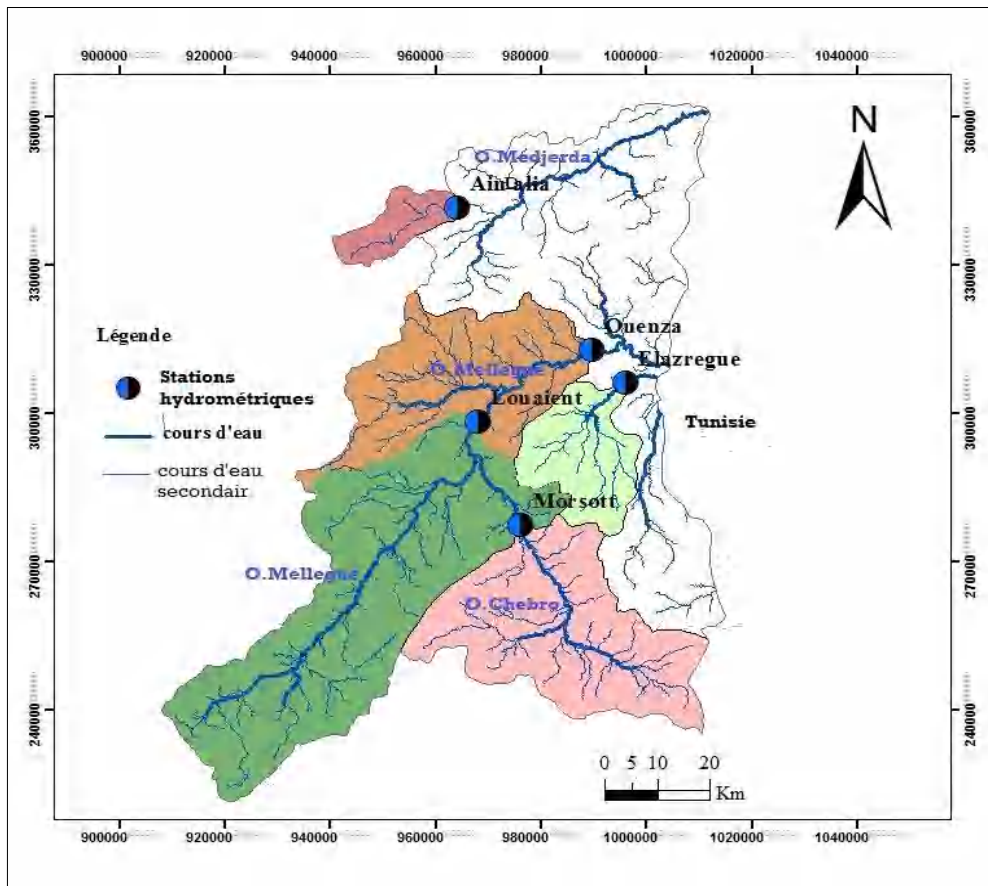


Figure 24 : Les bassins jaugés unitaire et emboîté

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur carte de l'annuaire hydrologique de l'ANRH.

III.3 Les données disponibles aux stations hydrométriques : mesure des débits et des concentrations

En Algérie, les données de mesure de débits et de transports solides en suspension sont disponibles à partir des années 1968-1970 grâce au réseau installé par l'A.N.R.H. D'après Demmak (1982), de nombreux auteurs se sont intéressés depuis longtemps aux transports solides et aux problèmes d'envasement des barrages (Medinger 1960, Tixeront 1960, Sogreah 1967).

III.3. 1 Mesures directes débit liquide et concentration

Elles sont basées sur les valeurs instantanées des débits liquides Q_l (m^3/s) et celles des concentrations des sédiments en suspension C (g/l) correspondantes. Les mesures sont réalisées par l'A.N.R.H. Ces mesures sont effectuées au niveau de la station hydrométrique de contrôle du bassin versant.

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

- Le débit liquide est calculé après lecture de la hauteur d'eau sur une échelle limnimétrique posée sur la rive de l'Oued et à l'aide de la courbe de tarage adéquate (régulièrement contrôlée et actualisée).
- La charge de la matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevée dans la section mouillée de l'Oued au moyen d'un conteneur de (50 cl). La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à 105°C pendant 30 minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé. Ce qui établit la concentration donnée en (g/l).

III.3.2 Les échantillons disponibles du concentration c (g/l)

Les périodes de mesures et les tailles des échantillons sont différents pour les stations hydrométriques et sont synthétisées dans le tableau suivant (tableau 24).

Tableau .23 Les données de concentration(g/l) disponibles aux stations hydrométriques

Sous bassins et stations de jaugeage	Période	Taille des échantillons couples QI (m ³ /s) et C(g/l)
Chabro à Morsott	Janv. 75_Aout2002	700
Mellegue aval à Ouenza	28Aout72_Février 2003	2328
Mellegue amont à El Aouinet	Mai.73_1985	1332
Medjerda à Ain Dalia	Sept.72_Jan 85	940
K'sob à El Azreg	Févr1985_Mai2011	310

L'analyse pour les sous- bassins de la Medjerda-Mellegue des données de concentrations permet de mettre en lumière et comprendre le problème des fréquences des mesures soulevé maintes fois par les chercheurs, (Demmak ,1982). Ce qui permet l'évaluation du T.S.S. pour 5 stations hydrométriques à l'échelle du bassin versant de la Medjerda-Mellegue.

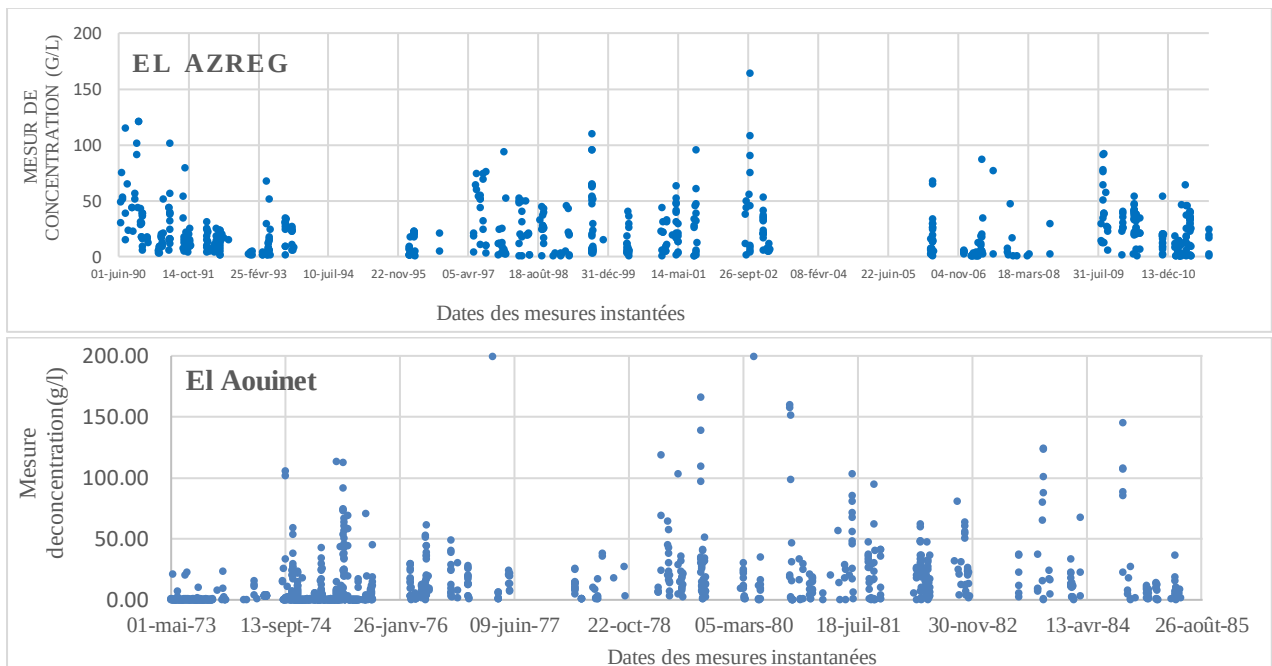


Figure .25 Position dans l'année des mesures de concentration (Mai.73_1985)

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

Tableau .24 Valeurs maximales de C et de QL par saison mesurés aux bassins jaugé

Morsott					
Saisons	Taille de l'échantillon	C (g/l) max mesurée	Débit Q(m ³ /s) C max	Date	Q (m ³ /s) max mesuré
Automne	74	93,92	8,7	08nov.91	44,63
Hiver	48	61,14	0, 33	23févr.96	87,12
Printemps	65	70,78	0 ,97	07avr.92	77,67
Été	30	135,54	2,8	16sep.91	68,5
Ouenza					
Automne	140	164	1,51	11 oct.02	287
Hiver	184	52,64	476,04	11 Jan.03	509,3
Printemps	310	102,38	11,4	21mai.03	541,2
Été	120	114,36	15,4	19 juil.90	332,2
El Aouinet					
Automne	304	226,98	4,4	25sep.80	207,5
Hiver	216	200	21,74	7mars.77	191
Printemps	438	200	0,17	20avril.80	153,6
Été	271	166,58	97,8	03sept.79	121,2
El Azreg					
Automne	39	34,83	0,089	16 octo.91	14,85
Hiver	52	23,2	0,14	15mars.96	58
Printemps	97	210	3,8	03 juin.91	42
Été	10	8,82	0,03	10 aout.07	1,85
Ain Dalia					
Automne	322	4,6	1,50	21-oct-76	43,6
Hiver	277	2,01	7,43	17 février -75	132
Printemps	234	2,1	3,8	16.04.1979	56,25
Été	107	0,15	0,10	7-sept.-72	0,975

III.3.3 Synthèse sur les données de concentration C (g/l) en lien avec les débits liquides QL(m³/s)

Sur les données de mesures des stations hydrométriques des bassins jaugés de la Medjerda-Mellegue, on note une très forte variabilité des valeurs de concentrations mesurées : les concentrations sont très fortes pour la station d'Ouenza sur oued Mellegue aval, 52 valeurs mesurées sont supérieures à 100 g/l et 10 valeurs supérieures à 200 g/l ; elles sont à relier aux formations tendre, « marno-calcaire ». A la station d'El Aouinet sur l'oued Mellegue Amont, 20 valeurs sont supérieures à 100 g/l, et 4valeurs supérieures à 200 g/l. Les concentrations mesurées à la station de Morsott ,14 valeurs supérieures à 100 g/l et pour le la station d'El Azreg, les concentrations instantanées dépassent 100g/l ne sont pas très fréquentes. On peut lier cette faiblesse à la lithologie (marne, calcaire et argile pour le bassin d'oued Mellegue). Les facteurs qui contrôlent les concentrations selon Janson (2002), Asselmann (2000), Bravard (1997) sont :

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

1. Les écoulements ;
2. La lithologie
3. La saison et l'état du couvert végétal
4. La disponibilité des sédiments résultant de l'érosion
5. La remise en mouvement de sédiments disponibles.

Les concentrations sont liées à la fois à l'intensité des pluies, à la saison (les pluies d'automne), à la lithologie (roches tendres, argiles et marnes) ... Les concentrations les plus fortes sont le plus souvent enregistrées en automne. Elles sont liées aux pluies orageuses d'automne qui trouvent des matières disponibles au transport. Cette très forte variabilité des concentrations permet de poser le problème des mesures.

- Technique de mesure des concentrations dans les oueds : l'échantillonnage est insuffisant à la fois par rapport aux abscisses (largeur de l'oued) et par rapport aux ordonnées (les profondeurs).
- Fréquence des mesures-périodicité : organisation dans le temps par rapport aux saisons.

Pour les bassins- versants algériens, les valeurs instantanées de concentration mesurées aux stations hydrométriques peuvent être très élevées. Ainsi (Demmak ,1982) cite des valeurs de 407 g/l sur l'oued El Abiod a M'chounech (le 24 septembre 1975), 387g/l sur l'oued Isser a Lakhdaria (le 26 /09/1971).

Ces concentrations très fortes, sont exceptionnelles et correspondent à des crues liées aux averses orageuses de début d'automne. On peut également citer des valeurs fortes à partir d'autres études. Ainsi, des valeurs supérieures à 100 g/l sont citées pour l'oued Berd par Remini (1997) et pour la Haute Tafna par Megnounif et al (2007). Ces concentrations atteignent même 250 g/l pour l'oued Isser (Remini, 1997). Par contre, les crues d'hiver avec des débits très importants venant après une période de plusieurs jours de pluie, ne produisent pas des concentrations très élevées, par contre, les apports solides sont très importants à cause des volumes écoulés.

Tableaux 25 répartition par classe des débits liquides et des concentrations (%)

Stations	Ain Dalia		El Azregue		Morsott		Laouinet		Ouenza	
Classes C(g/l) et Ql (m³/s)	(QL) %	(C) %	(QL)%	(C) %	(QL) %	(C)%	QL (%)	% (C)	(QL)%	(C)%
Inf à 0,01	1,05	0,53	13	0	2,3	0	0,2	0,3	0	18,4
<0,1	17,34	6,08	26	6	22,7	2,3	22,5	6	27,4	30,3
<1	27,78	34,53	23,71	32	36,9	28,2	24,2	21,9	45,6	19,3
<10	30,78	24,92	24,14	32	23,6	40,8	6,8	17,6	21,8	17,1
<20	8,63	14,26	6,43	15	6,5	12,6	9,6	13	1,9	3,7
<50	9,08	13,66	4,57	9	3,9	13,3	16	25,8	1,6	5,3
50 -100	3,75	4,2	2	4	1,3	1,6	8,5	12,8	1,6	5,8
100-200	1,58	1,5	0	2	2,9	1,3	7,3	2,2	0	0
Sup à200	0	0	0	0	0	0	4,8	0,4	0	0
Total%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

Les graphes et les tableaux ci-dessous présentent la répartition des concentrations et les débits liquides au niveau des stations hydrométriques du bassin versant de la Medjerda-Mellegue

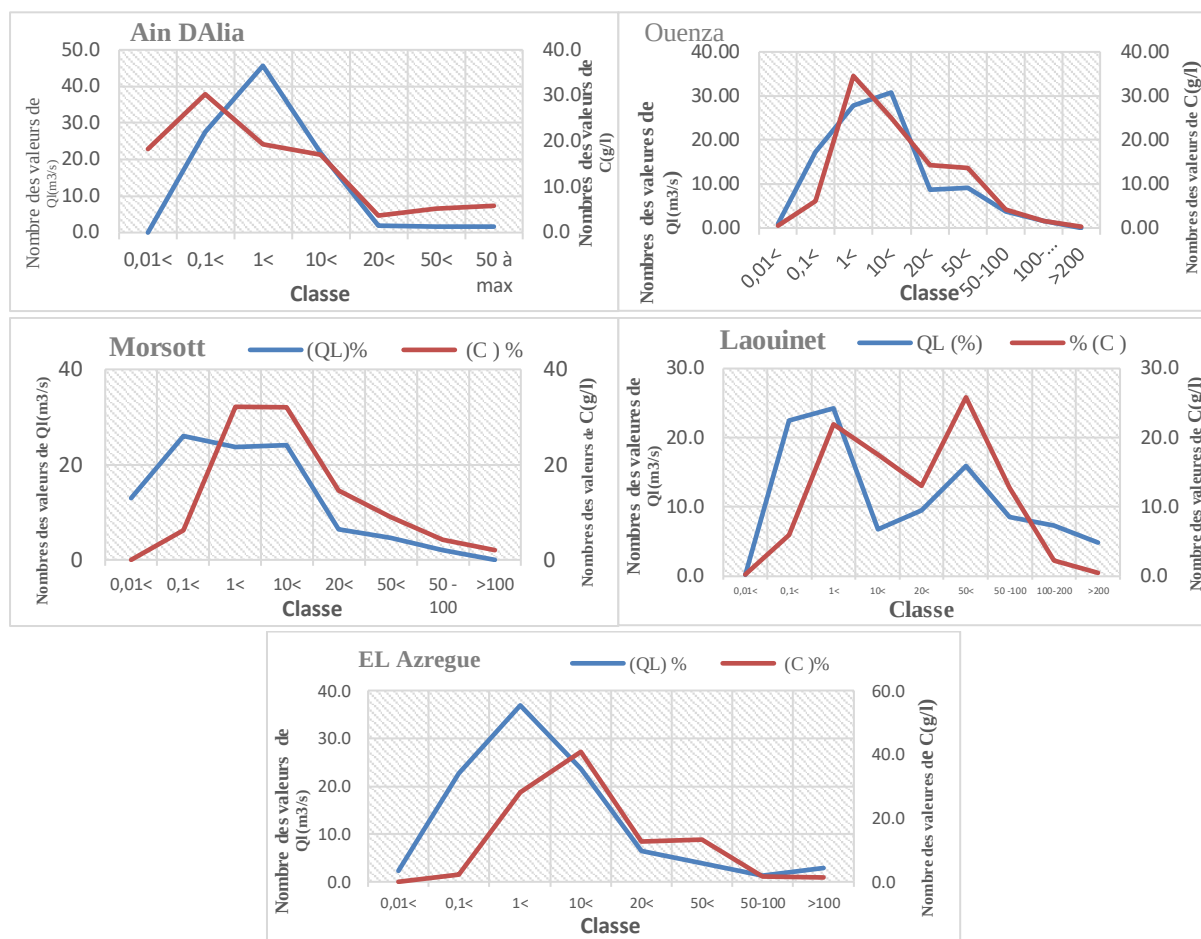


Figure 26. Analyse statistique des classes des mesures Ql-C (%)

III.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) .

Dans notre analyse on dispose d'une série de données hydrométriques qui varient entre 24 et 36 ans d'observation (Les données sont fournies par les services de l'A.N.R.H, (Tab 25).

III.4.1 Variations des débits annuels moyens bruts (m^3/s) :

La variation annuelle des modules au niveau des cinq stations est reportée dans le tableau.26.

Le tableau 26, montre que l'oued Medjerda à Ain dalia transite un débit de $3,19 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une surface drainée de 217 km^2 , l'oued Mellegue à Ouenza débite $2,71 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une aire de réception de 4534 km^2 , L'oued Mellegue amont à Elaouinet transite un débit de $2,1 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une surface drainée de 3526 km^2 , l'oued Chabro à Morsott, et L'oued K'sob à El Azreg

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

qui sont des bassins de surface respectivement (1313 km², 509,13 km²) affichent un débit de 0,3 m³/s.

Tableau 26 Débits bruts et spécifiques moyens annuels

Années	Ain Dalia		Ouenza		El Aouinet		Morsott		El Azreg	
	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)	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)
Moyenne	3,19	02,09	2,7	0,6	2,1	0,6	2,9	2,0	0,3	0,5
Écart type	3,29	2,13	1,9	0,4	1,5	0,4	3,2	2,1	0,3	0,6
Cv	1.098	1.156	0.685	0.674	0.721	0.721	1.115	1.032	1.112	1.112
Cv%	109,8	115,6	68,5	67,4	72,1	72,1	111,5	103,2	111,2	111,2

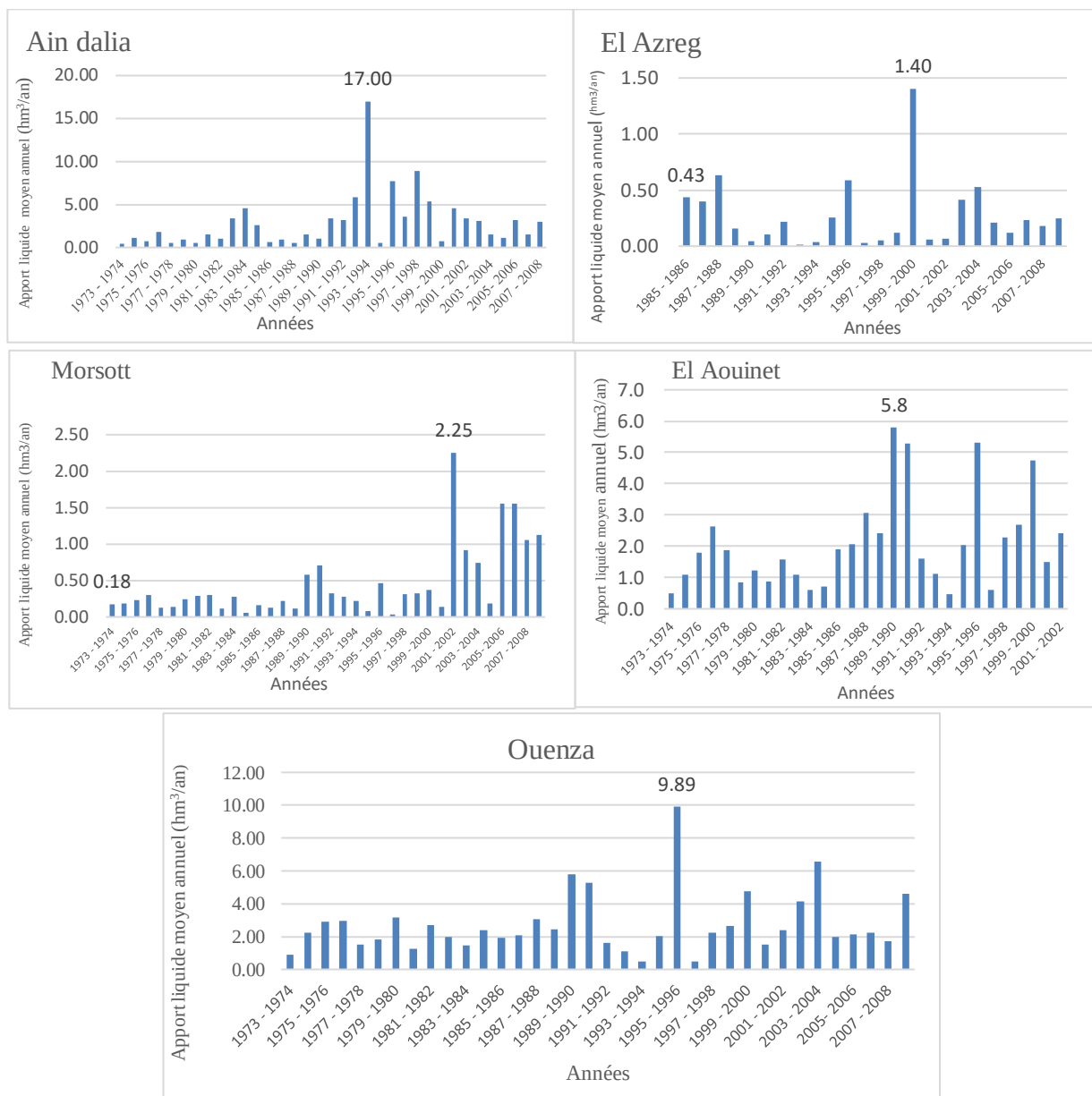


Figure.27 Variations interannuelles des modules moyens annuels bruts des oueds de la zone d'étude Medjerda-Algérie orientale

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

III.4.2 Variations des débits annuels moyens spécifiques (l/s/km²) :

Afin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans les cinq bassins, nous utiliserons les modules spécifiques, car ces derniers permettent de les comparer entre eux en ramenant le débit à l'unité de surface. L'abondance spécifique des bassins varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal. C'est donc un élément purement géographique.

Tableau 27: Débits spécifiques et lames d'eau écoulées

Station	Surface (km ²)	Q (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	E (mm)
<i>Ain Dalia</i>	217	1.53	7.05	222.4
<i>El Azreg</i>	513,9	0,27	0,53	16,74
<i>Morsott</i>	1313	0,30	0,23	7,24
<i>El Aouinet</i>	3526	2,07	0,59	18,52
<i>Ouenza</i>	4534	2,67	0,59	18,60

Q : module annuel (m³/s) ; **q** : débit spécifique (l/s/km²) ; **E** : lame d'eau écoulée (mm)

Le bassin versant de la Medjerda à Ain Dalia (217 km²), a un débit spécifique de 7.05 l/s/km² qui correspond à une lame de au écoulée de 222.4 mm Le bassin versant d'Ouenza (4534 km²), il reçoit moins de précipitations. Son débit spécifique est de 0,59 l/s/km² correspondant à une lame d'eau écoulée de 18,6 mm, Le bassin versant de Morsott (1313 km²) reçoit moins de précipitations. Son débit spécifique est de 0,23 l/s/km², soit une lame d'eau écoulée de 7,24 mm Quant à El Azreg et El Aouinet leurs débits spécifiques sont respectivement de 0,533 et 0,593 l/s/km² équivalents à une lame d'eau écoulée de 16,74 et 18,52 mm Ces valeurs relativement faibles du débit spécifique au niveau de ces bassins, sont dues à la faiblesse des précipitations.

III.5 L'irrégularité inter annuelle des modules et leur répartition statistique

Tableau.28. Valeurs caractéristiques des modules au niveau des bassins versant

Station	Q moyen (m ³ /s)	Q max (m ³ /s)	Q min (m ³ /s)	Nbr Année > Q moyen	Q max / Q min	Cv
Ain dalia	1.53	17.11 (1992)	0.43 (1980)	15sur 34	39.79	1,002
El Azreg	0,3	1,4 (87-88)	0,02 (80-81)	7 sur 24	85,99	1,112
Morsott	0,3	2,25 (01-02)	0,02 (93-94)	10 sur 29	12,26	1,346
El Aouinet	2,1	5,8 (89-90)	0,5 (93-94)	11 sur 29	68,59	0,721
Ouenza	2,7	9,89 (95-96)	0,028 (82-83)	11 sur 39	21,03	0,718

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

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 Q_i au débit moyen d'une longue série d'observation (Q moyen). 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 ($R = Q_M/Q_m$).

Les coefficients d'immodération reportés dans le tableau 29 sont élevés, ils varient entre (12,26 et 85.99). Cette valeur maximale (85.99) montre une très forte irrégularité des débits interannuels.

III.5.1 Coefficient de variation :

La variation interannuelle peut être aussi précisée par le coefficient de variation (C_v) (tableau 28). Les valeurs du coefficient de variation sont élevées. Nous relevons les plus fortes valeurs au niveau de Morsott, El Azregue, et Ain Dalia (1,346 ; 1,11 2 ; 1,002). Cette variabilité dans l'ensemble est liée à l'alimentation essentiellement pluviale irrégulière des cours d'eau, d'autant plus qu'il s'agit d'une période climatique « sèche ».

III.5.2 L'hydraulicité

Les séries hydrométriques permettent de cerner l'évolution des débits sur des années successives. Les courbes des variations interannuelles des modules, montrent de fortes fluctuations de débits d'une année à l'autre ainsi qu'une indigence quasi générale de l'écoulement pendant série des années. En témoignent les valeurs de l'hydraulicité qui sont en majorité inférieures au module (1). (Tableaux 29). En effet, plus de 50% des années hydrologiques sont déficitaires. Ce fait, confirme l'hypothèse formulée au chapitre II quant à la tendance climatique "sèche" de ces deux dernières décennies. Certaines valeurs des modules annuels sont élevées, conséquence des fortes crues de saison printanière et automnale qu'avaient connue ces bassins.

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

Tableau 29 : Hydraulicité des sous bassins jaugés de Medjerda-Mellegue

Stations	Ain Dalia	El Azreg	Morsott	El Aouinet	Ouenza
Années	Qi/Qm	Qi/Qm	Qi/Qm	Qi/Qm	Qi/Qm
1973 - 1974	//	//	0,59	0,24	0,33
1974 - 1975	0,15	//	0,62	0,52	0,84
1975 - 1976	0,54	//	0,78	0,87	1,09
1976 - 1977	0,42	//	1,00	1,27	1,10
1977 - 1978	0,68	//	0,43	0,91	0,56
1978 - 1979	1,13	//	0,45	0,41	0,69
1979 - 1980	0,32	//	0,81	0,59	1,18
1980 - 1981	0,24	//	0,29	0,43	0,46
1981 - 1982	0,57	//	1,00	0,77	1,01
1982 - 1983	0,18	//	0,38	0,53	0,00
1983 - 1984	0,32	//	0,91	0,29	0,55
1984 - 1985	0,15	//	0,18	0,34	0,89
1985 - 1986	0,48	1,59	0,55	0,92	0,71
1986 - 1987	0,3	1,47	0,43	1,00	0,77
1987 - 1988	1,1	2,33	0,73	1,48	1,15
1988 - 1989	1,02	0,59	0,39	1,17	0,91
1989 - 1990	1	0,16	1,93	2,80	2,17
1990 - 1991	1,82	0,39	2,35	2,55	1,97
1991 - 1992	4,78	0,79	1,08	0,77	0,60
1992 - 1993	2,3	0,06	0,93	0,54	0,42
1993 - 1994	0,17	0,14	0,07	0,23	0,18
1994 - 1995	2,2	0,93	0,26	0,98	0,76
1995 - 1996	1,15	2,17	1,53	2,56	3,71
1996 - 1997	2,6	0,10	0,11	0,29	0,18
1997 - 1998	1,66	0,18	1,03	1,10	0,84
1998 - 1999	0,23	0,44	1,07	1,29	1,00
1999 - 2000	1,42	5,16	1,25	2,29	1,77
2000 - 2001	1,06	0,22	1,67	0,72	0,56
2001 - 2002	0,93	0,24	2,30	1,16	0,90
2002 - 2003	0,48	1,53	1,85	//	1,55
2003 - 2004	1,06	1,95	3,65	//	2,46
2004 - 2005	0,92	0,76	0,47	//	0,74
2005- 2006	0,45	0,44	3,87	//	0,80
2006 - 2007	1,42	0,85	2,65	//	0,84
2007 - 2008	1,06	0,65	2,82	//	0,64
2008-2009	//	0,92	1,22	//	1,73
Max	4,78	5,16	3,87	2,80	3,71
Min	0,15	0,06	0,07	0,23	0,00

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

III.6 Bilan moyen annuel de l'écoulement

Nous exprimons par "P" la tranche d'eau précipitée et par "E" à lame d'eau écoulee 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". Pour cette étude, nous retiendrons l'année hydrologique correspondant à l'année climatique (septembre- août) adoptée par l'A.N.R.H

Tableau 30 Bilans moyens annuels de l'écoulement aux différentes stations

Station	P (mm)	E (mm)	D (mm)	C %
Ain Dalia	531,5	222.4	309.1	41.83
El Azreg	370,90	16,740	354,16	4,51
Morsott	302,44	7,237	295,20	2,39
El Aouinet	425,48	18,518	406,96	4,35
Ouenza	374,92	18,595	356,32	4,95

L'étude du déficit montre le terme du bilan hydrologique $D = P - E$, c'est à dire la différence entre la hauteur d'eau précipitée reçue par un bassin en une période considérée et l'écoulement dans l'oued de ce bassin pendant cette même période. Le déficit annuel moyen de l'écoulement augmente avec l'accroissement du total pluviométrique moyen annuel, il passe de 309.1 mm à Ain Dalia, 406,96 mm sur El Aouinet ,356 mm à Ouenza, 295,2 mm à Morsott,

III.7 Ressources annuelles en eau de surface disponibles

L'apport annuel moyen des bassins versants, selon la série étudiée est donné au tableau 31

Tableau 31 Évaluation de l'apport total moyen annuel écoulé et ses extrêmes

Paramètres/Station	Ain Dalia	Morsott	Ouenza	El Aouinet	El Azreg
Moyenne	36,09	9,50	84,31	65,29	8,60
Écart type	22,73	12,79	60,57	47,05	9,57
Cv	0,630	1,35	0,72	0,72	1,11
Cv%	63,02	134,58	71,84	72,05	111,25
Max	100,1	70,81	311,97	182,81	44,28
min	12,06	0,63	0,09	14,91	0,51

L'apport annuel moyen n'a, cependant qu'une signification théorique en raison de la forte variabilité inter annuelle de l'écoulement superficiel mise en lumière par les valeurs de l'hydraulicité et du coefficient de variation.

III.7.1 Débits moyens mensuels

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).

III.7.1.1 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. L'examen des tableaux ci dessus et les histogrammes des, montrent que les maximas mensuels sont observés au mois de mai pour toutes les stations, alors que les minimas mensuels sont enregistrés en juillet-août, ce minimum est précoce pour la station de Morsott où il est observé dès juin.

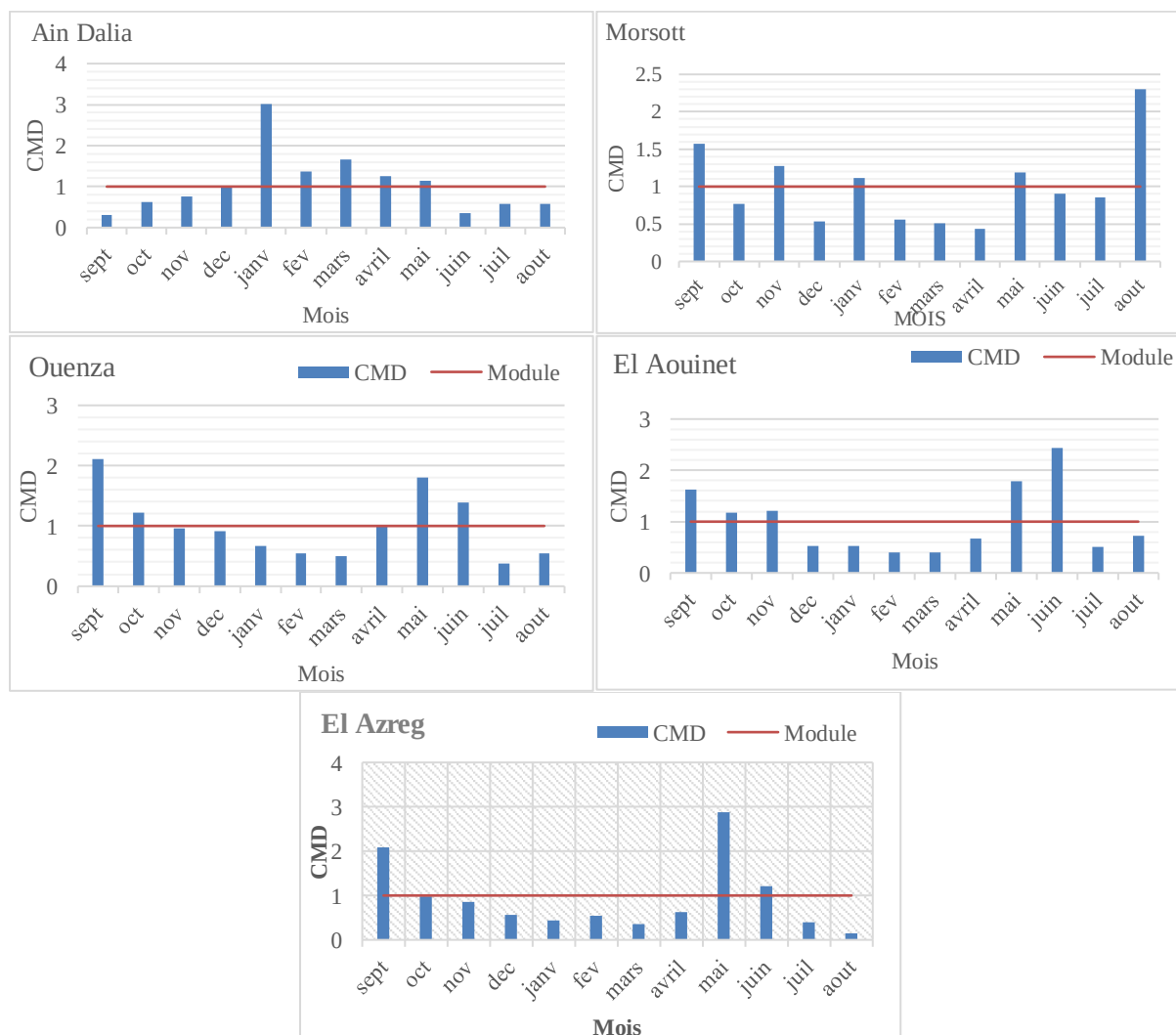


Figure 28 Variations des débits moyens mensuels des sous bassins de la zone d'étude (Medjerda-Algérie orientale)

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

Tableau 32 : Répartition des débits mensuels des sous bassins de la zone d'étude

Ain Dalia												
M	0.98	1.97	2.44	3.22	9.61	4.36	5.31	3.98	3.63	1.16	1.86	1.83
CMD	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
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
σ	5.54	7.45	7.69	5.73	11.67	11.28	8.35	7.37	8.83	5.51	7.47	7.48
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
El Azreg												
M	0,57	0,29	0,26	0,17	0,13	0,16	0,11	0,19	0,87	0,36	0,12	0,05
CMD	2,08	0,97	0,86	0,56	0,43	0,55	0,35	0,63	2,88	1,21	0,39	0,15
Max	4,98	1,74	1,49	1,99	1,24	2,28	0,51	1,13	10,41	1,96	0,86	0,19
Min	0,0029	0,0042	0,0036	0,0028	0,0031	0,0025	0,0008	0,0016	0,0030	0,0007	0,0005	0,0002
σ	1,11	0,48	0,42	0,41	0,26	0,46	0,15	0,32	2,17	0,57	0,23	0,06
Cv	1,96	1,65	1,61	2,43	1,97	2,82	1,41	1,68	2,50	1,57	1,97	1,36
Morsott												
Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
M	0,47	0,23	0,38	0,16	0,34	0,17	0,15	0,13	0,36	0,27	0,26	0,69
CMD	1,57	0,77	1,27	0,53	1,11	0,56	0,51	0,44	1,18	0,90	0,85	2,31
Max	3,25	1,35	4,12	1,22	3,90	1,53	0,90	1,06	2,90	2,01	4,41	18,71
Min	0,0002	0,0016	0,0017	0,0003	0,0002	0,0001	0,0008	0,0003	0,0000	0,0024	0,0018	0,0002
σ	0,76	0,32	0,88	0,29	0,82	0,33	0,21	0,23	0,65	0,50	0,83	3,47
Cv	1,61	1,38	2,29	1,84	2,44	1,97	1,39	1,76	1,83	1,84	3,24	4,99
El Aouinet												
M	3,36	2,43	2,52	1,08	1,09	0,83	0,81	1,39	3,72	5,06	1,06	1,50
CMD	1,62	1,17	1,22	0,52	0,53	0,40	0,39	0,67	1,80	2,44	0,51	0,73
Max	11,39	11,87	23,13	8,64	17,01	6,85	5,07	6,36	32,43	47,69	4,72	19,68
Min	0,0553	0,0358	0,0255	0,009	0,0029	0,050	0, 064	0, 014	0,093	0,0133	0,014	0,014
σ	3,56	3,11	4,68	1,94	3,14	1,44	1,19	1,98	6,71	9,35	1,40	3,68
Cv	1,06	1,28	1,86	1,80	2,87	1,73	1,48	1,42	1,81	1,85	1,32	2,45
Ouenza												
M	5,63	3,26	2,54	2,42	1,80	1,47	1,35	2,63	4,82	3,72	0,99	1,44
CMD	2,110	1,222	0,953	0,906	0,674	0,550	0,506	0,983	1,807	1,393	0,371	0,540
Max	69,46	18,26	23,13	28,45	17,01	12,79	8,10	13,89	32,43	21,69	11,69	19,68
Min	0,0047	0,016	0,000	0,009	0, 029	0,028	0,023	0,012	0,019	0,020	0,00	0, 00
σ	12,10	4,39	4,94	5,32	3,94	2,74	1,82	3,62	6,67	5,15	2,06	3,48
Cv	2,15	1,34	1,94	2,20	2,19	1,87	1,35	1,38	1,38	1,38	2,08	2,41

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

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

Les régimes moyens de ces bassins à alimentation essentiellement pluviale comportent généralement des hautes eaux de saison froide, de janvier à mai et des basses eaux de saison chaude, de juin à septembre.

Pour le bassin d'Ain Dalia la période des hautes eaux commence du mois de Janvier avec un maximum de débit ($9.61 \text{ m}^3/\text{s}$) 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 ($0.98 \text{ m}^3/\text{s}$). Par ailleurs, la période des basses eaux est assez décalée dans le temps, elle ne commence qu'au mois de juin du fait de l'importance relative des précipitations de printemps. La moyenne mensuelle minimale est également retardée, elle se situe en août. Nous pensons que ceci est lié à l'alimentation de l'oued par des circulations d'eaux souterraines qui soutiennent l'écoulement.

Pour le bassin de Laouinet, la période des hautes eaux est nettement marquée au cours de trois mois successifs : septembre, octobre et novembre, mais les CMD tombent au-dessous de l'unité pendant les deux mois suivants avant de croître à nouveau en mai et juin. La moyenne mensuelle maximale se situe en juin.

La période de basses eaux, est ici plus précoce que dans le haut Mellegue à Ouenza, elle commence en septembre, octobre et novembre. Les CMD tombent au-dessous de l'unité pendant décembre, janvier, février et mars avant de croître à nouveau en avril, mai et juin. Il en est de même pour la moyenne mensuelle minimale qui est réalisée en juillet. Ceci peut s'expliquer, à priori par les variations saisonnières des précipitations, sans échapper aux effets importants de l'évapotranspiration potentielle.

Quant à l'oued K'sob à El Azreg, les hautes eaux n'apparaissent qu'en septembre et mai. Les pluies du début de l'année climatique n'interviennent donc pas là aussi efficacement au soutien de l'écoulement superficiel. La période des basses eaux est décalée dans le temps par rapport à l'oued Mellegue, elle ne commence qu'au mois de juillet. À cause des précipitations importantes du printemps. La moyenne mensuelle minimale est observée en août.

Pour le bassin du Morsott, la période des hautes eaux se manifeste à partir de septembre. Les formations karstiques en amont retardent les ruissèlements arrivés des pluies importantes d'automne sur les monts de Tébesa « dans la région de Morsott, au sommet des calcaires aptiens sur lesquels le Vraconien repose directement » d'y arriver à l'exutoire du Morsott. Ainsi, il apparaît que les régimes hydrologiques sont nuancés, ils se calquent dans leurs grandes lignes sur ceux des précipitations, mais le parallélisme entre ces deux phénomènes est plus ou moins modifié par le rôle important de la lithologie (restitutions souterraines) et par celui des températures (évaporation). Les conclusions de cette analyse confirment nos suggestions émises quant au choix des limites de l'année, hydrologique.

III.7.2 Coefficient de variation

L'irrégularité mensuelle et saisonnière des débits ressort parfaitement des valeurs calculées du C_v pour les différentes stations et pour les différents mois de l'année. Il apparaît en effet que l'écoulement mensuel est extrêmement variable, pour certains mois le coefficient de variation dépasse largement l'unité et est compris entre (1,38 et 3.24) pour Morsott, El Aouinet (1,06 et 2,45) et Ouenza (1,34 et 2,41) ; (entre 0.92 et 1.98 pour Ain Erkel, entre 1.36

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

et 2.82 pour El Azreg. La variabilité inter mensuelle des débits est accentuée dans l'ensemble, ceci à cause vraisemblablement de la faiblesse des précipitations de ces 20 dernières années et de leur caractère très aléatoire. Ces données attestent d'une variabilité du régime encore plus marquée qu'à l'échelle annuelle.

Contrairement aux précipitations, la plus forte variabilité de l'écoulement fluvial concerne la période de saison froide ou de hautes eaux (mai), ceci s'explique par l'importance et la fréquence élevée des crues en saison printanière. Au contraire, la variabilité relativement modérée des basses eaux peut être justifiée par la fréquence limitée des crues en saison estivale ainsi que par le rôle prépondérant des eaux souterraines alimentant les cours d'eau en périodes d'étiages. La confrontation entre la tranche d'eau précipitée et la lame d'eau écoulee, nous montre qu'au niveau des cinq stations, les débits ne suivent pas exactement les hauteurs mensuelles pluviométriques. Ceci est net dans les trois premiers mois de l'année hydrologique. Il est intéressant de constater d'après ces histogrammes, l'importance de la rétention et de la restitution suivant les bassins.

III.7.3 Débits moyens journaliers

L'étude du régime des cours d'eau, à l'échelle journalière, mérite une analyse car les oueds subissent des variations journalières importantes. Nous possédons une chronique des débits moyens journaliers s'étalant de :

III.7.3.1 Variations journalières des débits : Oued Chabro à Morsott

Pour l'année humide (2001/2002), la courbe des débits journaliers (fig.29a) fait ressortir deux périodes :

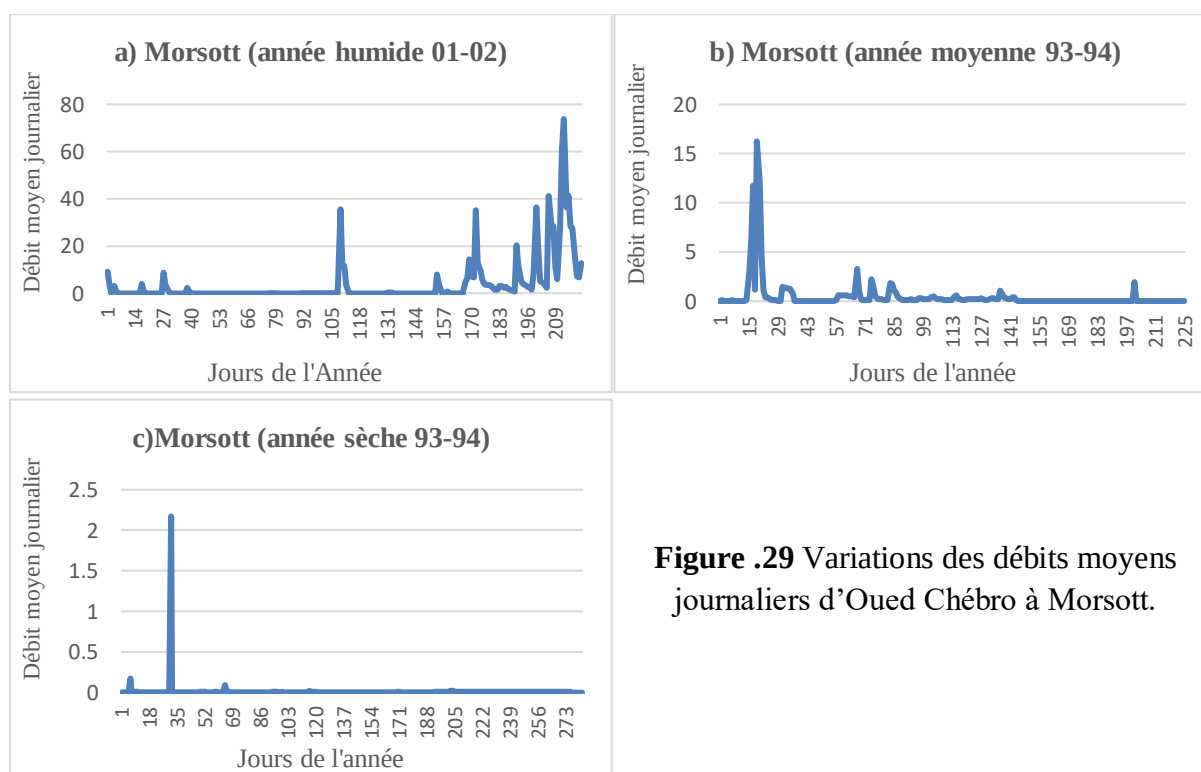


Figure .29 Variations des débits moyens journaliers d'Oued Chébro à Morsott.

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

Une saison pluvieuse qui a débuté de décembre à juin (hiver – printemps) au cours de laquelle les crues ont été brutales, et une saison chaude de tarissement pour le reste de l'année. La décroissance des débits est moins brusque que les montées des eaux, ceci s'explique par les crues de la saison printanière et estivale.

Les débits moyens journaliers (Fig.29b) varient selon une fréquence propre à chaque mois. Au début de l'automne, une grande partie de la lame d'eau précipitée ruisselle étant donné que le sol est complètement sec et étanche à cause d'une longue période estivale sèche. Par la suite, il y a un gonflement rapide du cours d'eau et l'apparition des premières montées des eaux en hiver qui interviennent brusquement, elles durent un temps faible puis décroissent. A ce moment le sol est suffisamment gorgé d'eau, les débits grossissent sous l'effet des maxima de crue. A partir du mois d'Avril les débits commencent à décroître lentement et presque régulièrement jusqu'au minimum.

Pour l'année sèche (1993/94) (fig.29c), le débit journalier minimal atteint 0,019 m³/s. Cette faiblesse du débit est aggravée par la rareté des précipitations. La capacité de rétention du bassin est relativement faible. A ajouter à cela la forte évaporation en cette saison

III.7.3.2 Oued Mellegue à Ouenza :

La saison pluvieuse de l'année humide (1995/96) (fig. 30a)-commence au mois de septembre « Le débit journalier maximal a été de 299,10 m³/s au mois de septembre », elle se limite à trois mois (fin janvier –début avril) pendant lesquels les débits journaliers dépassent la moyenne annuelle.

Pour l'année sèche (1982/83) (fig.30b), le débit maximal observé a été enregistré au mois d'octobre avec 12 m³/s. On note là certaines perturbations dues probablement aux petites averses de brusques. En moyenne, l'oued Mellegue à Morsott (fig.30c) marque une période de hautes eaux journalières à partir du mois de Mars jusqu'au mois de mai à partir duquel on note une chute rapide des débits.

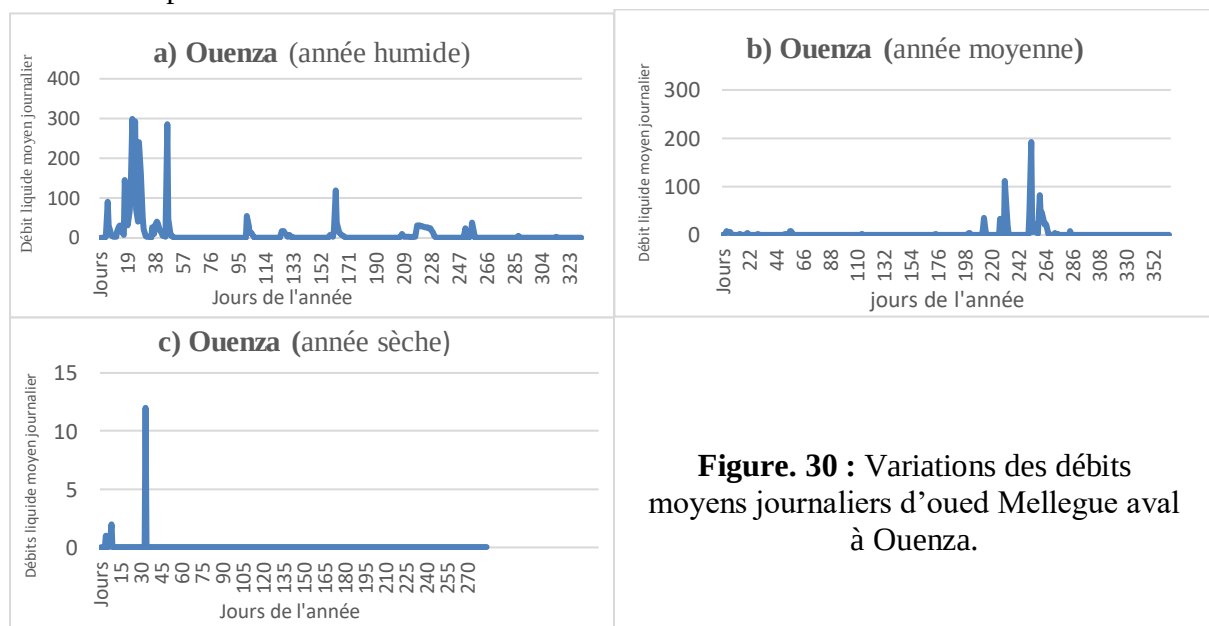


Figure. 30 : Variations des débits moyens journaliers d'oued Mellegue aval à Ouenza.

III.7.3.3 Oued Mellegue amont à El Aouinet :

L'année humide (1989/90) (fig.31a) bien que plus faible, est marquée par une variation des débits journaliers plus brutale qu'au niveau d'Ouenza : en effet une période de hautes eaux bien marquée à partir du mois de décembre qui continue jusqu'au mois de mai pour décroître jusqu'à s'annuler en juillet et s'augmente en moi d'août par le fait des averses.

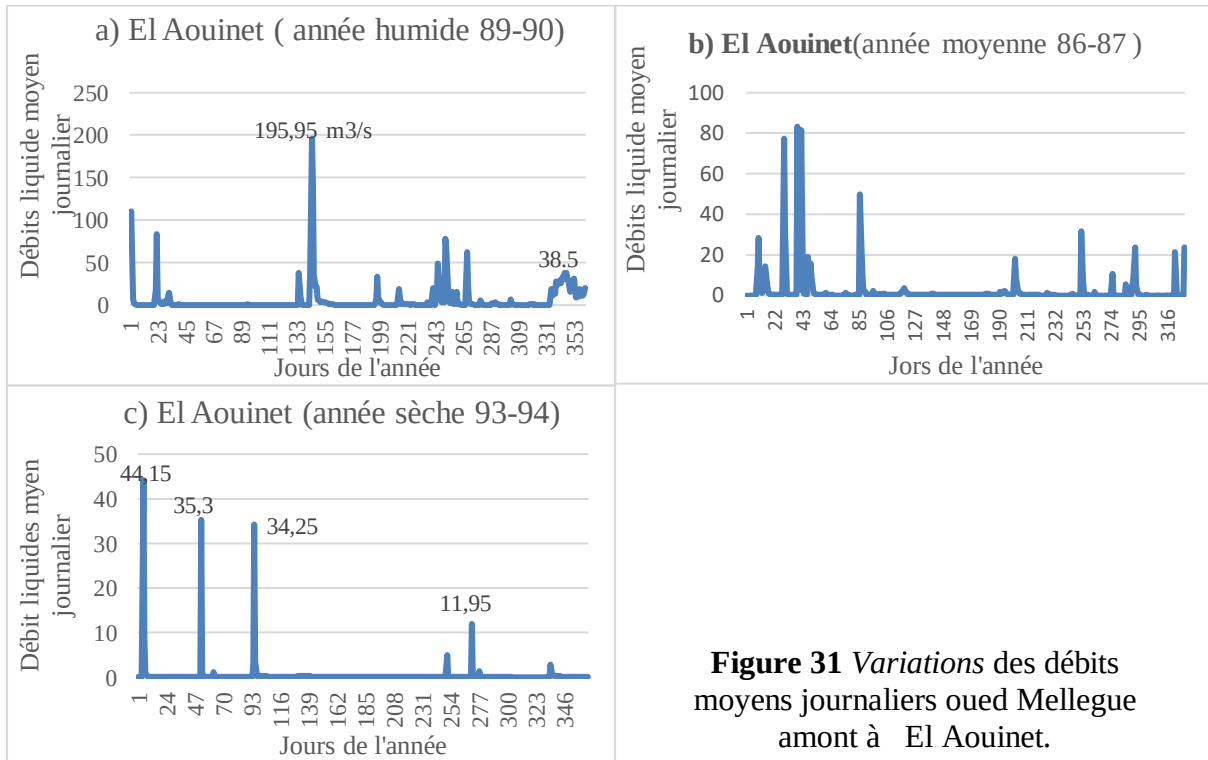


Figure 31 Variations des débits moyens journaliers oued Mellegue amont à El Aouinet.

Par contre, en ce qui concerne l'année sèche (1993/94) (fig.31b), la perturbation des débits journaliers est plutôt précoce. Trois maxima sont enregistrés respectivement aux mois de septembre, octobre et novembre. Entre ces maxima un creux se dessine au mois de décembre jusqu'à mai où l'écoulement devient plus faible.

En moyenne, pour les débits journaliers de l'oued Mellegue amont à El Aouinet (fig.31c), la période des hautes eaux est généralement limitée à la saison automnale. Au-delà, nous notons une longue période d'étiage qui dure parfois en hiver.

III.7.3.4 Oued K'sob à El Azreg

La saison pluvieuse de l'année humide (1999/00) (fig. 32.a) se limite à deux mois (septembre – mars) pendant lesquels les débits journaliers dépassent la moyenne annuelle. Le débit journalier maximal a été de 246,73 m³/s au mois de mars.

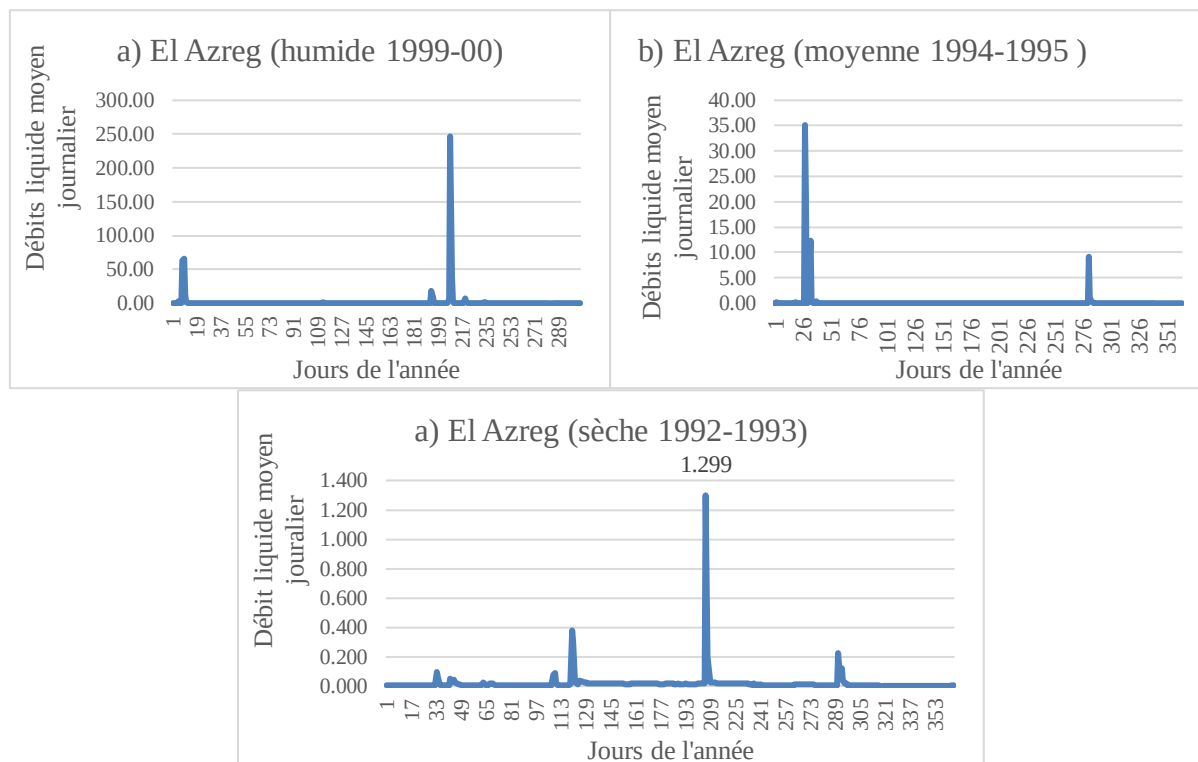


Figure.32 Variations journalières des débits d'oued K'sob à El Azreg

Pour l'année sèche (1992/93) (**fig.32.b**), le débit maximal observé a été enregistré au mois de février avec 1,29 m³/s. On note là certaines perturbations dues probablement aux petites averses brusques. En moyenne, l'oued K'sob (**fig.32.c**) marque une période de hautes eaux journalières à partir du mois de septembre à partir duquel on note une chute rapide des débits suite par une longue durée de basses eaux.

III.8 Variation des apports liquides moyens interannuels, saisonniers et mensuels

III.8. 1 Variation des apports liquides moyens interannuels

Les variations interannuelles des apports liquides calculées pour les cinq sous bassin montrent une grande irrégularité pour les différentes périodes d'observation, liée à l'irrégularité des précipitations.

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

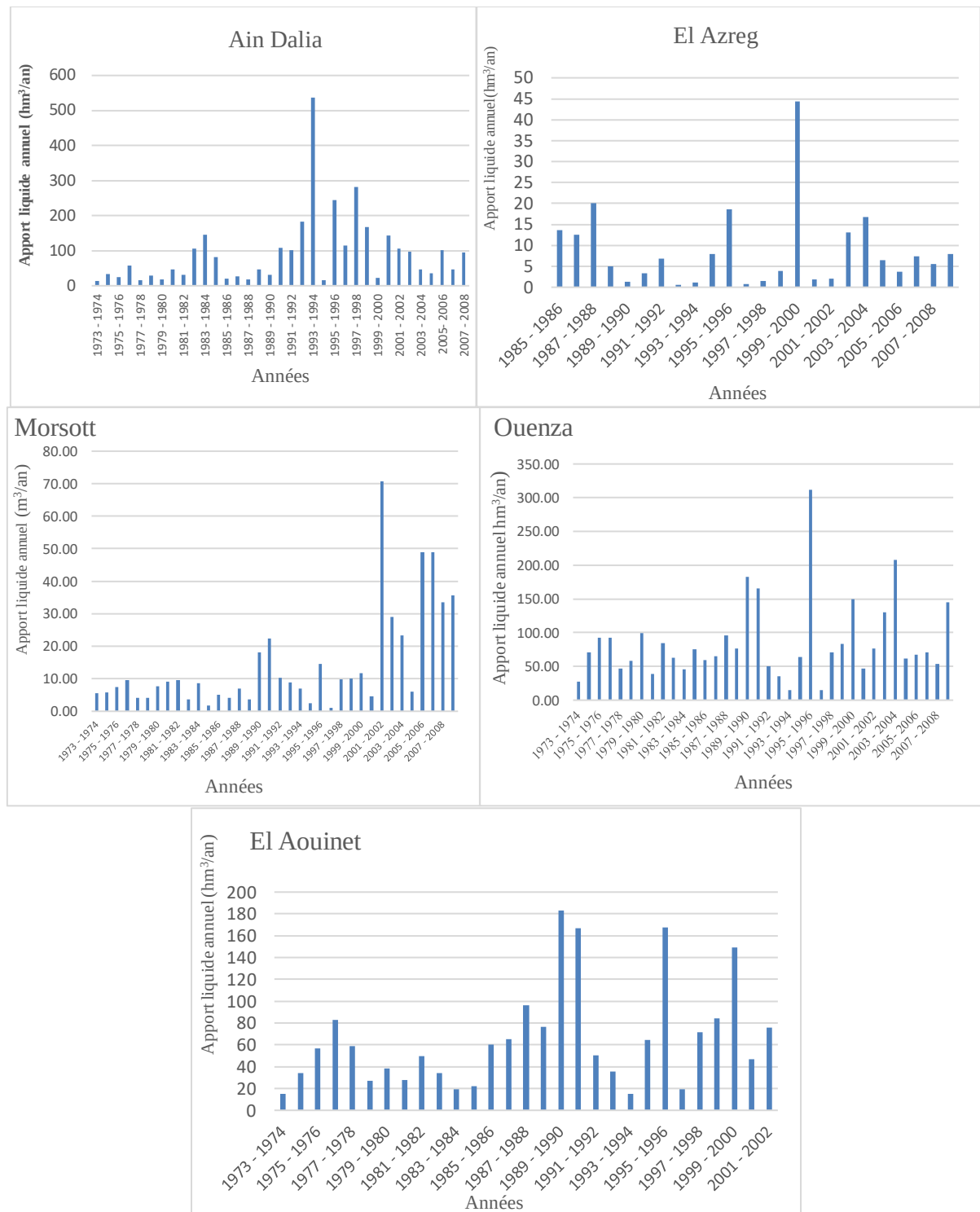


Figure.33 : Variation des apports liquides annuels

Le bassin de Morsott engendre un apport moyen de $9,5 \text{ hm}^3$, à Ouenza et Laouinet un apport liquide moyen annuel garanti respectivement de 84 hm^3 , 64 hm^3 grâce à la surface importante et leur réseau hydrographique, à Ain Dalia l'apport moyen produit par l'oud Medjerda est de 91 hm^3 .

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

III.8.2 Variation des apports liquides moyens saisonniers

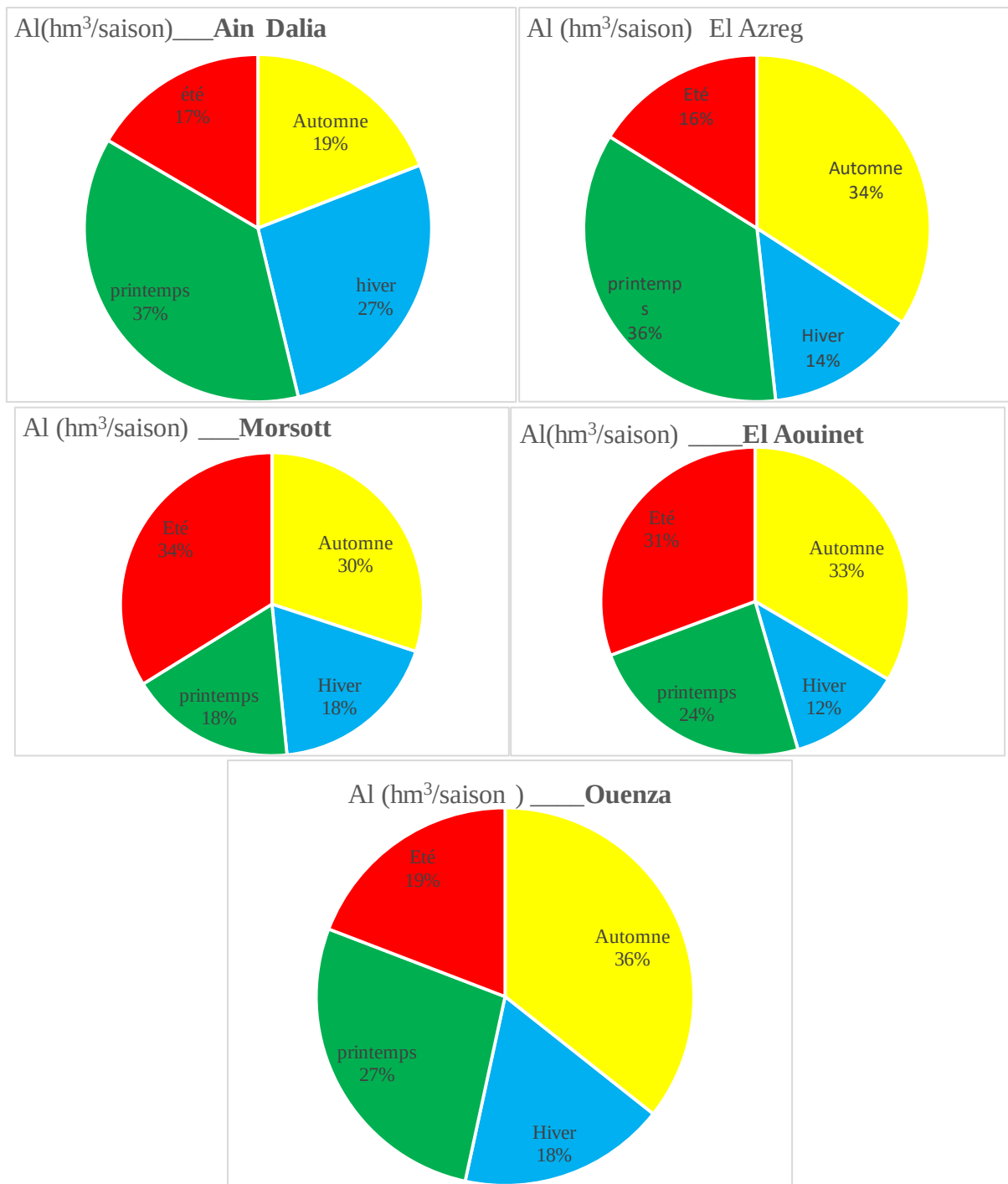


Figure.34 : Variation des apports liquides moyens saisonniers

Les graphes de variations saisonnières des apports liquides montrent qu'il y a une dominance printanière pour les bassins d'Ain Dalia, El Azreg (36 et 37%) de l'apport annuel, par contre au niveau des bassins d'Ouenza, Morsott, et El Aouinet on trouve une dominance automnale de 30 à 36% des apports annuels.

III.8.3 Variation des apports liquides moyens mensuels

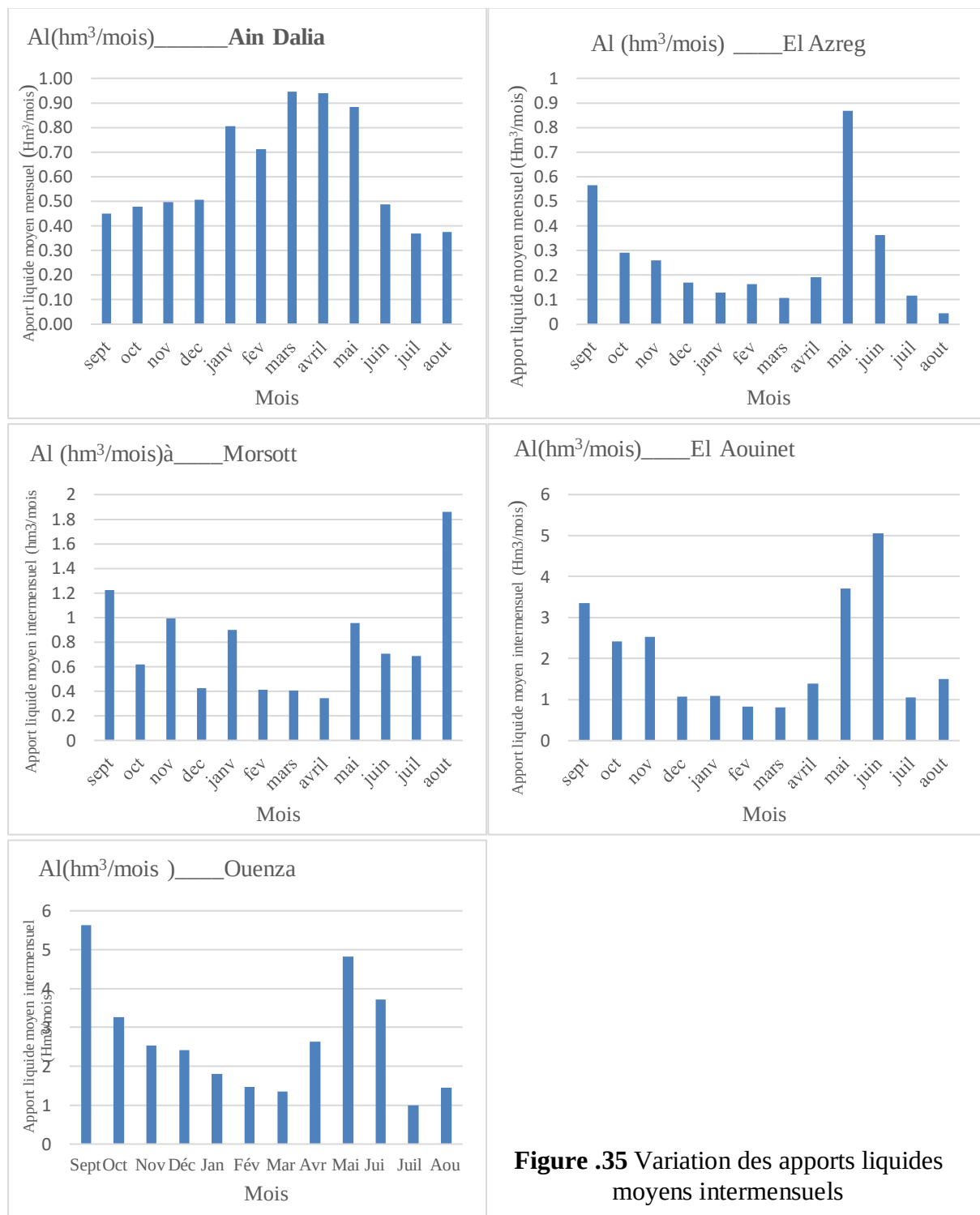


Figure .35 Variation des apports liquides moyens intermensuels

Les valeurs moyennes des fluctuations mensuelles (figure 35) ne s'observent pas toujours de la même façon d'une année sur l'autre. Dans le sous bassin de Morsott, pendant 29 ans, le maximum ($18,7\text{m}^3/\text{s}$) en mois d'août s'est trouvé 7 fois en Juin ,5 fois en janvier (20%), 6 fois en mai (15%). Ce maximum s'explique par les orages et les pluies violentes d'été et du début d'automne.

CHAPITRE III: Étude des apports hydrologiques

À Ouenza, où la période d'observation est de 36 ans, le maximum mensuel en septembre a été relevé 08 fois en mars (11,65%) et 5 fois en février, avril et juillet. Le maximum mensuel de (1973-2002) à El Aouinet s'est présenté 7 fois en février, et 10 fois en Mars et Juillet.

Pour El Azreg, où la période d'observation n'est que de 24 ans, le maximum mensuel a été relevé 12 fois en juillet (12%) et 9 fois en Janvier et avril. Le minimum mensuel est plus instable que le maximum mensuel : sur tous les oueds, le maximum moyen s'observe en février, mars (période des hautes eaux mensuelles) caractérisant ainsi le régime pluvial du domaine semi-aride.

III.9 Étude fréquentielle des débits maximums annuels

Comme nous l'avons précédemment établi sur des échantillons de pluie, l'analyse fréquentielle d'une série de débits permet d'estimer le temps de retour d'une valeur particulière. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant ou modélisant le comportement statistique d'un processus. Les modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée. Dans le cas qui nous intéresse, nous avons opté pour un modèle fréquentiel adéquat à notre série de débits. Il s'agit de la distribution statistique de **Galton**, et s'exprime par la fonction de répartition :

$$F_x = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) \int_0^U \left(\frac{1}{U} \right) e^{-\frac{\log^2 u}{2\sigma^2}} \quad \text{Avec : } U = \frac{x-x_0}{s}$$

Après avoir procédé à un tri croissant des valeurs de débits, nous avons attribué un rang (r) pour chaque valeur, ensuite nous avons calculé les fréquences empiriques d'après la formule suivante : $f = (r - 0,5) / n$

On déduit la probabilité de chaque fréquence, (Figure.36 et Tableau 33).

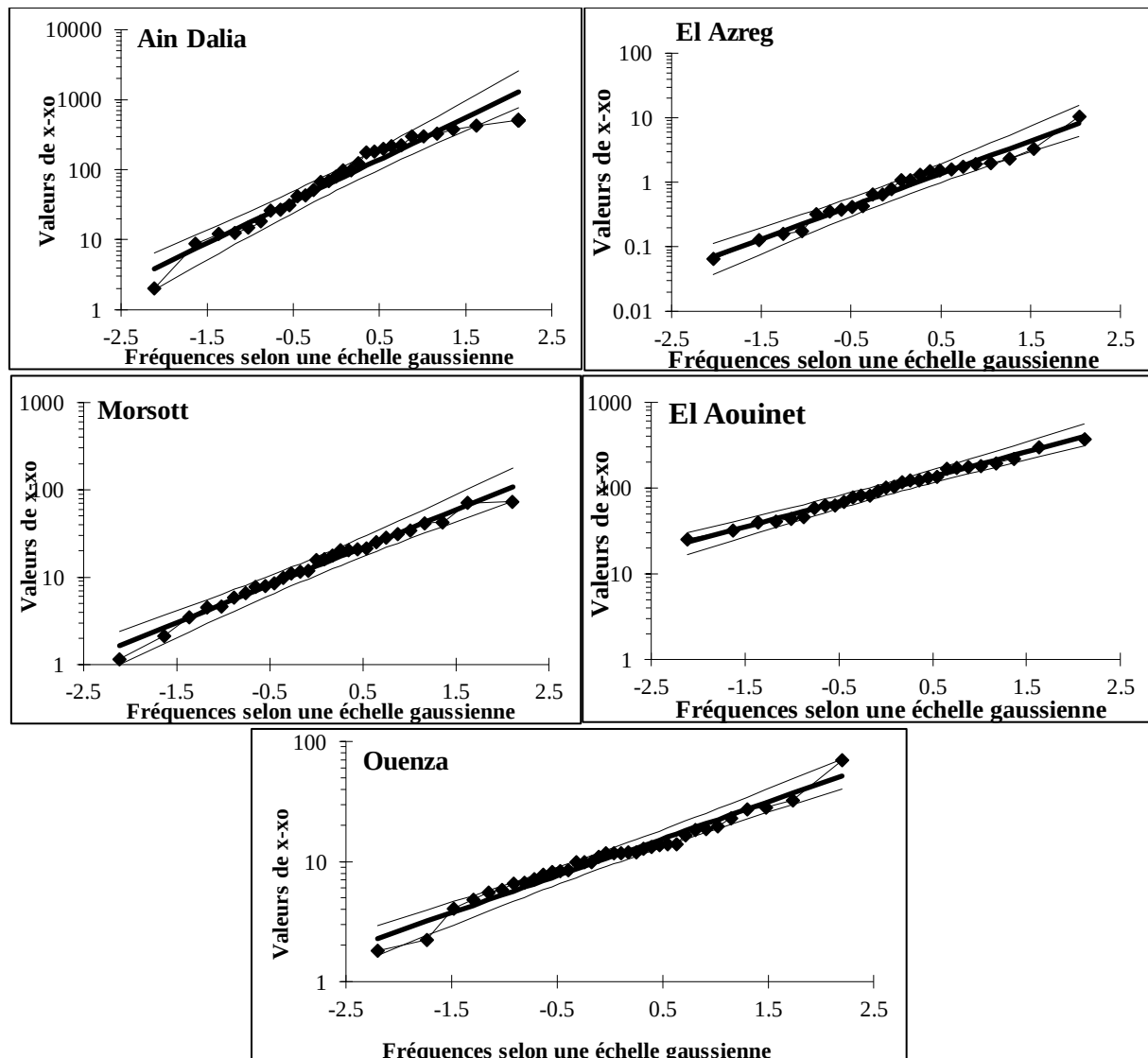


Figure .36 : Ajustement des débits max annuels à une loi de Galton

Tableau .33 Modules caractéristiques en (m^3/s) pour les périodes de récurrence.

Période de retour	2ans	5ans	20 ans	50 ans	100 ans
Station /Fréquences	0,5	0,8	0,95	0,98	0,99
Souk-Ahras	0,04	1,65	5,53	20,63	46,95
Ouenza	10,85	19,69	34,79	46,48	56,39
El Aouinet	7,67	14,77	27,61	37,97	46,95
Morsott	13,3	30,7	68	102	133,5
El Azreg	0,75	2,02	5,18	8,36	11,49

Conclusion

L'estimation des flux hydrologiques, à laquelle nous avons procédé dans ce chapitre est basée sur une série de mesures de 24 à 36 années d'observation (de la période allant de 1973/1974 à 2001/2002, 2008 /2009).

L'analyse des variations saisonnières des débits a permis de dégager spécialement à partir des coefficients mensuels des débits, les nuances de régimes hydrologiques à alimentation essentiellement pluviale liés aux régimes climatiques mais plus ou moins modifiés par le rôle de la lithologie. Ils ont fait apparaître la forte opposition entre l'abondance hivernale et l'indigence estivale des cours d'eau.

Par les valeurs caractéristiques (coefficient de modération), le régime des cours d'eau de la Medjerda-Mellegue connaît non seulement une grande irrégularité inter annuelle mais aussi une grande variabilité saisonnière (coefficient de modération).

CHAPITRE IV :

Estimation de TSS par les relations Ql

–Qs et étude du phénomène

d'hystérésis

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'estimer le transport solide en suspension sur le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue en utilisant les données disponibles (débits liquides, concentrations, et débits de crues) pour les cinq (5) stations hydrométriques (Ain Dalia, El Azreg, Morsott, El Aouinet, et Ouenza,), et l'évolution de la relation débit liquide concentration durant les crues et les phénomènes d'hystérésis.

Les apports solides dépendent aussi bien des caractéristiques physiques au niveau des versants que de la nature et du volume des apports liquides dans le réseau d'écoulement. Les mesures de concentrations sont confrontées à deux problèmes (Demmak, 1984 et Touat, 1989), à savoir la faible fréquence temporelle des mesures et la mesure sur un seul point au lieu de mesures faites sur la section mouillée. Cet état de fait constitue un handicap majeur dans l'évaluation et la prévision des flux hydro sédimentaires dans le bassin versant et l'envasement des barrages. L'étude a été réalisée par le biais de régressions (série complète), saisonnières par différents regroupements des données aux échelles annuelles, saisonnières et journalières. La période d'étude s'étend de (1973/1974) à 2001 /2002- 2008/2009) avec les données fournies par les services hydrologiques de l'ANRH.

La relation entre la concentration des sédiments en suspension (C) et le débit liquide (Q) d'un cours d'eau est une relation qui permet non seulement de déterminer le transport solide dans l'oued mais également d'étudier l'évolution des concentrations en suspension et des débits liquides pour un événement hydrologique tel que les crues. À cet effet, (Williams, 1989) a proposé une classification de ces relations basées sur le rapport C/Q durant les phases de montée de crue et de décu.

Plusieurs travaux sur le sujet ont été entrepris et publiés. (Wood, 1977), Olive et (Rieger, 1985) ont montré des modèles qui reflètent ces relations et ont introduit la notion d'hystérésis dans le bassin de la rivière Rother (Angleterre) et dans cinq sous-bassins de la rivière Wallagaraugh (Pays de Galles). En Algérie, nous disposons essentiellement des travaux de (Benkhalel et Remini, 2003) et (Bouanani, 2004) qui ont montré la variabilité temporelle de C et Q caractéristique respectivement du bassin semi-aride de l'Oued Wahrane (Chélif) et des sous-bassins de la Tafna. (Khanchoul, 2006), (Magnounif, 2013), (Hallouze, 2015).

IV.2 L'érosion et sa typologie

L'érosion est un processus physique et chimique par lequel le sol et les roches de la croûte terrestre sont continuellement soumis à une abrasion et à une corrosion. Selon le domaine scientifique, le mot “ **érosion** ” prend différent sens. Dans le domaine de l'hydrologie, l'érosion du sol correspond au “ détachement ”, et au “ transport ” des particules de sol, de leurs emplacements d'origine à un endroit de “ dépôt ” à l'aval. Les mécanismes d'érosion sont conditionnés par la gravité, l'eau et le vent. Ils se distinguent entre érosion éolienne et érosion hydrique.

IV.2. 1 formes de l'érosion hydrique

IV.2. 1.1 L'érosion en nappe

L'érosion en nappe appelée aussi **érosion diffuse** ("sheet érosion" pour les anglosaxons) résulte principalement de l'énergie des gouttes de pluies qui s'abattent sur la surface du sol. Par l'effet du '**Splash**', la pluie éboule les agrégats du sol et détache les fines particules qui se dispersent sur de courtes distances.

Ces fines particules mobilisées sont ensuite transportées par le ruissellement en nappe (Fig. I.3) (Le Bissonnais, Y., et Le Souder, C. (1995). Ce type d'érosion dépend de deux processus : le détachement des particules du sol causé par l'impact de gouttes de pluie et le ruissellement superficiel (si l'intensité dépasse la vitesse d'infiltration). Dans les sols cultivés, l'érosion en nappe peut être considérable et se traduit surtout par une « dilution » de la matière organique, du fait du labour qui remonte en surface une nouvelle tranche de limon (Le Bissonnais et al 2000). Elle s'amplifie avec l'intensité des pluies, la raideur des pentes, le manque de couvert végétal et la vulnérabilité des sols (Bahri et al., 1995). Ceci fait que l'érosion en nappe est plus intense en automne. En Algérie, l'érosion en nappe produit entre 0,10 à 20 t/ha/an de sédiment (Roose, 1993; Chibbani et al. 1999).

IV.2. 1.2 L'érosion concentrée (linéaire)

Elle apparaît à l'intersection de deux plans de versant, et s'étend jusqu'au fond des vallées à travers le réseau hydrographique. Lorsque les eaux de ruissellement se concentrent, elles peuvent selon la nature du sol et l'intensité du relief creuser la terre en formant des griffes, des rigoles ou des ravines. On parle de griffes, lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles, lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur et de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) (Roose, 1994).

IV.2. 1.3 L'érosion en griffes et rigoles

L'érosion en rigoles commence lorsque l'écoulement de surface se concentre dans les points bas de la terre, l'énergie issue du débit concentré est capable de détacher les particules du sol, ce qui permet avec le temps de former des griffes et des rigoles.

IV.2. 1.4 L'érosion en ravines

Elle est causée par les débits générés des ruissellements concentrés sur un versant (Figure 37). Elles constituent des réseaux pour rejoindre le réseau hydrographique. Le ravinement est favorisé lorsque les sols sont sur les terrains imperméables soumis à des averses courtes et intenses. En Algérie, l'érosion en ravines déplace en moyenne entre 90 à 300 t/ha/an ce qui correspond à une vitesse d'altération des versants de 8 à 17 mm/an (Chebbani et al, 1999).



Figure. 37 : L'érosion en ravines

(Source : http://www.alismiri.com/uploads/cours_ces1.pdf).

IV.3 Facteurs de l'érosion hydrique

IV.3.1 Le climat

Le climat est considéré comme le facteur moteur qui influence l'érosion. L'efficacité de la désagrégation des sols est principalement liée à l'intensité de la pluie et du vent ainsi que la hauteur de précipitation.

IV.3.2 Les précipitations

L'agressivité des précipitations est considérée comme l'agent causal de l'érosion hydrique (Fournier 1969). Cette agressivité est appréciée par l'indice de l'émotivité R , utilisé dans les différentes versions de l'équation universelle de la perte des sols USLE, MUSLE, RUSLE, RUSLE2 (Modèles empiriques établis pour évaluer la perte en sol). L'indice R , quantifie l'énergie de l'impact des gouttes de pluie sur le sol (Wischmeier et Smith 1958). L'émotivité d'un événement de pluie se calcule par le produit de l'énergie de la pluie (E) et de l'intensité maximale de la pluie pour une période de 30 minutes (Wischmeier et Smith 1958 ; Wischmeier et Smith 1978 ; Renard et al 1997).

a) L'impact des gouttes de pluie « l'effet *Splash* »

Ce type de mécanismes est dû au choc de la goutte de pluie sur le sol. Chaque goutte possède une énergie cinétique fonction de son poids et de sa vitesse de chute (Leguedois, 2003 ; Kinnell, 2005). L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface (Figure 38). Les grains de sables, les fragments d'agrégats et les argiles dispersés sont projetés autour du lieu de l'impact. L'intensité de ce processus et la distance de projection dépendent de l'énergie cinétique des pluies, de la texture du matériau et de la pente (Le Bissonnais et al, 1996).

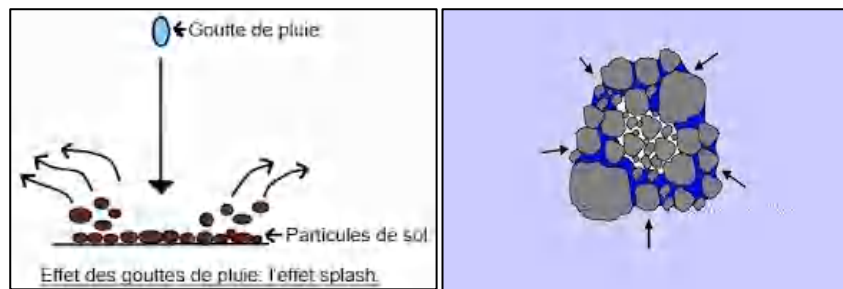


Figure 38 : L'effet « *Splash* » sur le sol sous l'impact d'une goutte de pluie
(Source : <http://www.alismiri.com/uploads/courses1>)

L'énergie cinétique d'une goutte de pluie lors de son contact au sol est fonction de la masse et de la vitesse de chute de la goutte. Elle est donnée par l'équation :

$$Ec = \frac{1}{2}mV^2$$

m : la masse de la goutte

V : la vitesse de la goutte

Ec : l'énergie cinétique en joule (si m en Kg, V en m/s)

Le diamètre des gouttes de pluie, leur vitesse de chute et leur masse totale déterminent la capacité de détachement des particules du sol.

b) L'éclatement

Il s'agit de la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de ce mécanisme dépend entre autres, du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité. Les sols argileux sont moins affectés par l'éclatement que les sols limoneux ou sableux (Le Bissonnais, 1990). L'humidification des sols avant une averse diminue considérablement le taux de détachement de particules (Roose, 1986). L'éclatement est qualifié comme un bon indicateur permettant de décrire la susceptibilité des sols à l'érosion (Barthes & Roose, 2001).

c) La désagrégation par gonflement différentiel

Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols. Ce mécanisme contribue à la réduction de la taille des agrégats à la surface du sol. La fissuration par gonflement augmente lorsque la teneur en argile augmente, du fait de l'augmentation du gonflement potentiel. Les conséquences directes de ce mécanisme sont moins importantes que les autres mécanismes (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

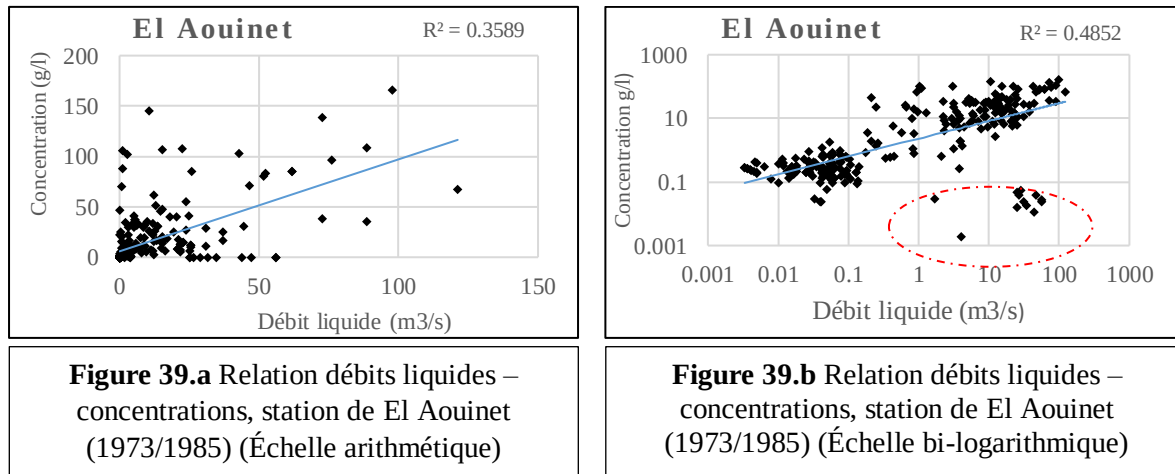
IV.3.3 Les mécanismes du transport des sédiments

IV.3.3.1 Le ruissellement

Suite à la phase de détachement des particules du sol les sédiments arrachés peuvent être mise en mouvement. L'eau qui ruisselle va les emporter et suivre le sens de la pente. Selon Fournier (1969), les agrégats du sol sont en général de dimensions trop grandes pour être facilement entraînés par le ruissellement. Ce déplacement des particules de sol est favorisé par plusieurs autres facteurs moins importants, tels que la gravité, le labour et le vent. Le transport concerne particulièrement les fines : comme l'argile et le limon, les matières organiques de faible masse volumique telles que les résidus de culture et les déjections animales ou encore les fertilisants épandus sur les parcelles cultivées. Cependant, les dépôts sont proches sous forme de colluvionnement. La vitesse du ruissellement sera d'autant plus rapide que la pente est longue, fortement inclinée et dépourvue de végétation. Plus la vitesse de l'eau est rapide et plus son énergie est importante, ce qui lui permet de transporter des particules plus grosses et plus loin.

IV.3.3. 2 Les mécanismes de dépôt des sédiments

L'eau ruisselée à la surface du sol est généralement chargée de sédiments mobilisés par les différents mécanismes d'érosion et de transport. Quand la pente devient moins inclinée ou que l'eau ruisselée rencontre un obstacle, son énergie diminue. À partir de ce moment, les particules transportées vont se déposer ou, en d'autres termes, sédimenter. La sédimentation constitue le dépôt en aval de particules ou sédiments arrachés au sol ou à d'autres éléments (roche) en amont. Ces éléments peuvent se déposer sur le sol ou au fond des cours d'eau. Quand on observe les sédiments, on remarque un classement des particules selon leur taille. En effet, les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. On parle de tri granulométrique (Kauark, 1990).



On constate une très forte dispersion des points lorsqu'on exprime les concentrations instantanées en fonction des débits. Ceci s'explique par le fait que les concentrations sont contrôlées par plusieurs facteurs (Asselman, 2003). La fourniture des sédiments est très variable à cause de leur disponibilité. Celle-ci dépend des effets saisonniers, des conditions d'état du bassin-versant (état antécédent). Les différences de disponibilité sont très importantes entre les saisons et pour les événements hydrologiques extrêmes (les crues) entre le début, la montée et la décrue.

On donnera comme exemple la relation débits liquides –concentration pour la station de El Aouinet. Exprimée en coordonnées arithmétiques, la relation débits liquides –concentrations est très lâche ($R^2=0.358$) ($R=0.595$) (fig.39 a). En coordonnées logarithmiques (fig.39 b), la dispersion des points diminue et le coefficient de corrélation s'améliore ($R^2=0.485$) ($R=0.695$). La relation puissance s'exprime par : $C = 2,27 * Q_L^{0.559}$

IV.4.4 Établissement des relations débits liquides –débits solides à l'échelle annuelle et saisonnière « régression sur la série complète, saisonnière »

Les courbes d'étalonnages annuels et saisonniers sont utilisées comme outil pour combler les données sur les concentrations, les débits et les apports solides des sous bassins versants, Ain Dalia, El Azreg, Morsott, El Aouinet, et Ouenza. À l'échelle du bassin versant de la Medjerda-Mellegue. Les relations puissance ont été privilégiées (Demmak, 1982) ; Benkhaled et al, 2003), (Achitte et Meddi, 2005) ; elles sont du type : $Q_s = b * Q_L^a$ avec :

Q_s : débits solides (kg/s) ; Q_L : débits liquides (m^3/s).

Exprimée en logarithmes décimaux la relation devient : $\text{Log } Q_s = a * \text{Log } Q_L + \text{Log } b$,

Avec : a : la pente, et b : l'ordonnée à l'origine.

La relation est de ce fait linéarisée. Sur une échelle bi-logarithmique, la dispersion des points est peu importante. On établit des relations entre les débits liquides et les débits solides calculés à partir des concentrations mesurées.

Dans une seconde étape, on calcule les débits solides (kg/s) à l'échelle journalière. Les valeurs mensuelles et annuelles sont obtenues en intégrant par le temps les résultats obtenus à l'échelle journalière, elles peuvent servir par ailleurs à l'extension de courtes séries de débits solides grâce aux séries de débits liquides en général plus longues. Différentes échelles de temps

sont proposées dans les études. En Algérie, les courbes d'étalonnage saisonnières sont très utilisées, elles permettent de disposer d'échantillons suffisamment étoffés. Néanmoins, les échelles annuelles et mensuelles sont aussi exploitées dans les études. Les courbes d'étalonnage crue par crue ont fait l'objet de plusieurs travaux (Benkhaled et Remini 2003), (Achitte et Ouillon 2007).

Plusieurs auteurs ont étudié la relation puissance et ont prouvé sa supériorité par rapport aux autres types de relations. La relation puissance est du type $Y = b \cdot X^a$ ou $Qs = b \cdot QL^a$ avec a et b paramètres de la régression à calculer par la méthode des moindres carrés. Le paramètre a représenté la pente, et b représente l'ordonnée à l'origine ; pour les anglo-saxons, le paramètre b représente la pente, et a est l'ordonnée à l'origine. Certains auteurs ont proposé une signification physique à ces deux paramètres. Ainsi, selon Benkhaled et (Remini 2003), le paramètre b (ordonnée à l'origine) représente un indice d'érodibilité. Selon Asselmann, (2000), la pente a représenté la puissance érosive du cours d'eau.

Quoique la valeur du coefficient de corrélation est importante ($R = 0.91$). Leopold et al. (1953) ont montré que l'exposant(b) variait entre 2 et 3 alors que Linsly et al. (1992) fait remarquer que le facteur(a) demeure très petit pour des débits liquides. Par ailleurs, Bogardi (1974) suggère que le facteur (b) dépend des caractéristiques du bassin, alors que Vanoni (1977) considère que le paramètre(a) reflète la sensibilité du bassin à l'érosion. En tenant compte des données de deux cents cinquante (250) bassins à travers le monde (Fleming, 1969) constate, en analysant la relation $Qs = b \cdot QL^a$, que l'exposant (b) varie de 0.72 à 1.02. Le paramètre (a) dépend de la taille des bassins versants et de la couverture végétale.

En analysant la relation en puissance ($Qs-QL$), (Fournier, 1960) constate que, pour chaque canal, la valeur du paramètre (a) reste constante, celle de l'exposant (b) varie entre un (1) à deux (2) pour n'importe quel cours d'eau. (Battala et Sala, 1992) à travers l'exploration d'une série de (241) mesures de concentrations de sédiments en suspension sur la rivière Arbucies dans le Nord-est de la péninsule Ibérique, ont trouvé que l'exposant (b) est égal à 1.63, tandis que le paramètre (a) à de petites valeurs. (Terfous et al. 1999) ont montré que les paramètres (a) et (b) varient suivant les saisons. Benkhaled et (Remini2003) ont constaté une relation entre les variations saisonnières des coefficients (a) et (b) et le changement de l'état hydrique du sol.

Toutefois ils indiquent dans une étude sur le sous bassin de l'oued Wahrane qui fait partie du grand bassin du Chélif, que le paramètre (a) exprime d'une manière générale l'état du sol d'un bassin et son degré de saturation. Les auteurs ont constaté qu'il y a une très forte relation entre (a) et l'hydraulicité notamment pour les années sèches.

En particulier, la relation entre le paramètre (a) et les pluies moyennes mensuelles est très bonne. Les faibles valeurs de (a) signifient un état de saturation du sol. Les fortes valeurs de (b) caractérisent l'écoulement durant la saison d'automne.

IV.4.4.1 Les régressions sur la série complète

Un nombre suffisant et représentatif de prélèvements a été effectué permettant une bonne reconstitution du turbidigramme. Les couples de valeurs sélectionnées sont reportés sur une échelle log-log. Généralement les tracés graphiques montrent une dispersion considérable, même en coordonnées logarithmiques.

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $Ql - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

Comme pour la plupart des cours d'eau, on trouve pour notre cas une bonne relation en puissance liant le débit solide en suspension en kg/s au débit liquide en m³/s. Une première analyse, graphique montre qu'à de faibles débits liquides généralement estivaux (moins de 0,5 m³/s) peuvent être associés de forts débits solides (près de 10 kg/s) déclenchés sûrement à la suite d'orages violents. De même, de fortes valeurs des débits liquides n'ont engendré qu'un faible transport solide dû à la vidange des nappes survenue à la suite d'une crue importante.

Le coefficient de corrélation pour le modèle annuel est largement significatif : il est de 0,91 à Ouenza et El Aouinet, 0,90 à Morsott, 0,87 à Ain dalia et El Azreg. (Tabl.34)

Les valeurs des paramètres a et b de la relation $Qs = b Ql^a$, (tableau 34) varient peu d'un bassin à l'autre. Pour le paramètre a , il varie de 1,3 pour Morsott à 1,7 pour Ain Erkel. L'exposant b est compris entre 1,5 et 3,5, ces valeurs sont proches de ceux trouvés par bon nombre de chercheurs ayant travaillé dans des régions semi-arides.

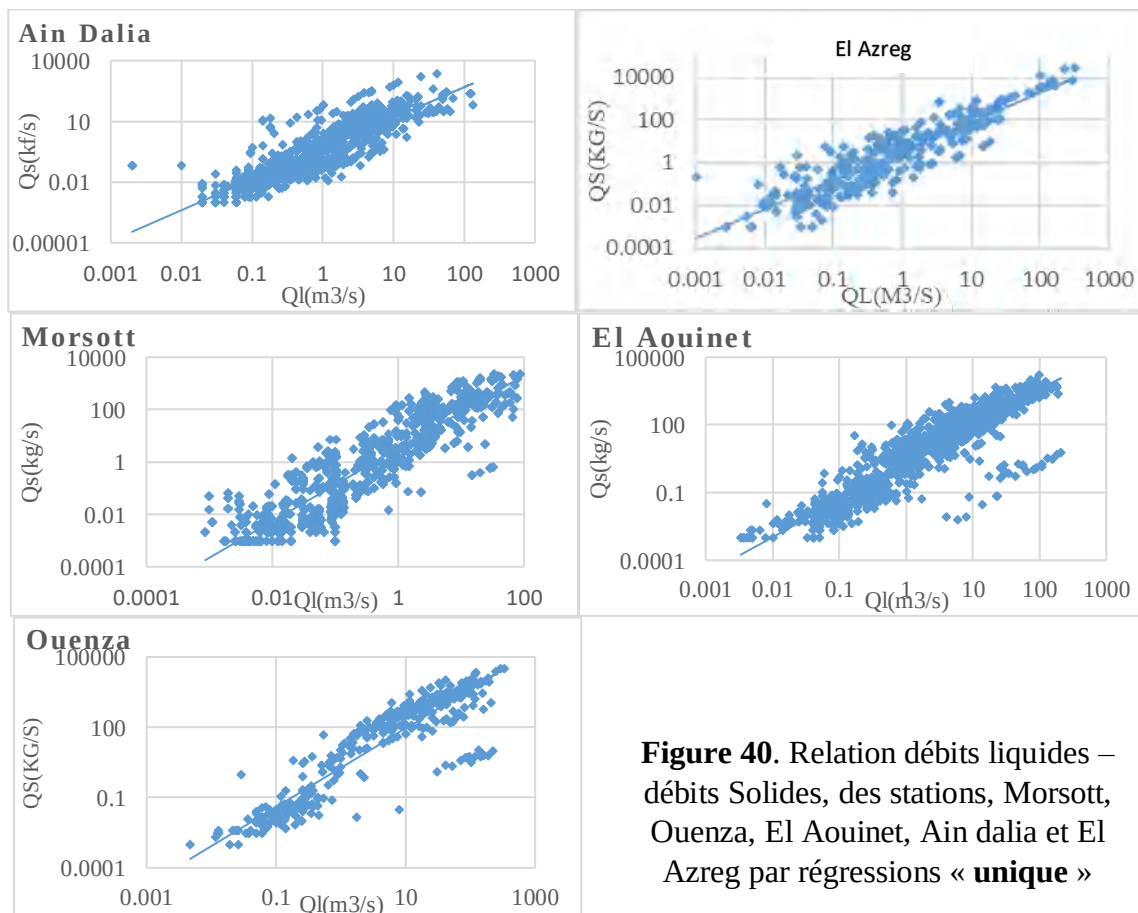


Figure 40. Relation débits liquides – débits Solides, des stations, Morsott, Ouenza, El Aouinet, Ain dalia et El Azreg par régressions « unique »

Tableau 34. Paramètres des courbes de régression par la régression « unique »

Station	n	a	b	R	R ²	Modèles
Souk-Ahras	941	1,520	0,443	0,7693	0,877	$Qs = 0,443 Ql^{1,520}$
El Azreg	310	1,3662	3,4576	0,897	0,8052	$Qs = 3,4576 Ql^{1,366}$
Morsott	700	1,392	3,3348	0,90	0,8141	$Qs = 3,3348 Ql^{1,392}$
El Aouinet	1332	1,6326	1,9283	0,917	0,8423	$Qs = 1,928 Ql^{1,6326}$
Ouenza	2328	1,6734	1,9002	0,915	0,839	$Qs = 1,900 Ql^{1,6734}$

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $Ql - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

Toutefois il est à remarquer que le coefficient de détermination (R^2) qualifié d'estimateur de la relation en puissance liant les deux variables débit solide et débit liquide, dépasse la valeur de 0.80 pour presque toutes les années hydrologiques, ce qui signifie que les modèles annuels en puissance sont représentatifs et assez significatifs pour la relation du débit solide (Qs) en fonction débit liquide (QL).

IV.4.4.2 Régression « saisonnière »

Pour étudier les réponses des bassins aux débits liquides et matières en suspension au cours de l'année hydrologique, les regroupements ont été effectués suivant quatre saisons : automne (22Septembre –21Décembre), hiver (22Décembre –21Mars), printemps (22Mars –21juin) et été (22Juin –21Septembre). Ainsi, les valeurs maximales de la turbidité sur les stations installées au niveau du bassin s'observent au début de l'automne et à la fin du printemps. La représentation graphique de la relation ($Qs-QL$) à différentes échelles mensuelles, saisonnières et interannuelle, illustrent bien des relations de type en puissance donnée par l'équation : $Qs = b * QL^a$.

IV.4.4.2.1 Bassin de l'oued Chabro à Morsott

Les courbes d'étalonnage et les régressions $Ql-Qs$ du bassin-versant de l'oued Chébro à Morsott sont établies pour quatre saisons (tabl.35, fig.41).

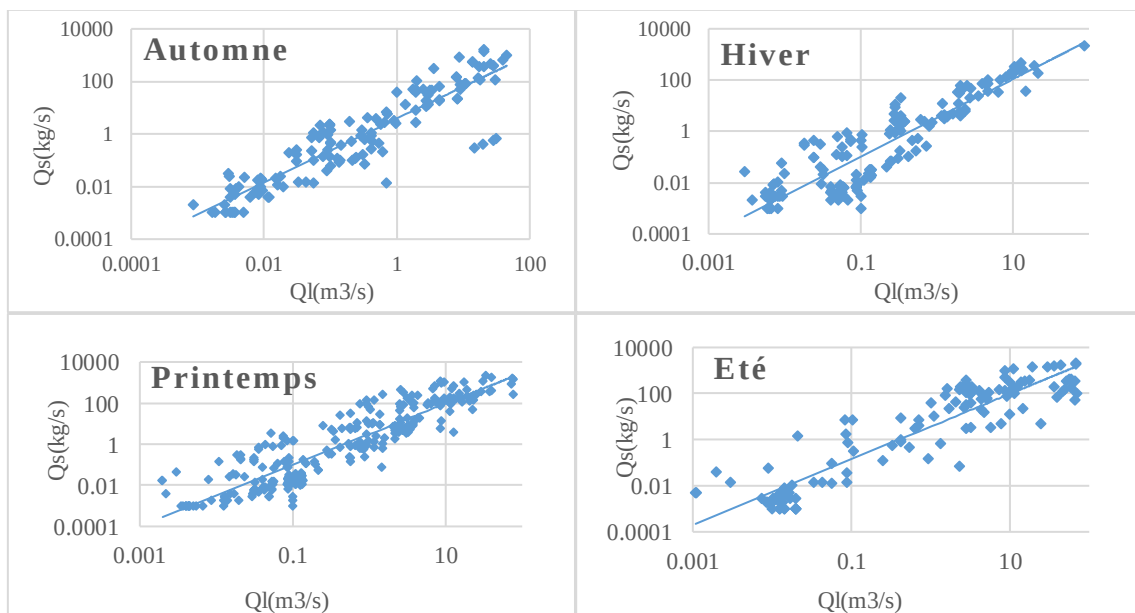


Figure 41 Relation ($Ql - Qs$), station de l'oued Chébro à Morsott « *régressions saisonnière* »

Tableau 35 Paramètres des courbes de régression du bassin versant d'oued Chabro à Morsott.

Saison	(n) nombre de couples	A (Pente)	B (Ordonné à l'origine)	R^2	R
Automne	140	1,2445	3,8711	0,8246	0,908
Hiver	152	1,5175	3,3138	0,8019	0,895
Printemps	282	1,4912	3,957	0,8134	0,901
Été	125	1,4215	3,6494	0,857	0,920

IV.4.4.2 Bassin de l'Oued Mellegue aval à la station de l'Ouenza

Les courbes d'étalonnage et les régressions $Ql-Qs$ du bassin-versant de l'Oued Mellegue aval à l'Ouenza sont établies pour quatre saisons (fig.42 et tabl.36)

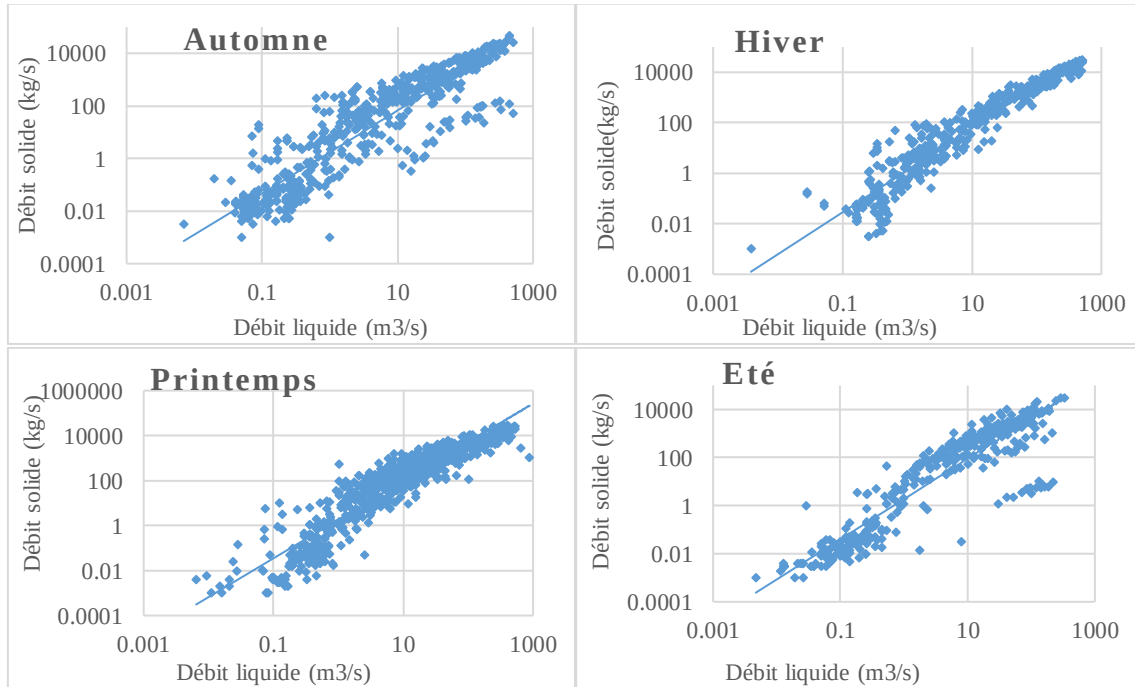


Figure 42 Relation ($Ql - Qs$), station d'Ouenza « Régressions saisonnier »

Tableau 36 Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin versant à la station d'Ouenza

Saison	n (nombre de couples)	a (Pente)	b (Ordonné à l'origine)	R	R ²
Automne	603	1,5692	1,7534	0,90	0,823
Hiver	388	1,6648	1,3236	0,94	0,9013
Printemps	822	1,7213	1,8294	0,93	0,8752
Été	398	1,6734	1,900	0,91	0,839

IV.4.4.2.3 Bassin de l'Oued Mellegue amont à la station de El Aouinet

Les courbes d'étalonnage et les régressions ($Ql-Qs$) du bassin-versant de l'Oued Mellegue amont à El Aouinet sont établies pour quatre saisons (fig.43 et tabl.37).

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $Ql - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

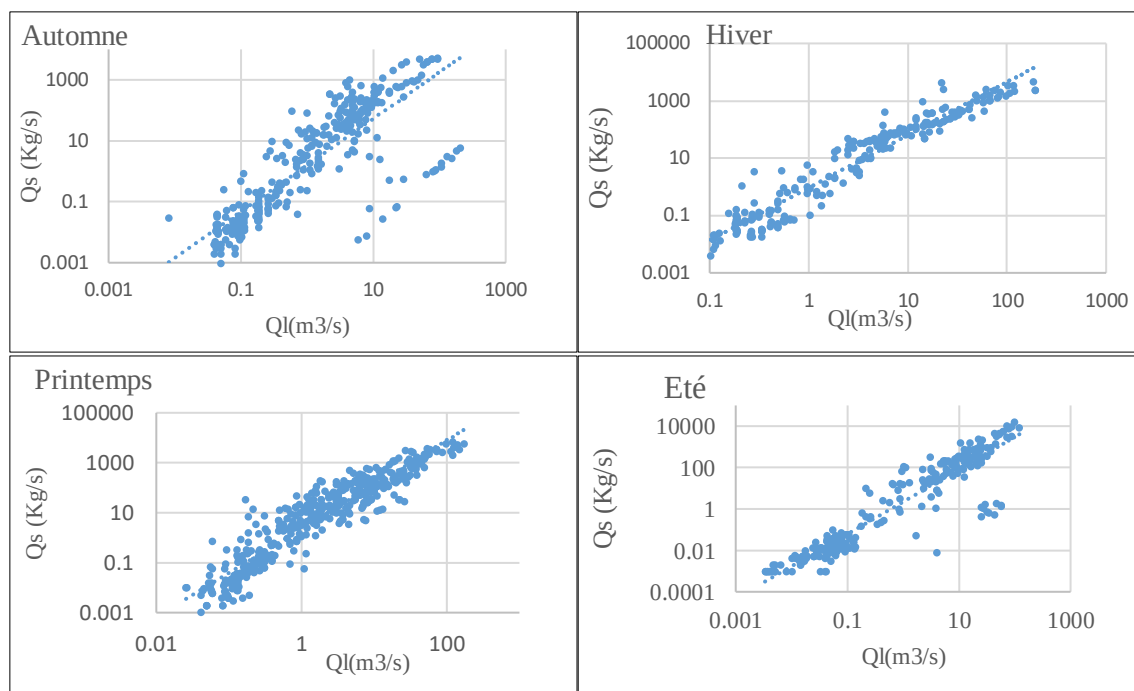


Figure 43. Relation $Ql - Qs$, station de El Aouinet « Régressions saisonniers »

Tableau 37 : Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant l'oued Mellegue amont à El Aouinet.

Saison	n	a (Pente)	b (Ordonné à l'origine)	R	R ²
Automne	341	1,5242	1,5954	0,83	0,7015
Hiver	233	1,8391	0,9447	0,96	0,9327
Printemps	468	1,7678	2,3062	0,94	0,8837
Été	289	1,5599	2,2705	0,93	0,8797

IV.4.4.2.4 Bassin de l'Oued Mellegue aval à la station d'Ain Dalia

Les courbes d'étalonnage et les régressions $Ql - Qs$ du bassin-versant de l'Oued Medjerda à Ain dalia sont établies pour quatre saisons (fig.44 et tabl.38).

Tableau 38 Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin – versant l'oued Medjerda à Ain Dalia

Saison	n	a (Pente)	b (Ordonné à l'origine)	R	R ²
Automne	160	1,623	1,026	0,84	0,716
Hiver	136	1,571	0,351	0,86	0,774
Printemps	139	1,776	0,267	0,84	0,716
Été	167	1,736	0,516	0,84	0,714

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $Ql - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

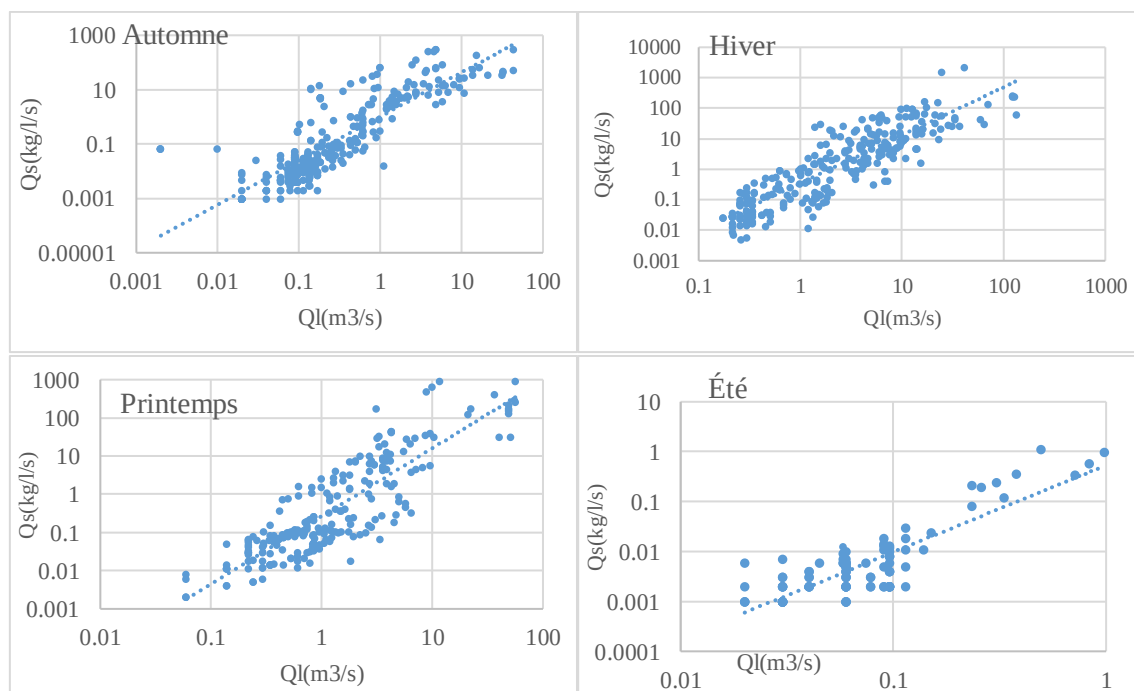


Figure 44 Relation débits liquides –débits solides, station de l’oued Medjerda à Ain dalia
« Régressions saisonnier »

IV.4.4.2.5 Bassin de l’Oued Mellegue aval à la station d’El Azreg

Les courbes d’étalonnage et les régressions $Ql - Qs$ du bassin-versant de l’Oued K’sob El Azreg sont établies pour quatre saisons (fig.45 et tabl.39)

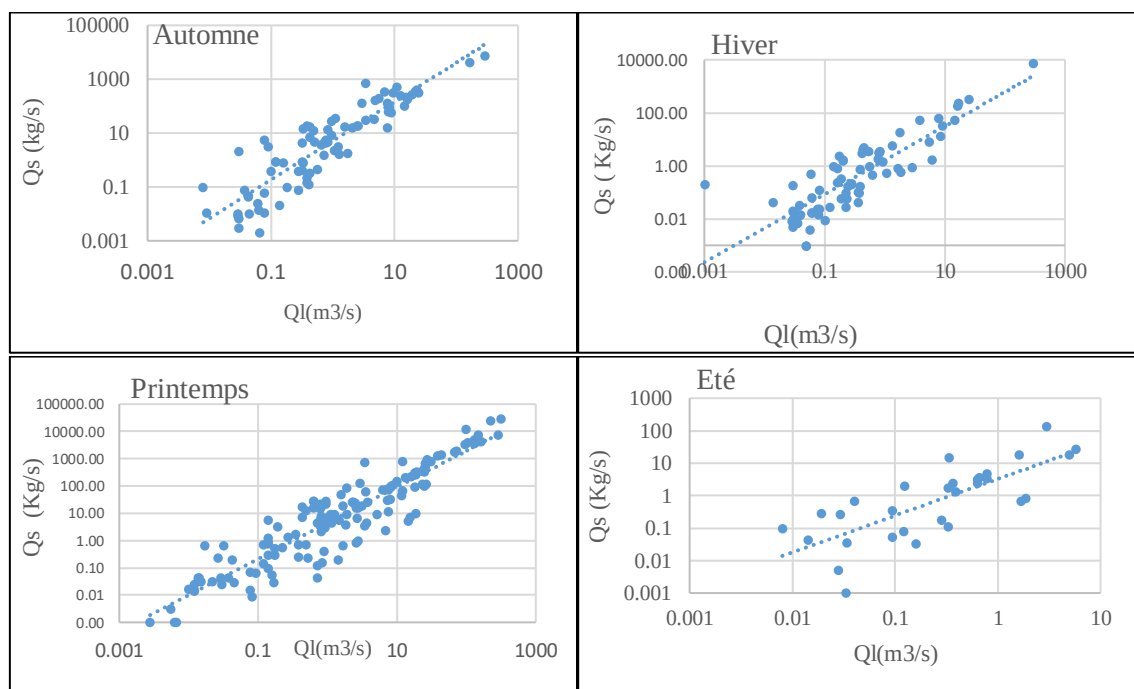


Figure 45 : Relation ($Ql - Qs$), station de l’oued K’sob à El Azreg « Régressions saisonnières »

Tableau 39 Paramètres des courbes de régression (courbes d'étalonnage) du bassin versant l'oued K'soub à l'Azreg

Saison	n	a (Pente)	b (Ordonné à l'origine)	R	R ²
Automne	81	1,960	4,231	0,89	0,798
Hiver	73	1,285	1,572	0,85	0,728
Printemps	142	1,036	3,436	0,92	0,849
Été	30	1,056	0,758	0,75	0,577

IV.4.5 Discussion

Les paramètres (la concentration des sédiments en suspension et les débits liquides instantanés) mesurés par les stations hydrométriques (Ouenza, El Aouinet, Ain dalia, Morsott, et El Azreg) sur la période commune de Septembre 1971 à Août 2008 sont étudiés pour quantifier le transport solide en suspension au déférent pas de temps (Annuel, saisonnier et journalier) en se basant sur l'évolution de Q_s et Q_I .

L'approche utilisée sur les bassins versant des oued Medjerda, Mellegue est du type déterministe et utilise des modèles régressifs simples dont l'objectif est de trouver une ou plusieurs relations entre la concentration en matières en suspension et le débit liquide. Une relation empirique appelée courbe du transport solide (Crawford, 1991), qui lie le débit solide au débit liquide écriture française : $Q_s = bQ_I^a$.

D'après les régressions à l'échelle à l'échelle saisonnière, l'effet saisonnier est très net. Les paramètres a et b subissent une diminution par rapport aux autres saisons. Le paramètre (a) est le plus élevé en automne, ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive en cette saison. En effet à la saison sèche (été) où le sol se fissure et perd sa cohésion, succède l'automne avec des averses plus ou moins violentes sur un sol fragilisé. Il se produit alors pour de faibles écoulements des apports solides importants (Bouanani, 2004). L'exposant (b) s'élève en hiver par rapport aux autres saisons, cela est dû certainement aux écoulements générés par l'accroissement considérable des précipitations pour cette saison.

La saison d'hiver connaît une grande contribution de la pluviométrie (38% du total annuel), voit apparaître une activité hydro hydro-sédimentaire où le volume des apports solides représente le quart du total annuel.

Au printemps le facteur(a) et l'exposant(b) présentent des valeurs moyennes entre celles de l'hiver et celles de l'été et sont proches du modèle global. Ceci exprime bien le fait que le modèle du printemps est plutôt un modèle représentatif moyen. Durant cette période de l'année, les écoulements sont générés par des séquences pluvieuses relativement abondantes mais de faibles intensités. Ces pluies couvrent l'ensemble du bassin versant. Elles trouvent un sol meuble avec une couverture végétale qui confère une rugosité au sol et favorise la rétention de l'eau. De ce fait, les écoulements en réponse aux précipitations sont différés dans le temps et la contribution des eaux souterraines dans l'apport fluvial est importante (Magnounif, 2007).

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $Q_L - Q_s$ et étude du phénomène d'hystérésis

À la fin du printemps, le sol est humide avec une couverture végétale abondante. Toutefois, on observe des charges solides similaires à celles enregistrées en automne, des mouvements de masse sont constatés par moment (Roose et al. 1998 ; 1999). De plus, à cette période, les crues, bien que modérées, peuvent provoquer des affouillements aux pieds des berges et par voie de conséquence fournissent une charge solide supplémentaire à l'écoulement facilement transportée le long des différentes artères du réseau de drainage. Cet état de fait explique l'augmentation de la quantité des flux sédimentaires pendant cette saison.

En été les valeurs de (a) et (b) chutent considérablement pour être inférieures à 1, cela s'explique par les faibles écoulements et donc de faibles transports solides. Les sous bassins étudiés connues des crues estivales assez importantes, les crues survenues subitement sont très rares et leur débit de pointe assez important mais a eu d'impact sur la dynamique érosive du bassin versant.

La production des sédiments est étroitement liée à un ensemble de processus qui opèrent sur l'ensemble du bassin versant (Bouanani, 2004) ; (Magnounif, 2007). Cependant, le caractère intermittent des processus qui règlent l'intensité des mécanismes d'érosion, de transport et de dépôts de sédiments, dans les zones à climat semi-aride fait que le débit solide dans le cours d'eau est très variable (Magnounif, 2007).

Les valeurs des coefficients de détermination, mis à part celui de l'été, sont assez significatives pour les trois autres saisons, le débit liquide à cette échelle de regroupement explique plus de 80 % de la variance du débit solide. Par ailleurs selon l'erreur estimée par ces modèles saisonniers, les valeurs calculées de la variable à expliquer qu'est le débit solide, subissent une sous-estimation en automne et au printemps, et une surestimation en hiver et en été. Les coefficients de détermination varient entre 0.75 et 0.96, cela témoigne encore de la représentativité du modèle en puissance à cette échelle de régression entre les deux variables débit liquide et débit solide.

Les relations liant les débits liquides aux débits solides en suspension pour les bassins des oued Medjerda, Mellegue est de type puissance de forme générale : $(Q_s = b Q_L^a)$.

Les transports solides en suspension dans le bassin-versant de l'oued Mellegue amont sont très variables dans le temps, et causés principalement par les caractéristiques morphologiques et hydrologiques. Ils surviennent essentiellement durant deux saisons : au printemps (67,5 tonnes/km²/an), en automne (56 tonnes/km²/an), et de plus faible ampleur en hiver (9,4 tonnes/km²/an). Ces quantités des sédiments varient de 24064,81 tonnes pour l'année 1993-1994, soit une dégradation spécifique de 6,8 tonnes/km²/an à 3894478,27 tonnes pour l'année 1995-1996, donnant un transport solide spécifique de 1104 tonnes /km²/an, soit un rapport de 1 pour 161. L'apport moyen interannuel en sédiments enregistré à la station de El Aouinet du bassin-versant de l'oued Mellegue est évalué à 570512,69 tonnes, ce qui correspond à une Dégradation spécifique de 161,8 tonnes /km², cette valeur est très modeste relativement aux estimations faites par plusieurs chercheurs pour d'autres bassins du Tell algérien.

IV.5 Estimation de transport solide spécifique TSS

IV.5.1 Méthodologie

L'utilisation de la courbe de transport solide débit solide (Qs) – débit liquide (Q) est une méthode utilisée depuis 1940 par les différents auteurs. L'application de cette méthode dans notre cas est élaborée à l'échelle des débits moyens journaliers et des débits moyens mensuels (série 1973/74-2008/2009). Néanmoins, l'utilisation de cette méthode a été critiquée car le débit liquide est inclus, d'une part, dans la variable dépendante et, d'autre part, dans la variable indépendante de la relation $Qs = f(QI)$. Ainsi, il donne un coefficient de corrélation élevé (Mc Bean et Al-Nasri, 1988). Cette interprétation a été contredite par un nombre d'auteurs (Nordin, 1990 ; Gilroy et al, 1990 ; Jansson, 1997).

IV.5.2 Estimation des T.S.S par la régression « unique » à l'échelle annuelle

Les variations interannuelles des apports solides estimés par les deux modèles de régression saisonnière et unique montrent une grande irrégularité pour les différents bassins, liée à l'irrégularité des précipitations et donc des apports liquides.

$$Qs = QL * C$$

Avec :

Qs : débit solide (kg/s),

QL : débit liquide (m³/s), C : concentration (g/l)

Tableau 40 Répartition des T.S.S annuels pour les stations étudiées, régression unique

Stations	Morsott	L'Ouenza	El Aouinet	Ain Dalia	El Azreg
Moyenne inter annuelle(ton/km ² /an)	34,70	184,84	177,36	181,84	68,90
Année maximale ton/km ² /an	482 2001-2002	1582,17 1995-1996	1772 1995- 1996	914, 5 1973-1974	715 1999-2000
Année minimale ton/km ² /an	0,57 1993-1994	0,0009 1982-1983	9,25 2001- 2002	27,52 1975-1976	1,6 1992-1993

IV.5.3 Estimation des T.S.S par la régression « saisonnière » à l'échelle annuelle

Tableau 41 Répartition des T.S.S annuels pour les stations étudiées, régression saisonnière

Stations	Morsott	Ouenza	El Aouinet	Ain Dalia	El Azreg
Moyenne inter annuelle	39,50 (ton/km ² /an)	156,033 (ton/km ² /an)	161,8 (ton/km ² /an)	181,342 (ton/km ² /an)	68,70 (ton/km ² /an)
Année maximale	573 2001-2002	1008,33 1995-1996	5850,4 1995-1996	1062,63 1973-1974	615,9 1999-2000
Année minimale	0,61 1993-1994	0,00089 1982-1983	11,54 2001-2002	19 1975-1976	1,6 1992-1993

IV.5.4 Discussion

IV.5.4.1 Bassin de Chébro à Morsott

On notera à partir des figures 1 et 2 la très forte variabilité interannuelle des T.S.S. pour le bassin de l'oued Chébro à Morsott. L'année 2001-2002 est exceptionnellement forte (482 t/km²) par régression unique contre (573 t/km²) par régression saisonnière en lien avec des écoulements également exceptionnels (le débit moyen annuel a été de 2. 25 m³/s), le moyen inter annuel est de (34,7 ton/km²/an) par la régression unique et par la régression saisonnière est de 39,5 t/km²/an)

IV.5.4.2 Bassin de Mellegue aval à Ouenza

A oued Mellegue aval à la station d'Ouenza, l'estimation du **TSS** par la régression unique atteint dans l'année 1995/96 le max avec un apport solide de 1582 de tonnes et avoisiné les 1010 de tonnes /km² avec la régression saisonnière. Cet apport représente sept fois la valeur moyenne annuelle de la période (1973/2009). L'ampleur de l'irrégularité interannuelle, en effet, l'apport entre les valeurs extrêmes des années de fortes et faibles érosions est de 1614 pour les apports solides. Malgré les quantités importantes de l'apport solide, la dégradation spécifique reste modeste ne dépassant qu'à quatre reprises sur 36 ans le seuil de 400 tonnes/km²/an et 5 reprise le seuil de 200 tonnes/km²/an).

IV.5.4.3 Bassin de Mellegue amont à L'El Aouinet

Sur une période de mesures de 29 ans, le bassin de l'oued Mellegue amont à la station de El Aouinet montre une meilleure résistance à l'érosion et donc de plus faibles valeurs en transport solide (moyen annuel 39,5 tonnes/km²/an). Néanmoins l'irrégularité interannuelle est bien marquée. L'apport solide spécifique maximal en (1995-96) est de 1772 tonnes/km²/an, par la régression unique est de 5850 t/km²/an par la régression saisonnière, quatre fois plus grande que le moyen inter annuel.

IV.5.4.4 Bassin de l'oued El Medjerda à Ain Dalia

Pour l'oued Medjerda à la station d'Ain Dalia, durant la période de mesure, l'apport solide spécifique moyen inter annuel est de 181 tonnes/km²/an et la valeur maximale en 1973-74 est de 914 tonnes/km²/an) par la régression unique elle est 5 fois supérieure à la valeur moyenne de la période avec un apport liquide de 3,6 Hm³, et par la régression saisonnière on a 181 tonnes/km²/an comme moyenne interannuelle et le maximum en même année par 1063 tonnes/km²/an.

IV.5.4.5 Bassin de l'oued K'Sob à la station d'El Azreg

Dans le bassin de l'oued K'Soub à la station d'El Azreg (qui est de la surface de 500 km²), par un apport liquide moyen inter annuel de 8,6 Hm³, l'apport solide spécifique n'atteint que 68 tonnes/km²/an par les régressions unique et saisonnière, la valeur maximale est entre 715 et 615 tonnes/km²/an en 1999-2000, ce bassin présente la plus courte période de mesure (85-2009).

IV.5.5 Estimation des T.S.S par régression « unique » à l'échelle saisonnière

Pour mieux appréhender le phénomène de l'érosion et du transport solide, nous avons vu qu'il serait judicieux d'analyser la répartition saisonnière des flux et des apports solides dans nos bassins avec les deux modèles des régressions unique et saisonnière (Figure 45 et 46).

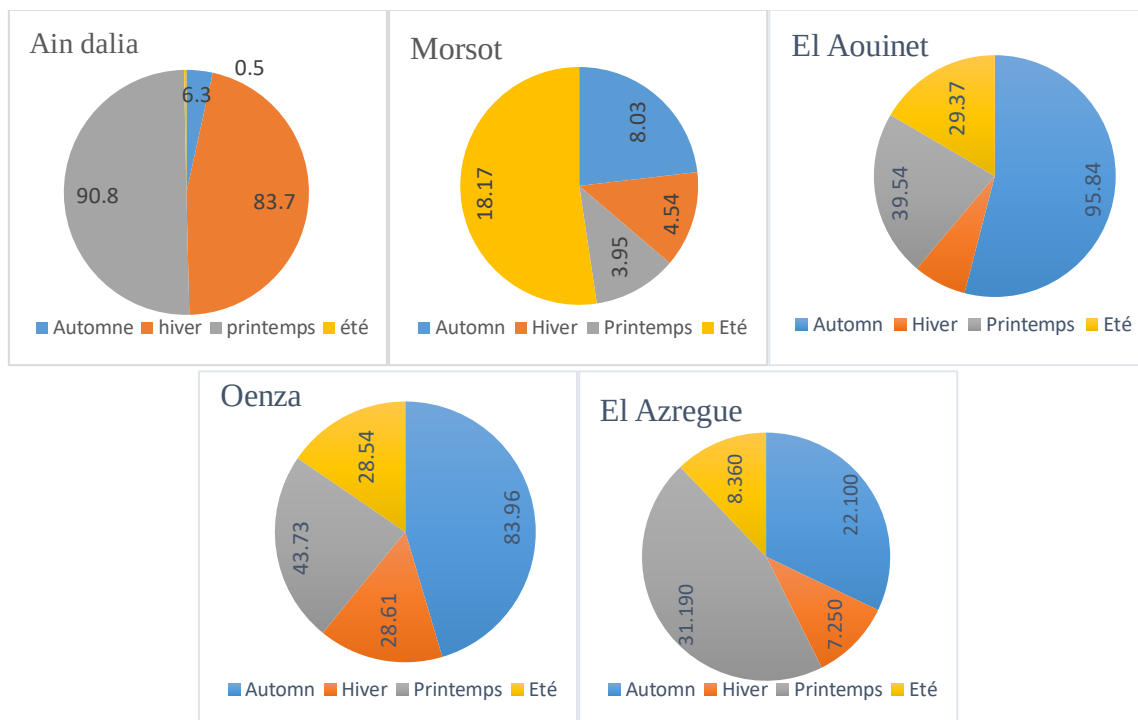


Figure 45 : Variabilité des T.S.S saisonniers pour les stations étudiées pendant la période « 73-74/2008-2009 », régression unique

Tableau.42 Répartition des T.S.S saisonnier pour les stations étudiées, régression 'Unique '

Stations	Saisons	T.S.S (tonnes/km²/saison)	Pourcentage de la saison %
Morsott	Automne	8,03	23,14
	Hiver	4,54	13,09
	Printemps	3,95	11,40
	Été	18,17	52,37
Ouenza	Automne	83,96	45,42
	Hiver	28,61	15,48
	Printemps	43,73	23,66
	Été	28,54	15,44
El Aouinet	Automne	95,84	54,04
	Hiver	12,61	7,11
	Printemps	39,54	22,29
	Été	29,37	16,56
Ain Dalia	Automne	6,26	3,45
	Hiver	83,70	46,15
	Printemps	90,81	50,08
	Été	0,54	0,30
El Azregue	Automne	22,100	32,08
	Hiver	7,250	10,52
	Printemps	31,190	45,27
	Été	8,360	12,13

IV.5.6 Estimation des T.S.S, régression « saisonnière » à l'échelle saisonnière

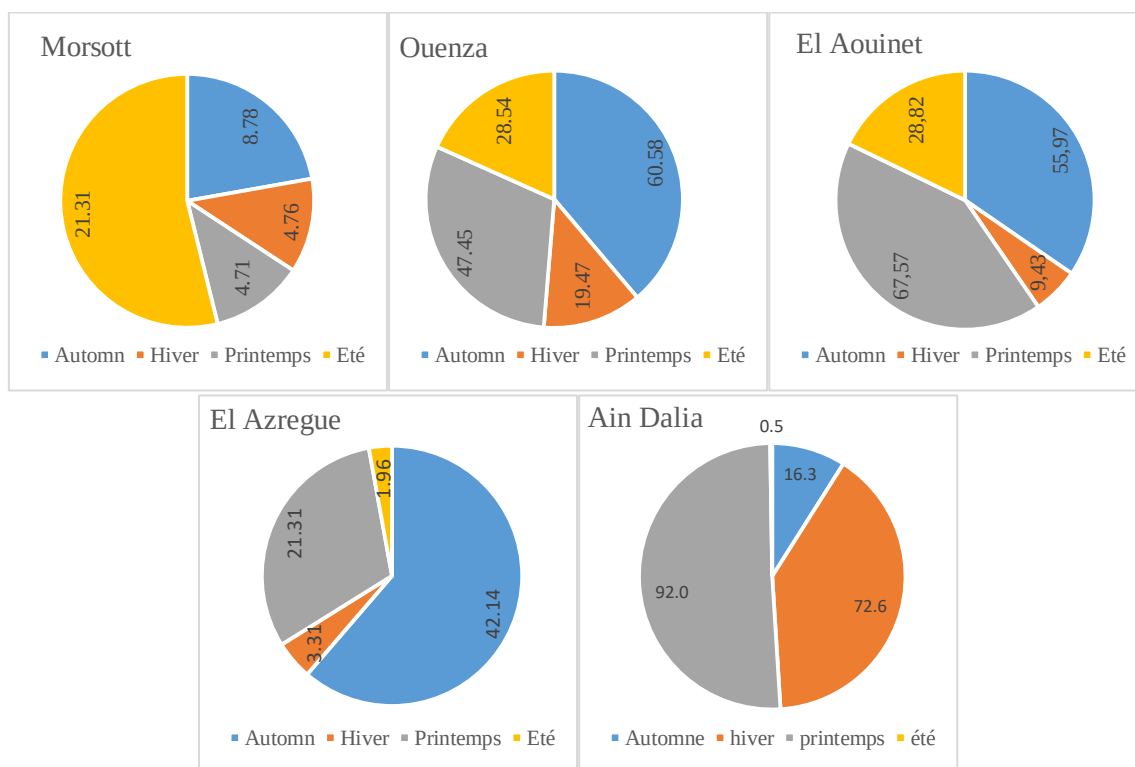


Figure 46 : Variabilité des T.S.S saisonniers pour les stations étudiées pendant la période « 73-74/2008-2009 », régression saisonnière

Tableau 43 Répartition des T.S.S saisonnier pour les stations étudiées, reg « **saisonnière** »

Stations	Saisons	TSS (tonnes/km²/saison)	Pourcentage de la saison %
Morsott	Automne	8,78	22,20
	Hiver	4,76	12,04
	Printemps	4,71	11,89
	Été	21,31	53,86
Ouenza	Automne	60,58	38,82
	Hiver	19,47	12,48
	Printemps	47,45	30,41
	Été	28,54	18,29
El Aouinet	Automne	55,97	34,59
	Hiver	9,43	5,83
	Printemps	67,57	41,76
	Été	28,82	17,81
Ain Dalia	Automne	16,28	8,98
	Hiver	72,58	40,03
	Printemps	92,01	50,74
	Été	0,45	0,25
El Azregue	Automne	42,14	61,31
	Hiver	3,31	4,82
	Printemps	21,31	31,01
	Été	1,96	2,86

Pour quantifier les apports solides spécifiques dans les sous bassins étudiés nous avons utilisé les résultats des deux modèles exponentiels de la relation (**$QI-Qs$**), régression unique (figure 47, Tableau 43) et régression saisonnière (Figure 48, Tableau 44).

IV.5.6.1 Bassin de Chabro à Morsott

La répartition saisonnière des transports solides confirme la variabilité mensuelle. On a obtenu presque les mêmes résultats par les deux régressions utilisées, 75% de la charge en suspension est transportée en automne (23%) et en été (52%), alors que les apports solides durant les deux saisons restent plus faibles, en Hiver (13%) et en printemps (11%),

Pour l'automne, la forte charge s'explique par le fait que les précipitations, souvent intenses, tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation (Chibbani et al, 1999 ; Cosandey et al. 2002 ; Roose et al, 1999). Au printemps, la charge en suspension n'augmente pas proportionnellement aux apports pluviométriques si bien que le flux saisonnier reste inférieur à celui mesuré en automne malgré une hausse très significative des totaux pluviométriques.

Donc contrairement à d'autres zones climatiques (Probst, 1992), au Maghreb, les plus fortes concentrations de la charge en matière solide en suspension ne sont nécessairement pas mesurées durant les périodes de hautes eaux. En été, ce sont essentiellement, deux orages exceptionnels de juillet 2001-2002 et d'Aout de la même année qui ont amplifié les apports solides avec successivement 2,4 tonnes/km² et 3,77 tonnes/km² soit (2419 tonnes, 3800 tonnes).

IV.5.6.2 Bassin de Mellegue aval à Ouenza

Pour l'oued Mellegue aval à la station d'El 'Ouenza, l'analyse des résultats enregistrés dans les tableaux (43-44), et figures (47-48), laisse apparaître que l'automne et le printemps se distinguent par leurs apports liquides forts, engendrant un flux important de matières solides en suspension. Les plus importants sont enregistrés respectivement en régression unique et saisonnière en automne (45 %, 39%) et à un degré moindre au printemps (23%, 31%) de l'apport annuel.

Après une grande saison sèche, les premières pluies de début d'automne trouvent un sol sec et dur, difficilement érodable. La réponse du bassin en matière en suspension est donc très faible. Ce sont les pluies torrentielles qui surviennent en octobre et novembre qui arracheront de grandes quantités de matières solides, qui seront par la suite véhiculées en suspension par le cours d'eau.

La réponse du bassin se manifeste rapidement par les ruissellements et des écoulements hypodermiques peu profonds. Quoique moins importantes que celles de l'automne, les pluies du printemps survenues après un hiver peu pluvieux et froid avec une succession de gels et dégel favorisant la déstabilisation de la structure du sol le rendant plus vulnérable à l'érosion, trouvent un sol meuble et déclenchent alors des écoulements fortement chargés.

Les deux saisons (Hiver et été) ne présentent que 30% de l'apport annuel, l'hiver période de transition entre deux saisons humides, bien que la pluviométrie soit nettement beaucoup plus

faible, les écoulements le sont moins. L'été se distingue des autres saisons, par des valeurs très dispersées ; de pluviométrie faible à nulle sans conséquences généralement sur le transport solide, mais parfois des orages estivaux ramènent des quantités considérables de matières en suspension.

IV.5.6.3 Bassin de Mellegue amont à El Aouinet

À partir de la figure qui illustre la variation saisonnière des TSS, nous pouvons constater que la saison d'Automne par régression unique et saisonnière respectivement (54 ton/km², 34 ton/km²) et de printemps (23%, 42%) notamment les deux mois de septembre et mai représentent la période la plus productive des sédiments en suspension dans le bassin versant de l'oued Mellegue amont à la station de El Aouinet. Ceci peut être expliqué par l'apparition des ruissellements Hortonien lors des orages exceptionnels d'automne après des périodes sèches. Ce type de ruissellement se manifeste dans un sol sec ou non saturé lorsque la vitesse de l'écoulement superficiel horizontal est supérieure à celle de l'écoulement vertical vers les profondeurs suite à une intensité de la pluie qui dépasse la vitesse de l'infiltration des eaux. Les saisons d'hiver et d'été sont des saisons à érosion insignifiante (03-04). Il faut voir l'état de saturation du sol d'une part et la faiblesse de l'intensité des averses.

IV.5.6.4 Bassin d'oued Medjerda à Ain Dalia

A oued Medjerda a la station d'Ain Dalia, c'est au printemps (50%) et en l'hiver (40%) qu'on enregistre les plus forts flux en suspension par la régression unique. Mais quand en utilisant la régression saisonnière l'apport solide de l'hiver augmenté (6%) par rapport au totale annuel et enregistré la stabilité du printemps (50%) ceci explique l'influence des paramètres (a et b) sur les saisons c'est pour ce fait qu'on utilise les deux modèles exponentiels. L'oued Medjerda véhicule 90 tonnes de matières en suspension au printemps chaque année, soit 50% par rapport au total annuel.

IV.5.6.5 Bassin de l'oued K'sob à la station d'El Azreg

En automne (32%) du transport des matières en suspension s'effectue, et le printemps (45%) par la régression unique contre l'Automne (61%) et Printemps (31%) par la régression saisonnière. L'automne dont l'apport liquide est de (0,27Hm³) presque la moitié que celui du printemps (0,52Hm³) transporte environ la même quantité de sédiment. En automne, le sol est encore dénudé, alors qu'au printemps la couverture herbacée est déjà développée et réduit considérablement la mobilisation des matériaux fins. Les saisons d'hiver et d'été sont des saisons à érosion insignifiante (été 2,8%, Hiver 4,8%) (03-04 et tableau 03-04).

Les valeurs des apports solides spécifiques à l'échelle saisonnière sont généralement concentrées aux deux saisons celles de printemps et d'automne au niveau des sous bassins de notre zone d'étude, On peut dire que le bassin versant de l'oued Mellegue admet un apport solide annuel moyen égal à (1155426 ton/an), (71%) des apports solides transportés en printemps et en automne soit (printemps 37%, automne 34%) par rapport totale annuel. Ce transport est favorisé par une érosion

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations QI – Qs et étude du phénomène d'hystérésis

active qui se manifeste par une dégradation spécifique moyennement élevée de l'ordre (1138 tonnes/km²/an).

IV.5.7 Estimation des T.S.S par la régression « unique » à l'échelle mensuelle

Le flux mensuel des matières solides en suspension exporté par les différents oueds est calculé de la même manière que le flux annuel et saisonnier par les deux régressions unique et saisonnière appliquées sur les débits liquides moyens mensuels, pour chaque mois considéré de l'année (Tableau.45-46).

Tableau 44 Répartition des T.S.S (tonnes/km²) mensuels des stations de Medjerda Mellegue (régression unique)

Mois/Stations	Morsott	Ouenza	El Aouinet	Ain Dalia	El Azreg
Sept	3,58	55,0	64,8	0,11	14,16
Oct.	1,23	15,2	16,1	1,26	5,81
Nov.	3,22	13,8	14,9	4,90	11,30
Déc.	0,84	14,8	3,8	20,33	4,86
Jan	2,84	8,9	6,5	34,25	2,39
Fév.	0,86	4,9	2,4	29,13	6,68
Mar	0,70	3,5	3,7	62,34	5,12
Avr.	0,63	10,5	4,6	24,46	6,64
Mai	2,62	29,7	31,3	4,02	14,85
Juin	1,76	18,7	19,1	0,42	10,51
Juil.	2,40	3,0	2,4	0,09	5,00
Aout	14,01	6,8	7,8	0,04	3,64
Total	34.69	184.8	177.4	181.35	90.96

IV.5.8 Estimation des T.S.S par la régression « saisonnière » à l'échelle mensuelle

Tableau 45 Répartition des T.S.S (tonnes/km²) mensuels des stations de Medjerda Mellegue (régression saisonnière)

Mois/Stations	Morsott	Ouenza	El Aouinet	Ain Dalia	El Azregue
Sept	3,9	38,37	36,1	0,198	30,4
Oct.	1,5	11,77	10,5	2,913	6,7
Nov.	3,3	10,44	9,5	13,16	5,0
Déc.	0,8	10,03	2,6	17,73	1,3
Jan	3,1	6,09	5,3	29,86	0,8
Fév.	0,8	3,34	1,5	24,97	1,2
Mar	0,8	3,59	5,5	69,18	1,8
Avr.	0,7	11,21	6,7	20,33	3,2
Mai	3,2	32,65	55,4	2,48	16,3
Juin	1,9	18,74	18,7	0,36	1,4
Juil.	2,7	3,04	2,6	0,059	0,4
Aout	16,7	6,75	7,5	0,024	0,1
Total	39 4	156 02	161 9	181 264	68 6

IV.5.8.1 Bassin de Chabro à Morsott

D'après l'analyse des tableaux (tab44-45) nous pouvons constater une légère différence entre les résultats obtenus par la régression unique et celle par la régression saisonnière presque les mêmes. Les valeurs mensuelles de transport solide spécifique et les apports liquides, montrent une forte variabilité mensuelle de la charge solide en suspension. 51% de cette charge est mesurée au cours de deux mois seulement : en septembre 09%, en août 42%, Cette variabilité inter-mensuelle de l'apport solide en suspension est due à la fréquence des crues importantes.

IV.5.8.2 Bassin de Mellegue aval à Ouenza

À l'échelle mensuelle par la régression unique la réponse de l'oued Mellegue à la station de l'Ouenza admet un apport solide de (460355 tons) soit (86%) par rapport à l'apport solide annuel pendant quatre mois seulement, en septembre 32%, en octobre 10%, en mai 28% et en juin 16%. On constate que l'action érosive est plus activée, ont enregistré une diminution des apports solides spécifiques par la régression saisonnière dans chaque trois mois de chaque saison.

IV.5.8.3 Bassin de Mellegue amont à El Aouinet

Dans ce sous bassin on a trouvé que les mois les plus importants sont septembre, octobre et novembre, c'est à dire l'automne avec un apport solide de (19731 ton) soit 54%, et le mois de mai au printemps par un apport solide de 110333 ton soit 17,6%, dans le total (71%) pour quatre mois seulement de l'année.

IV.5.8.4 Bassin d'oued Medjerda à Ain Dalia

A la station d'Ain Dalia, il apparaît que c'est pendant les mois de septembre, octobre, mars, avril et mai que l'action érosive est la plus active. En effet l'apport solide en mars, avril et mai représente 47% du total annuel. Quant au mois de septembre l'apport solide enregistré est de 7 % soit 158 ton, cet apport relativement important par rapport à la petite surface de ce bassin (213 Km²); il est presque 3 fois plus faible que ceux de mars. La variation, mensuelle des débits solides durant la période 1973-74/2008-09, permet de constater que 27 valeurs sur 252 soit près de 11%, sont supérieures à la moyenne. Ce qui veut dire que l'essentiel de l'apport solide est causé par quelques crues durant la période.

IV.5.8.5 Bassin de l'oued K'soub à la station d'El Azreg

Le sous bassin de l'oued K'soub à la station d'El Azreg garde presque les mêmes caractéristiques des précédent sous bassins, le mois de septembre assure près 17% des apports liquides annuels et 44% des apports solides. Sur la période de 1985/09, on note que, très peu de valeurs sont supérieures à la moyenne. On peut dire que les crues violentes sont responsables de la plus grande partie des transports solides et des dégradations des bassins versant. Les calculs par les régressions saisonnières, aboutissent à des valeurs plus faibles que celles estimées par la

régression unique. Ceci est lié à la fois aux coefficients des deux régressions et aux valeurs de débits liquides moyens mensuels.

IV.5.9 Estimation des T.S.S journaliers par régression « saisonnière » à l'échelle journalière

Le calcul des débits solide et de transport solide spécifique journaliers a été réalisé par le biais des régressions saisonnières. Celles-ci ont été préférées aux régressions uniques car elles mettent en valeur les différences de comportement des saisons (différences entre les valeurs de (a et b) du modèle puissance « $Qs = bQL^a$ »).

Les résultats obtenus ont permis de constater de grandes différences lorsqu'on applique les régressions saisonnières aux débits mensuels d'une part et aux débits journaliers d'autre part, pour la même station hydrométrique. Les T.S.S. calculés en utilisant les débits moyenne journaliers sont toujours plus élevés que ceux calculés avec les débits moyens mensuels.

IV.5.9.1 Répartition annuelle des T.S.S. journaliers

Pour bien comprendre les variations journalières des T.S.S., On a tenté d'étudier toutes les années de la période commune (85-2001-2002) de chaque station Hydrométrique utilisant le modèle exponentiel, par la régression unique et saisonnière à l'échelle journalière. Lorsque on a une période commune inter bassin de 18 ans c'est difficile de présenter tous les résultats, pour ce fait dans ce travail on a préféré présenter les variations transports solides spécifiques journaliers quantifiés par la régression saisonnière des trois années « Moyenne, Maximale et Minimale » pour chaque sous bassin versant et ses apports solides journalier et sa participation dans le mois et dans l'année.

IV.5.9.1.1 Le sous bassin versant de l'Oued Chébro à la station de Morsott

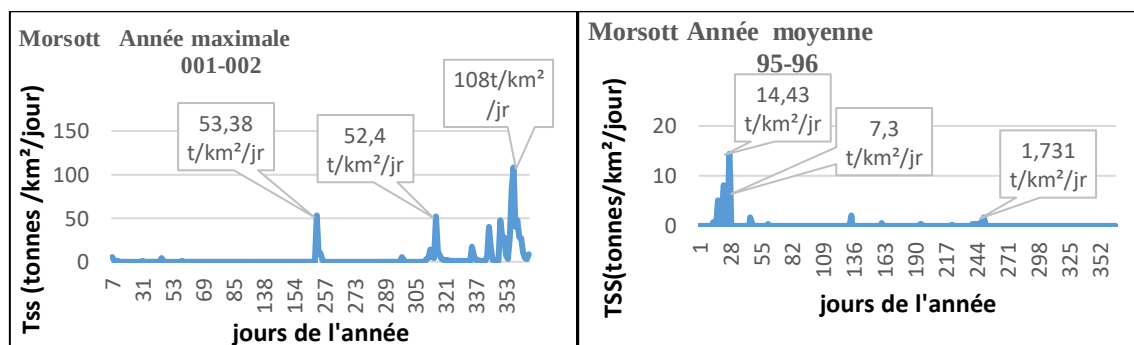


Figure 47 Variation des transports solides spécifiques journaliers (*régressions saisonnières*)

Tableau 46 Résultats des transports solides spécifiques journaliers (*régressions saisonnières*)

	Année Minimale 93-94	Année Maximale 01-02	Année Moyenne 95-96
Nb /jours de l'année	282 jours	221 jours	360 jours
Apport solide des jours importants	06 sept. 375 ton/jr	07 sept. 7100 ton/jr	13 sept. 853 ton/jr
	03 déc. 262 ton/ jr	11 mai. 70087 ton/jr	17 sept. 6643 ton/jr
	19 juin. 19 ton/ jr	01 aout. 22329 ton/jr	22 sept. 10504 ton/jr
	//	22 aout. 107666 ton/jr	27 sept. 18382 ton/jr

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations QI – Qs et étude du phénomène d'hystérésis

Dans le sous bassin de l'oued Chabro à la station de Morsott on distingue bien la participation journalière dans la production des sédiments, on peut avoir un apport solide journalier équivalant à celle d'un mois ou plus.

Dans l'année minimale (93-94) l'apport solide atteint 80 tonnes/an soit (0,06 t/km²/an), dans la journée du 06 septembre on a un apport solide de 23 ton/jour (29 % par rapport du taux annuel.

L'année (2001-2002) été exceptionnelle par un apport annuel maximal environ d'un million soixante-dix mille (1 070 000 tonnes), il existe quelques jours seulement qui sont responsables de ce grand apport, nous citons le 11 mai (700 000 tonnes par jour soit 6,55% de l'apport annuel), le 22 Aout (107947,532 tonnes /jour soit 10 %), le 23 Aout (142156,558 tonnes ,13%). Ainsi pendant trois jours le sous bassin produit 30 % des transports solides annuels. Pour l'année moyenne on prend l'année (1995-1996) par un apport solide annuel de quatre-vingt-dix mille (80 000 tonnes) avec un transport solide spécifique de (66 t/km²/an). Dans cette année le sous bassin a produit pendant le mois de septembre environ 49% de l'apport annuel pendant quatre jours respectivement 22,23 ,27 et 28 du même mois.

IV.5.9.1.2 Le sous bassin versant de l'Oued Mellegue aval à la station d'Ouenza

Durant la période commune « 86-02 » l'année 95-96 est exceptionnelle, avec un apport solide annuel environ de (10 millions de tonnes), concentré plus de (50%) de l'apport solide annuel dans le mois du septembre, (Tableau. 47) (Figure 48).

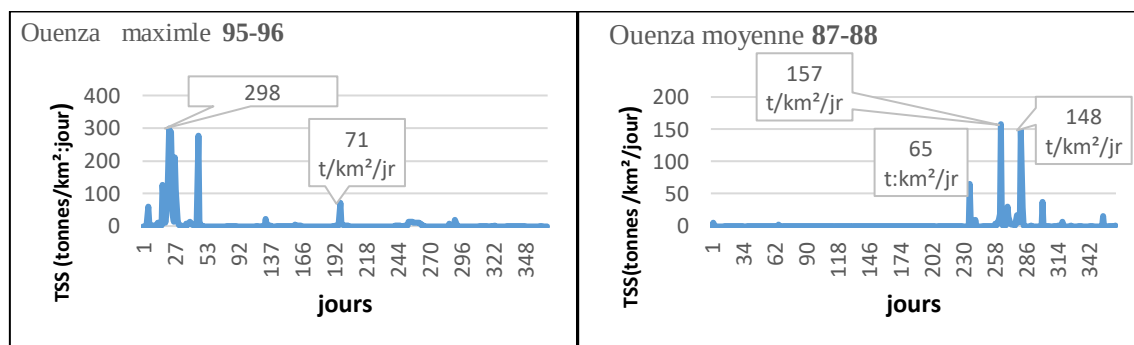


Figure 48 Variations des transports solides spécifiques journaliers (régression saisonnière)

Tableau 47 Résultats des transports solides spécifiques journaliers (régression saisonnière)

	Année Minimale 96-97	Année Maximale 95-96	Année Moyenne 87-88
Nb/ jours de l'année	146 jours	331 jours	360 jours
Apport solide des jours importants	14avril 14835,50 t/jour	17sept. 572587 ton/jour	24 avril. 297180,8 t/jr
	29 juin 86889,63 t/jour	22sept.1354252 ton/jour	22Mai. 716088,5 t/jr
	17juile 17959,15 t/jour	23sept. 936686 ton/jour	09 juin. 672223,5 t/jr
	////	24sept. 1312088 ton/jour	10 juin. 130652,4 t/jr
	////	27sept. 955837 ton/jour	28 juin 173012,7 t/jr

Dans l'année moyenne « 87-88 » on enregistrer un apport solide de (3millions de tonnes), le mois d'Avril a participé par le 14 avril avec 10%, le mois de mai par le 22 mai avec

24% et le mois de juin par le 09juin, 23% et 28 juin,6%. Le sous bassin de l’oued Mellegue aval ne dispose que (173 ton/km²/an équivalent d’un apport solide annuel de 180 000 tonnes des matières transportées. Dans l’année 96-97 on a uniquement 146 jours d’écoulement engendrant de forts apports journaliers, lors d’un seul jour (29 juin, un apport solide journalier de 86 000 tonnes /jour soit 50% de l’apport annuel, le 14 avril ,09 %, et le 17 juillet par un apport équivalent de 10%.

IV.5.9.1.3 Le sous bassin versant de l’Oued Mellegue amont à la station de El Aouinet

Pour le sous bassin de l’oued Mellegue amont, après l’analyse de la figure 49 et tableau 48 on a constaté qu’il y a une dominance du mois de juin dans l’année moyenne « 94-95 » du 09 juin au 18 juin par un apport solide équivalent de (82% par rapport à l’apport annuel. L’année « 99-00 » signalée comme année maximale pour l’apport solide annuel de (14 millions de tonnes, le mois de mai constitue 90% de cet apport et le mois de septembre représenté par le 10 septembre 600 milles tonnes soit 05% de l’apport solide annuel.

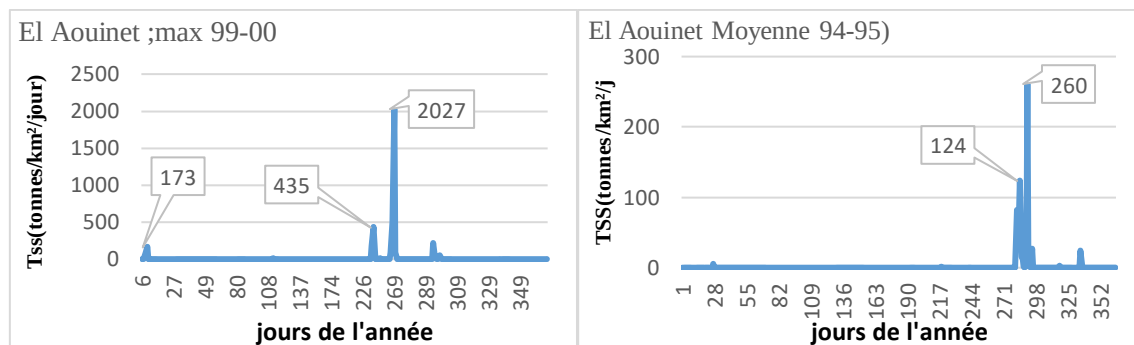


Figure 49 Variations des transports solides spécifiques à l’échelle journalière (*régressions saisonnières*)

Tableau 48 Résultats des transports solides spécifiques à l’échelle journalière par régressions saisonnières

	Année Minimale 93-94	Année Maximale 99-00	Année Moyenne 94-95
Nombres des jours de l’année	365 jours	258 jours	364 jours
Apport solide des jours importants	06 sept.5367, 58 t/ jr	10 sept.611443, 9 t/ jr	09 juin.288521, 94 t/ jr
	22 oct. .31509, 48 t/ jr	13 Mai .625728, 7 t/ jr	10 juin.230095, 99 t/ jr
	04 déc.30070, 32 t/jr	14 Mai.1533914, 1 t/ jr	11juin. 243475,15 t/ jr
	29 Mai.15972, 62 t/ jr	25 Mai .1751994, 5 t/ jr	12juin. 437601,84 t/ jr
	////	26 Mai.7147704, 7 t/ jr	18 juin. 288521,94 t/ jr

L’année 93-94 a connue l’abondance hydrologique de septembre à mai, caractérisée par des crues produites par des averses ruisselantes, elles-mêmes engendrées par des pluies souvent violentes le 22 Octobre 20% de l’apport solide annuel, le 04 Décembre par 19% et 29 mai par 10 %.

IV.5.9.1.4 Le sous bassin versant d'oued Medjerda à la station d'Ain Dalia

Le sous bassin de l'oued Medjerda avec sa petite surface, l'activité érosive est moyenne à faible par rapport aux autres sous bassins, l'année « 1981/82 », marquée par l'indigence hydrologique. Durant la saison Hivernale du 22 Décembre au 21 mars, les apports solides spécifiques journaliers atteints (2,5 tonnes/km²/jour) (40 tonnes soit 01% de l'apport solide annuel. La même observation pour l'année maximale (1973/74).

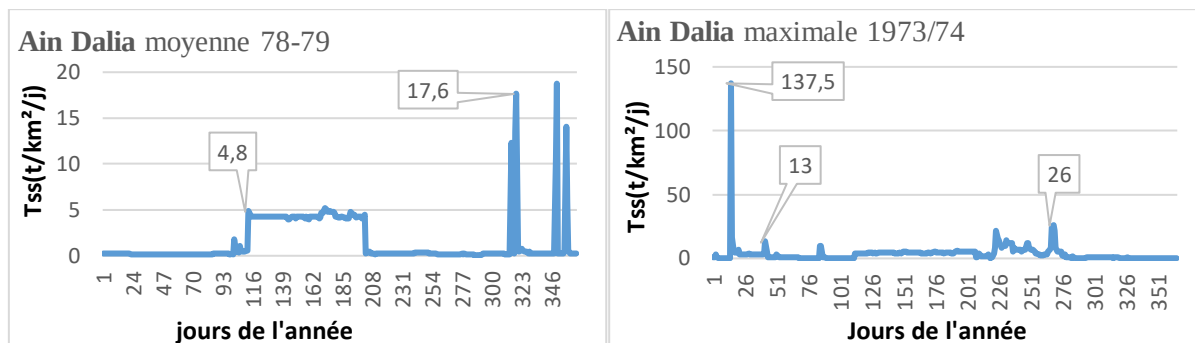


Figure 49 Variations des transports solides spécifiques journaliers (régressions *saisonnnières*)

L'apport solide annuel est compensé par la crue du 27 mai (420 tonnes /jour) soit 2% de l'apport annuel, et 11% par 15 septembre (2200 tonnes/jour). Dans l'année (78-79) les événements sont plus fréquents que ceux des deux années précédentes représentés par juillet et Aout, respectivement (10 %, 6%).

IV.5.9.1.4 Le sous bassin versant de l'Oued K'soub à la station d'El Azreg

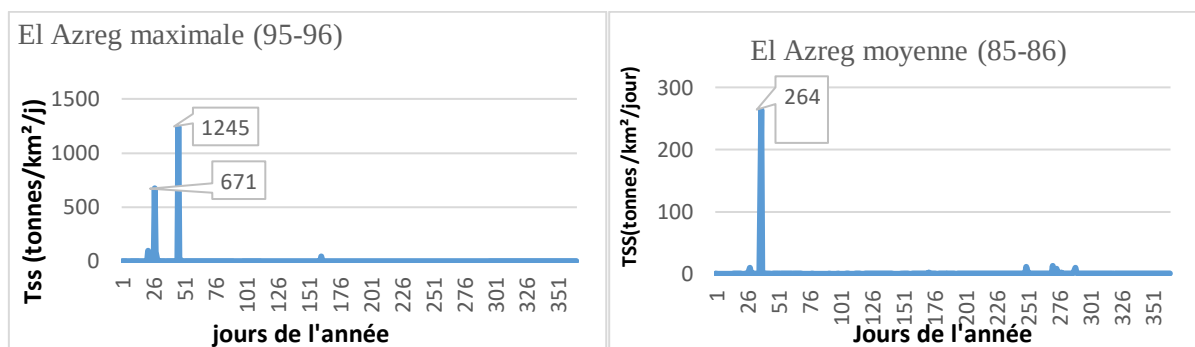


Figure 50 Variations des transports solides spécifiques journaliers (régressions saisonnières)

Dans le sous bassin de l'oued K'soub a la station d'El Azreg, le « 27 septembre 92 » est exceptionnel, il a produit un apport solide journalier de 135 800 tonnes, soit 71% de l'apport solide annuel ; le « 16 Octobre 95 » on a obtenu un apport solide journalier important 57 % de l'apport annuel pendant une journée seulement. Finalement dans l'année 85-86 ont été enregistrés le « 25mars : 389,15 tonnes soit 41% de l'apport solide annuel, par un TSS de 0,75tonnes/km²/jour et le 26 mars (56 tonnes /jour) dans le total du mois de mars 47% par rapport au total annuel de la même année.

Tableau 49 Résultats des transports solides spécifiques journaliers par (régressions saisonnières)

	Année Minimale 92-93	Année Maximale 95-96	Année Moyenne 85-86
Nombres des jours de l'année	300 jours	355 jours	345 jours
Apport solide des jours importants	28sept.4760 ton/jour	27sept.344929 t/jour	25mars.389 ton/jour
	07 oct. 135781ton/jour	16 oct.639843 t/jour	26mars.56 ton/jour
	29 mai.6470 ton/jour	//	18juin.63ton/jour

Le tableau ci-dessous présente les résultats des écarts absolus et relatifs entre les transports solides spécifiques estimés par l'application de la régression saisonnière sur les débits liquides moyens mensuels et les débits liquides moyens journaliers.

Tableau. 50 Écart entre le TSS calculé par les régressions saisonnières appliquées sur les débits moyens journaliers et les débits moyens mensuels.

Station	Morsott		Ouenza		El Aouinet		Ain dalia		El Azreg	
Écart	Absolu	%	Absolu	%	Absolu	%	Absolu	%	Absolu	%
1985 - 86	24,8	32,9	1465,0	17,4	623,5	13,7	24,8	32,9	287,8	15,2
1986 - 87	7,7	52,0	674,6	29,2	151,2	31,0	7,7	52,0	949,9	8,5
1987 - 88	14,5	60,8	2013,1	30,7	914,8	24,8	14,5	60,8	307,4	23,4
1988 - 89	8,5	48,9	1551,9	23,7	442,1	21,0	8,5	48,9	27,5	25,3
1989 - 90	143,3	33,6	2325,6	44,0	1012,5	35,1	143,3	33,6	0,3	94,3
1990 - 91	65,2	53,2	1996,6	38,4	657,4	32,5	65,2	53,2	10,5	52,1
1991 - 92	22,8	53,2	1211,3	16,7	545,1	14,0	22,8	53,2	17,9	67,7
1992 - 93	20,9	54,0	210,9	32,8	65,0	32,0	20,9	54,0	0,3	86,4
1993 - 94	-0,6	1001,1	163,3	14,2	39,3	14,8	-0,5	901,1	2,3	52,0
1994 - 95	3,3	53,7	1143,0	37,1	581,5	22,0	3,3	53,7	1117,7	7,4
1995 - 96	22,4	66,1	4893,6	50,5	1073,0	50,7	22,4	66,1	2004,2	8,5
1996 - 97	-1,0	688,3	142,4	18,1	38,8	21,9	-2,0	588,3	0,7	79,8
1997 - 98	20,2	56,3	954,1	25,9	287,9	21,7	20,2	56,3	1,4	74,1
1998 - 99	27,3	55,7	662,4	42,3	125,7	46,4	27,3	55,7	277,3	5,7
1999 - 00	76,4	39,2	6826,4	25,8	2989,8	23,8	76,4	39,2	-420,9	243,1
2000 - 01	24,0	32,8	940,0	16,9	290,2	14,9	24,0	32,8	246,5	3,3
2001 - 02	241,0	70,4	931,3	27,9	212,3	31,0	241,0	70,4	72,6	6,0
Station	Morsott		Ouenza		El Aouinet		Ain Dalia		El Azreg	
Moyenne	42,4	144,2	1653,3	28,9	591,2	26,6	42,5	26,6	288,4	50,2
Écart type	62,4	269,6	1741,1	10,8	703,6	10,8	62,3	10,8	573,0	59,3
Cv	1,5	1,9	1,1	0,4	1,2	0,4	1,5	0,4	2,0	1,2
Cv%	147,2	186,9	105,3	37,2	119,0	40,6	146,7	40,6	198,6	118,2

Absolu : Écart absolu (T.S.S. Journalier – T.S.S. Mensuel). **Cv** : Coefficient de variation

% : Écart relative ((T.S.S. Mensuel/T.S.S. Journalier) *100). **Cv %** : Coefficient de variation

IV.6 Modèle d'érosion en fonction de la concentration des sédiments en suspension et du débit liquide durant les crues et le phénomène d'hystérésis.

IV.6.1 Problématique

Les problèmes posés par la mesure du transport en suspensions de par leur nature, incitent les hydrologues à s'intéresser à l'étude des variations de C et Q au cours d'une crue. En effet, la nature complexe du phénomène de crue, la conception de nouveaux, échantillonneurs et de nouvelles techniques de mesure, ainsi que les difficultés rencontrées lors des mesures par les observateurs, sont les éléments clé de cet intérêt. Dans les petits cours d'eau, les concentrations des sédiments en suspension sont directement liées au débit. Les concentrations des sédiments en suspension augmentent généralement très rapidement pendant les montées des crues, produisent une pointe avant le débit maximal puis diminuent plus lentement pendant la décrue. Autrement le débit liquide et la concentration instantanée des sédiments en suspension peuvent ne pas avoir une relation stationnaire pendant un écoulement simple du a une averse. La tendance pour que la concentration en sédiment ait différentes valeurs à des débits identiques est l'effet d'hystérésis.

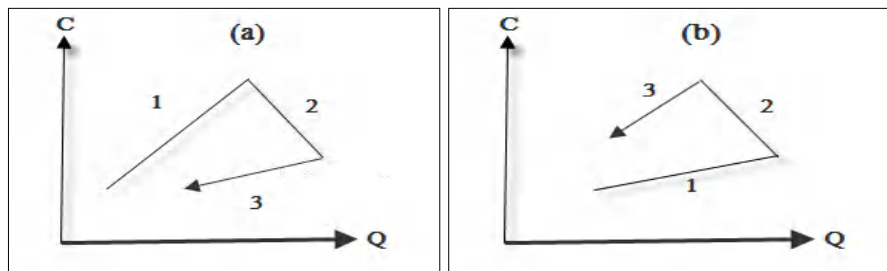


Figure 51 Phénomènes d'hystérésis dans la relation entre débit Q et concentration en MES C au cours d'un événement de crue : (a) hystérésis horaire et (b) hystérésis antihoraire.

IV.6.2 Formes générale des hystérésis

IV.6.2.1 Hystérésis horaire (ORTHOGRADE)

La concentration maximum des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum. Ce type d'hystérésis est souvent lié à une production rapide de sédiments (Walling and Webb, 1981 ; Asselman 1999 ; Lenzi *et al.*, 2003 ; Sutter *et al.* 2001 ; Sammori *et al.*, 2004). Les causes principales de ce phénomène sont :

- La remise en suspension des sédiments déposés lors des basses eaux ou lors de la décrue d'un événement précédent.
- Une pluie intensive produisant rapidement des sédiments (splash et rigoles d'érosion) ;
- Une source de production proche.

Ce type d'hystérésis peut être décomposé donc en trois étapes (figure .51(a)) :

Étape 1 : une augmentation rapide de la concentration en sédiments (érosion, remobilisation, source proche).

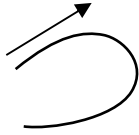
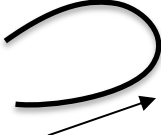
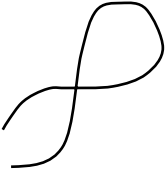
Étape 2 : une diminution de la concentration des sédiments en suspension et une forte augmentation du débit (dilution des concentrations par l'augmentation des débits).

Étape 3 : une diminution de la concentration des sédiments et du débit (dépôt des sédiments lié à la diminution du débit).

IV.6.2.2 Hystérésis antihoraire (RETROGRADE)

Pour ce type de boucle le maximum de concentration est postérieur au maximum des débits (Heidel, 1956), elles sont en général expliquées par : - l'existence de sources distantes (Heidel, 1956 ; Williams, 1989) ou à l'effondrement de berges juste après le passage du pic de crue (Sarma, 1986 ; Ashbridge, 1995) ; - la différence entre la vitesse de l'onde de crue et les vitesses de l'écoulement (Williams, 1989).

Tableau 51 Différentes classes d'hystérésis dans les relations MES-débit et leurs interprétations

Class	Forme de boucle	Rapport C/Q	Descriptions	La forme
I	Ligne Simple	C/Q de la montée égale à celui de la décrue (Wood, 1977)	-Matériaux désolidarisés des berges et déjà érodés (Lenzi et Lorenzo, 2000) -Après des crues où les particules fines sont parties (Hudson, 2003) -Arrivée contenue de matériaux selon débit et granulométrie (Hudson, 2003)	
II	Clockwise loop	C/Q de la montée supérieure à celui de la descente, pour toute valeur de Q (Paustian et Beschta, 1979)	-Remise en suspension puis érosion et dilution (Jansson, 2002, Picouet et al, 2001) -Epuisement du stock de sédiment (Lenzi et Lorenzo, 2000, Jansson, 2002)) - Particules des zones proches du corridor (Williams, 1989, Seeger et al, 2004)	
III	Counter clockwise loop	C/Q de la montée inférieure à celui de la descente pour toute valeur de Q (Axelsson, 1967)	-Sources lointaines (Orwin et smart, 2004) -Après un grand événement pluvieux qui a tout enlevé (Hudson, 2003) -Différence de vitesse entre onde de particule et onde d'eau (Hudson, 2003)	
IV	Linéaire simple plus une boucle	a-C/Q de la montée égale à celui de la descente pour une partie des valeurs de Ql b- C/Q de montée supérieur ou inférieur à celui de la descente pour une autre partie de valeur de Q	-Dépend de la disponibilité, du stock et du transport de MES (Williams, 1989)	
V	Forme de huit	a- rapport C/Q de montée supérieur à celui de la descente pour une partie des valeurs de Q b- rapport C/Q de montée inférieur par rapport à la descente pour une autre partie des valeurs de Q (Amborg et al., 1967)	- Dépend de la disponibilité en particules, et des débits	

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $QI - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

Les sédiments en suspension tendent à être transportés avec une vitesse proche de celle de l'écoulement, qui est inférieure à la vitesse de l'onde de crue. Cette différence de vitesse engendrerait alors un retard de l'arrivée des sédiments par rapport au pic de crue.

La dynamique de ces phénomènes peut être décomposée aussi en trois étapes (figure .51(b)) :

Étape 1 : précipitation sur le bassin et début du ruissellement,

Étape 2 : transport des sédiments lié aux forts débits (faible concentration due à la dilution),

Étape 3 : arrivée des sédiments mobilisés (une concentration plus élevée liée au débit plus faible).

Les boucles d'hystérésis de la relation C-Q identifiées sont représentées ci-dessous (**Tableau.51**). Bien qu'il existe d'autres formes de boucles, ce tableau représente probablement la majorité des boucles d'hystérésis relevées à travers les différentes recherches effectuées dans plusieurs bassins du monde. Les effets de la combinaison des différents paramètres statistiques (mode, aplatissement et asymétrie) peuvent constituer une approche adimensionnelle et qualitative beaucoup plus importante que les méthodes avec calculs détaillés. Dans cette caractérisation, les parties montée et décrue représentent les deux zones de base pour l'analyse des classes d'hystérésis. Le critère rapport C/Q , est un critère simple, objectif mais faible. Il est considéré comme étant le premier critère de base.

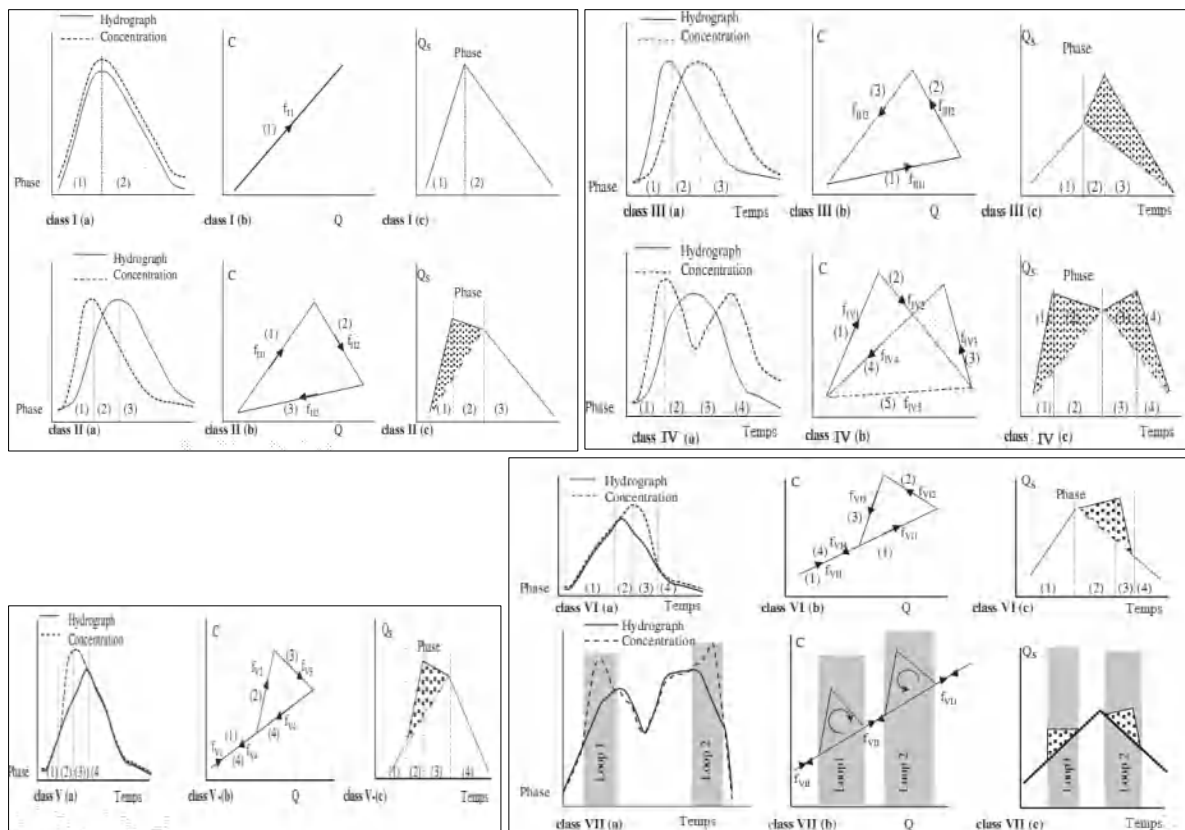


Figure 52: Relations communes entre la concentration en sédiments en suspension (C) et le débit liquide (Q) ; Identification des stades successifs d'un épisode de fluidité et diagramme schématisant expliquant l'évaluation des deux composantes : charge de base (Y S1) Et l'offre de nouvelles sources de sédiments, disponibles dans le bassin versant (Y S2).

IV.6.3. Méthodologie

La dispersion des points de C et Q est une caractéristique très importante qui, avec d'autres aspects liés à l'allure du graphe, permet d'effectuer des combinaisons, en liaison avec le phénomène d'hystérésis (Benkhalel et Remini, 2003). A cet effet, la discussion des paramètres physico-géographiques et hydrologiques de chaque classe de crues est nécessaire surtout lorsqu'il s'agit de localiser la source d'entraînement des sédiments.

Dans ce chapitre, 177 crues contenant des mesures de concentration en suspension sont analysées, réparties de la manière suivante :

- ✓ 09 crues dans le bassin de l'Oued Chabro enregistrées par la station de Morsott.
- ✓ 55 crues dans le bassin de l'Oued Mellegue amont enregistrées par la station de El Aouinet
- ✓ 82 crues dans le bassin de l'Oued Oued Mellegue aval enregistrées par la station de Ouenza.
- ✓ 20 crues dans le bassin de l'Oued Erkel enregistrées par la station d'Ain Erkel.
- ✓ 11 crues dans le bassin de l'Oued K'sob relevées par la station d'El Azreg.

Parmi ces crues, 70 événements sont analysés en détail sur la base des critères suivants :

- Réalisation d'hydrogramme complets et simples,
- Prise en compte de crues fortes et modérées.

La démarche de la réalisation des relations C-Q se présente en deux étapes :

- Les données de débit et de concentration en suspension sont mises en graphe avec en ordonnée la concentration (g/l) et le débit liquide (m^3/s), et en abscisse le temps correspondant (heure),
- Les données des deux variables C-Q de chaque crue sont mises en relation, sous la forme $Q = fct(C)$, pour déterminer le phénomène d'hystérésis et discuter le comportement hydro sédimentaire des crues.

IV.6.3.1 Identification des classes de relation (C-Q)

Les différents graphes temporels avec leurs largeurs, symétries/asymétries révèlent 7 classes de relation C- Q_L (Tableau .01). Chaque classe est caractérisée par un critère mathématique simple, objectif et fiable, une fois les deux graphes temporels sont disponibles (Williams, 1989). Ce critère est le rapport C/Q_L à des temps arbitraires durant la montée et la descente de C et Q_L . Il est fondamental dans l'identification des boucles d'hystérésis.

La première étape de l'analyse consiste à choisir un temps durant la montée de Q_L , lire les valeurs correspondantes Q_L et C et calculer le rapport C/Q_L . La seconde étape se résume dans la localisation de cette même valeur de Q_L sur le graphe de Q_L , lire la concentration associée au débit en ce même temps et déterminer le rapport C_2/Q_L . Ces deux rapports seront qualitativement comparés suivant l'égalité ou la supériorité de l'un sur l'autre, ce qui facilite la détermination de la classe.

Les caractéristiques de forme apportent, entre autres, d'autres détails concernant la largeur et l'orientation de la boucle.

Tableau 52 : Description des formes des Hystérésis

Classes	Relation	Rapport C/Q	Référence
I	Ligne simple estimée (single-valued line)	$(C/Q)_m \approx (C/Q)_d$	Wood (1977)
	A- Ligne droite	Pentes des deux sections (m, d) sont égales	
	B- Courbe, pente croît quand Q augmente (curve bending upward)	Pentes des deux sections (m, d) sont inégales	
	C- Courbe, pente décroît quand Q augmente (curve bending downward)	pentes des deux sections (m, d) sont inégales	
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (clockwise loop)	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour toutes les valeurs de Q	Paustian et Beschta (1979)
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (counterclockwise loop)	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour toutes les valeurs de Q	Axelson (1967)
IV	Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)	$(C/Q)_m \approx (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q	-/--/--/-
V	Forme en huit (figure eight)	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q	Arnborg et al (1967)
VI	single line plus one loop anti-clockwise		Megnounif 2013
VII	single line plus several loops		

IV.6.3.1.1 Classe I

Cette classe représente la relation C-Q la plus simple. Sa caractéristique principale est que les rapports C/Q sont égaux pour les valeurs de Q que ce soit en montée de crue ou en décrue. Ce modèle indique que les concentrations en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide (Bouanani, 2004). Nous distinguons dans cette classe 3 sous-groupe : la ligne droite, la courbe concave vers le haut (curve bending upward) et la courbe concave vers le bas (curve bending downward). Le premier sous-groupe (Ia), ligne droite, apparaît quand les deux graphes C et Q possèdent des pics simultanés et des largeurs et symétries identiques.

Les courbes de la relation C-Q (sous-groupes Ib et Ic) sont obtenues quand les graphes ont des pics simultanés, des hauteurs et des symétries identiques, mais des largeurs différentes. Ainsi, si la largeur du graphe « C » est moins grande que celle du graphe Q, c'est le sous-groupe Ib (curve bending upward) qui l'emporte. Dans le cas contraire, nous obtenons le sous-groupe Ic (curve bending downward).

Le degré de concavité est moindre lorsque la largeur des deux graphes temporels de C et Q sont presque identiques (largeur du graphe C est légèrement grande ou petite que la largeur du graphe Q). La concavité devient plus prononcée quand la largeur de l'un est considérablement plus grande ou plus petite que l'autre.

IV.6.3.1.2 Classe II

C'est la classe en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre "clockwise loop" (Fig. 52). Si le pic de la concentration en suspension (C) arrive à la station hydrométrique avant le pic du débit liquide (Q1), la valeur de C durant la montée de crue est plus élevée que celle durant la décrue, avec la même valeur du débit liquide, d'où le rapport C/Q1 (montée de crue) à n'importe quel temps choisi est supérieur à celui de C2/Q1 (décrue).

L'orientation de l'axe de la boucle C-Q est proche de 45° par rapport à l'horizontal, quand la largeur de C (L_c) est presque égale à celle de Q (L_Q). Si $L_c < L_Q$, l'axe de la boucle a une orientation essentiellement verticale. Cependant, si $L_c > L_Q$, l'axe devient approximativement horizontal. Cette classe est attribuée à deux causes principales à savoir Épuisement du stock des sédiments disponibles dans le bassin ou dans le cours d'eau avant le débit de pointe (Walling et Webb, 1982; Peart et Walling, 1988; Batalla et Sala, 1992) ou une réduction successive de l'effet érosif de la pluie (Wood, 1977).

- La proportion croissante de l'écoulement de base durant la décrue est également à considérer (Wood, 1977; Walling et Webb, 1982; Park, 1992),
- Formation d'obstacles avant le passage du débit de pointe (Arnborg et al, 1967).

La boucle dans le sens des aiguilles d'une montre a tendance à se produire plus au début de la saison des pluies de type torrentiel (Sidle et Campbell, 1985). Ceci est dû à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes, comparée à manque ou une diminution des sédiments emmagasinés plus tard dans la saison.

IV.6.3.1.3 Classe III

En boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre où « counterclockwise loop ». Le maximum de concentration est postérieur au maximum des débits. Les valeurs des concentrations C pendant la montée de crue sont inférieures à celle de la décrue pour des valeurs de Q1 données alors $(C/Q)_r < (C/Q)_f$. La disposition chronologique des données se présente comme une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Les boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont apparemment bien connues, à partir de la publication de Heidel (1956), cependant, peu d'exemples semblent avoir été édités pour des événements simples.

Les « counterclockwise loop » résultent de l'une des trois causes suivantes : Une des causes possible, est le temps de parcours de l'onde de crue et du flux des sédiments, particulièrement en raison de la distance entre la source de la crue et la station de jaugeage (Heidel, 1956). Les variations des débits tendent à suivre les vitesses de l'onde de crue. Cette vitesse est généralement plus rapide que la vitesse moyenne d'écoulement (Milliams G.P., 1989). Puisque les sédiments en suspension tendent à être transportés avec une vitesse proche de celle de l'écoulement moyen, le flux de sédiments se traîne derrière l'onde de crue. Aussi le temps de retard (latence) augmente avec la distance en aval (dimensions importantes d'oued Mouilah).

- Le retard du pic des sédiments à une station en aval se manifeste au niveau des écoulements dans un cours d'eau caractérisé par des irrégularités qui empêchent le mouvement des sédiments par rapport à celui de l'eau.

- La deuxième cause rapportée des boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est l'érodabilité importante du sol en même temps que de l'érosion prolongée pendant la crue (Kung et Chiang, 1977).
- La troisième cause est la variabilité de la distribution saisonnière des pluies et de la production des sédiments dans le bassin

IV.6.3.1.4 Class IV

La hystérésis en huit signifie que le rapport C / Q au cours de la branche ascendante est plus élevé que celui de la branche tombante par rapport à une série de valeurs Q et que l'inverse est vrai pour une autre gamme de valeurs Q (Williams, 1989). La forme 8 combine des parties de l'hystérésis de la classe II (boucle dans le sens des aiguilles d'une montre) et de la classe III

(Sens inverse des aiguilles d'une montre). La classe IV : au cours de la première étape, le taux d'augmentation de C est supérieur à celui de Q .

La disponibilité et le transport des sédiments post-pic sont élevés et la concentration diminue lentement avec l'augmentation du débit d'eau (deuxième étape). Les premiers et deuxièmes stades représentent le début de l'hystérésis dans le sens des aiguilles d'une montre. À la fin de la deuxième phase, le débit fluvial commence à diminuer. Dans la troisième étape, de nouvelles sources de sédiments deviennent disponibles pour le transport, et les pics C sur le membre en baisse. La quatrième étape correspond à l'appauvrissement des sédiments dans le système de canaux. La troisième et la quatrième étape produisent une hystérésis dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Une hystérésis de huit dimensions peut être considérée comme une séquence de contribution de sources de sédiments distinctes. L'hystérésis partielle initiale dans le sens des aiguilles d'une montre est causée par l'appauvrissement des sédiments dans le système de canaux ou par l'écoulement des sédiments au niveau de l'écoulement de surface. Cependant, entre la décharge faible Q_0 enregistrée au début de l'événement de fluide et $Q_{\max}$ la décharge maximale, on peut supposer que la concentration relative à la capacité de transport de la rivière augmente linéairement. Le segment de droite joignant les points $[(Q_0) ; C(Q_0)]$ et $[Q_{\max} ; C(Q_{\max})]$ peut être utilisé pour estimer les sédiments dérivés du réseau de canaux.

Le segment de droite présenté en pointillés (figure 2, classe IV (b)) est exprimé par la fonction $C_5^{IV}(tj) = f_{IV5}(Qj)$. La composante Y_{S1} est obtenue à partir de l'équation (2) avec f_{IV5} remplacer f_{II} .

IV.6.3.1.5 Classe V

En forme de huit (8) ou « figure eight ». La diffusion jugée approximativement constante, la distribution des variables indique, qu'avec d'abord un maximum des concentrations en premier, on a souvent la formation d'une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre. Toutefois, dans certaines conditions, se développe une boucle en forme de huit indépendamment des pics des variables. Les deux parties du huit sont dirigées séquentiellement dans des directions opposées. Le rapport C/Q pour différentes valeurs de Q explique l'orientation des courbes en fonction du temps sous une forme en huit pour les relations $C-Q_L$

Pour les événements hydrologiques simples, les relations en forme de huit, n'ont pas reçu beaucoup d'explication. La forme en huit de la classe V, combine des parties de la classe II (Clockwise loop) et III (counterclockwise loop). En effet, bien que les maximums des concentrations et des débits arrivent au même moment, l'augmentation de C est plus rapide que celle de QI et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre, pendant la montée de la crue. Après, le pic la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

IV.6.3.1.6 Classes V and VI single line plus one loop, clockwise (V) or anticlockwise (VI)

Une seule ligne plus une boucle, dans le sens des aiguilles d'une montre (V) ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (VI). Les relations de ligne plus une boucle combinent Classe I avec Classe II ou III. C augmente et diminue en synchronisation directe avec Q pendant les premières et dernières phases. La classe V désigne une ligne plus une boucle positive se produisant pendant le membre montant. Au cours de l'écoulement, la concentration atteint un pic avant l'évacuation de l'eau. Un autre cas survient lorsque l'on constate un mouvement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lors de la chute d'un membre de l'hydrogramme, lorsque la concentration atteint son maximum après la décharge. Un raisonnement similaire soutient la distinction entre les composantes Y_{S1} et Y_{S2} présentées pour les deux cas. Les sédiments échantillonnés pendant la première et la dernière phase sont supposés dériver du réseau de canaux et correspondent à la phase « base-charge » de l'hydrogramme, supposée dériver du réseau de canaux, classe V et classe VI. La courbe du modèle représentatif de cette étape est notée $C_1^{V \& \text{amp} 4} (t_j) = f_{v1 \& \text{amp} 4} ; Q_j$ et $C_1^{VI \& \text{amp} 4} (t_j) = f_{v11 \& \text{amp} 4} ; Q_j$ pour les classes V et VI respectivement.

Les fonctions $f_{v1 \& \text{amp} 4} ; Q_j$ et $f_{v11 \& \text{amp} 4} ; Q_j$ étendues à toutes les mesures de décharge couvrant l'événement de flot permettent d'évaluer la composante Y_s

IV.6.3.1.7 Class VII

Ligne unique plus plusieurs boucles parfois. La relation entre la concentration en sédiments et la décharge est complexe et présente une seule ligne plus plusieurs boucles se produisant soit pendant le membre montant, soit vers le membre en chute de l'hydrogramme, soit pendant les deux. Ces événements constituent la classe VII. Chaque boucle fait partie d'une hystérésis dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, caractérisée par deux étages. Comme les classes V et VI, les sédiments échantillonnés en dehors de ces stades sont considérés comme comprenant un même « étage » noté $C^{VII} (t_j) = f_{VII} (Q_j)$ et sont supposés dériver du réseau de canaux. La fonction $f_{VII} (Q)$ étendue à toute décharge de fluide permet d'estimer la composante Y_{S1} .

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $QI - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

Tableau 53 : Chronologie des crues sélectionnées

Morsott									
Date	n	a	b	R ²	R%	Q moy	C moy	Q max	C max
17-18/02/1975	10	1,078	1,289	0,91	95,4	10,4	17,6	19,1	36,2
11-14/05/1975	15	1,137	1,358	0,83	91,1	4,7	12,3	12,6	56,4
28-31/03/1977	9	0,561	3,67	0,53	72,8	5,1	9,1	12,9	13,9
13-16/04/1979	10	0,497	4,44	0,54	73,5	8,1	12,2	16,0	19,1
31/05/1991	5	0,151	16,04	0,12	34,6	13,0	31,5	33,3	67,9
29-30/09/1991	9	0,581	2,515	0,69	83,1	14,8	12,0	28,2	21,1
14-16/05/2000	10	0,833	0,58	0,35	59,2	15,3	6,7	23,6	13,7
26/05/2000	8	0,238	4,224	0,63	79,4	43,3	10,6	77,7	18,4
09/08/2002	6	0,237	25,6	0,38	61,6	14,1	44,1	40,2	67,8
El Aouinet									
30/4/74	6	0,68	3,406	0,4	63,2	2,7	7,6	8,4	16,0
10-11/09/1974	6	1,132	14,35	0,78	88,3	2,4	47,5	5,2	105,9
12/10/74	8	1,141	2,648	0,94	97,0	2,4	8,8	5,2	24,5
14au17/10/1974	12	1,134	3,083	0,82	90,6	6,3	26,8	10,4	59,4
06-7/11/1974	17	0,673	4,167	0,7	83,7	4,4	11,0	9,5	23,5
19au21/01/1975	10	0,89	1,248	0,88	93,8	3,3	3,5	5,9	6,1
17/2/75	6	0,306	5,66	0,46	67,8	61,7	19,3	100,4	42,7
21,22/04/1975	4	1,063	3,095	0,89	94,3	6,9	28,8	27,1	113,9
22au23/04/1975	5	0,352	2,646	0,85	92,2	13,7	5,7	39,0	8,0
26au28/04/1975	9	0,679	2,565	0,58	76,2	1,6	3,8	3,6	9,7
05au07/05/1975	7	0,752	1,184	0,73	85,4	2,9	3,1	5,6	8,2
22au24/05/1975	6	2,089	1,191	0,59	76,8	1,1	46,8	1,6	91,7
24/5/75	5	0,86	33,45	0,79	88,9	6,3	41,9	19,6	112,8
12au14/06/1975	5	1,043	1,256	0,79	88,9	30,8	37,2	59,1	69,1
04au5/09/1976	8	0,614	0,028	0,698	83,5	32,5	0,3	56,0	0,1
30au31/03/1977	9	0,255	1,308	0,026	16,1	17,1	4,1	26,0	6,7
14au18/04/1979	9	0,185	9,323	0,7	83,7	60,5	18,0	151,3	35,4
27au30/09/1981	6	0,823	5,45	0,68	82,5	5,3	22,5	11,7	30,8
18au21/05/1982	10	0,524	2,036	0,952	97,6	52,7	14,2	29,6	31,5
11au13/11/1982	8	0,567	3,002	0,96	98,0	30,9	18,8	42,0	26,9
El Azreg									
11-14/02/1985	6	0,46	10,74	0,67	81,9	2,8	11,5	15,2	22,8
08-9/05/1986	6	0,496	4,002	0,78	88,3	72,3	25,8	136,4	47,8
12-avr-10	6	1,099	4,584	0,93	96,4	3,1	14,5	9,6	35,0
24-26/04/2007	6	1,675	0,043	0,83	91,1	11,6	3,2	15,8	5,4
15-18/04/2010	7	0,98	2,43	0,56	74,6	3,5	8,3	10,0	12,7
03-5/04/2007	6	3,27	0,81	0,81	89,8	1,4	4,5	2,5	11,0
Ouenza									
du27au 30/09/1972	5	0,9062	1,81	0,79	79	14,91	18,82	35,18	48,1
02/10/1972	6	1,395	1,876	0,769	76,9	5,93	24,57	18,64	69,5
06-oct-72	9	0,75	0,459	0,955	95,5	208,99	24,01	390,2	50,1
11-17/12/1973	8	0,752	0,75	0,846	84,6	40,40	13,17	67,5	27,8
1-2/9/1974	11	0,776	6,717	0,943	94,3	26,16	87,85	43,02	182,7
19-22/01/1975	10	1,039	2,209	0,888	88,8	2,17	5,01	3,732	9,2
22-23/04/1975	31	0,32	4,894	0,223	22,3	152,62	26,04	649,4	42,5
24-27/09/1975	23	0,574	2,877	0,786	78,6	160,50	48,72	371	77,1

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations QI – Qs et étude du phénomène d'hystérésis

09-11/03/1976	13	0,508	6,211	0,5	50	35,19	38,98	57,8	76,9
06-09/04/1976	7	1,32	0,518	0,74	74	13,30	21,32	32,6	52,9
19-22/05/1976	18	1,088	0,629	0,892	89,2	48,87	45,19	119,6	79,3
24-25/06/1976	9	0,491	9,013	0,206	20,6	23,16	59,56	83,8	123,9
18-19/11/1976	15	0,718	1,01	0,651	65,1	210,07	48,50	279,6	101,2
29-31/03/1977	14	0,491	2,835	0,9	90	75,86	22,26	165,4	40,8
15-16/04/1979	20	0,409	4,317	0,72	72	314,72	45,14	518,52	74,0
16-17/05/1982	13	0,826	0,268	0,89	89	155,40	17,00	296,75	25,0
09-11/05/1982	18	0,436	3,908	0,66	66	131,81	30,59	291,2	46,3
09-10/10/1986	11	0,163	9,542	0,9	90	118,16	19,94	205,75	23,5
04-6/10/1988	7	0,296	17,27	0,66	66	32,21	44,44	62,64	70,6
22-oct-93	9	0,557	2,268	0,9	90	42,10	16,53	101,7	22,82
Ain Dalia									
02-sept-74	20	0,11	3,833	0,118	34,35	6,46	4,40	19,0	13,1
13-14/10/1974	4	0,102	0,6868	0,0045	6,71	0,30	1,95	0,8	7,0
14-oct-74	5	1,047	3,4373	0,55	74,16	0,28	1,34	0,6	5,0
17-févr-75	6	0,696	0,086	0,2	44,72	1,65	0,15	2,3	0,5
02-sept-75	16	1,121	2,845	0,75	86,60	0,15	0,31	0,3	0,6
20-mai-88	17	0,415	11,06	0,146	38,21	16,78	39,16	35,4	60,4
07-oct-02	8	0,626	5,83	0,89	94,34	1,50	7,23	3,1	14,3
25-sept-75	7	0,11	1,429	0,052	22,80	2,06	1,84	4,8	3,3
01-sept-79	5	0,367	4,352	0,86	92,74	2,06	4,93	3,8	9,2
18-19/04/1982	5	0,262	0,88	0,51	71,41	6,28	1,22	26,3	2,3
15-16/09/1984	10	1,082	1,485	0,69	83,07	2,99	5,20	4,6	10,1
22-avr-88	9	0,711	2,87	0,2	44,72	3,31	10,08	6,3	24,2
10-oct-02	8	0,483	11,73	0,26	50,99	1,14	13,39	2,5	26,2

IV.6.4 Application aux bassins des stations étudiées

L'application de l'approche des Hystérésis « Hystérétique curves), pour les différentes crues enregistrées au niveau des cinq sous bassins étudiés durant les périodes de données disponibles, fait ressortir la distribution (tableau 54), des différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments transportés avec les débits liquides et leur fréquence relative. La démarche de triage : on a procédé au tri les données des crues selon leur classe puis selon les saisons le (tableau 55 ci-dessous) présent la répartition saisonnière des classes.

Tableau 54. Répartition saisonnières des différentes classes

Class	Automne	Hiver	Printemps	Été	Total
C1	1	0	2	1	4
C2	19	4	27	6	56
C3	19	5	31	19	74
C4	8	7	10	8	34
C5	0	0	2	3	5
C6	0	0	2	0	2
C7	0	1	1	0	2
Total	47	16	75	39	177

Tableau 55 Fréquence des différentes classes d’évolution de la relation C-QI des crues au niveau des stations étudiées

Stations	Saisons	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	N total	
Morsott	Automne	0	0	0	1	0	0	0	1	9
	Hiver	0	0	1	0	0	0	0	1	
	Printemps	0	4	0	1	0	0	0	5	
	Eté	0	0	1	1	0	0	0	2	
Ouenza	Automne	0	8	14	3	0	0	0	25	82
	Hiver	0	1	0	3	0	0	1	5	
	Printemps	0	10	18	2	1	0	1	32	
	Eté	1	1	14	4	0	0	0	20	
El Aouinet	Automne	0	5	4	4	0	0	0	13	55
	Hiver	0	3	3	3	0	0	0	9	
	Printemps	1	8	8	7	1	0	0	25	
	Eté	0	2	2	3	1	0	0	8	
Ain Dalia	Automne	1	5	1	0	0	0	0	7	20
	Hiver	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Printemps	1	3	0	0	0	0	0	4	
	Eté	0	3	2	2	2	0	0	9	
EL Azreg	Automne	0	1	0	0	0	0	0	1	11
	Hiver	0	0	1	0	0	0	0	1	
	Printemps	0	2	5	0	0	2	0	9	
	Été	0	0	0	0	0	0	0	0	

IV.6.4.1 Oued Mellegue Amont à El Aouinet

Les courbes (Figure.53), montrent qu’à oued Mellegue amont à la station de El Aouinet, l’évolution des concentrations en fonction des débits liquides pendant les crues suit principalement quatre modèles :

1. La courbe dans le sens des aiguilles d'une montre (clockwise loop), surtout pour les crues du printemps, pourrait être associée avec un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977),
2. Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (counterclockwise loop) pendant les crues d’automne. Les crues d’automne surviennent après une saison sèche où le sol est particulièrement fragilisé et facilement érodable et où les pluies peuvent être violentes mais de courte durée. Ceci permettra soit, l’apparition du pic des concentrations avant, le pic des si l’averse est de faible intensité et de longue durée, soit l’apparition du pic des débits avant celui des concentrations si l’averse est de forte intensité et de courte durée, débits,
3. Linéaire simple plus une boucle (single line plus à loop), pour les crues généralement de fin d’automne et de printemps ou au cours de la première étape, le taux d'augmentation de **C** est supérieur à celui de **Q** la disponibilité et le transport des sédiments post-pic sont élevés et la concentration diminue lentement avec l'augmentation du débit d'eau (deuxième étape).
4. La boucle en huit pour les crues selon l’intensité et la durée de la pluie des mois de Septembre, mai et août. À noter, le cas des ’importantes crues de (29au 30 Septembre 1991, 31mai 1991, et 9 août 2002) qui sont engendrent des concentrations en sédiment de 20g/l à

CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $QI - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

plus de 50g/l avec des débits maximums de de 25m³/s à plus de 80m³/s, et qui présente une évolution de la relation C- QI entre le début et la fin de la crue.

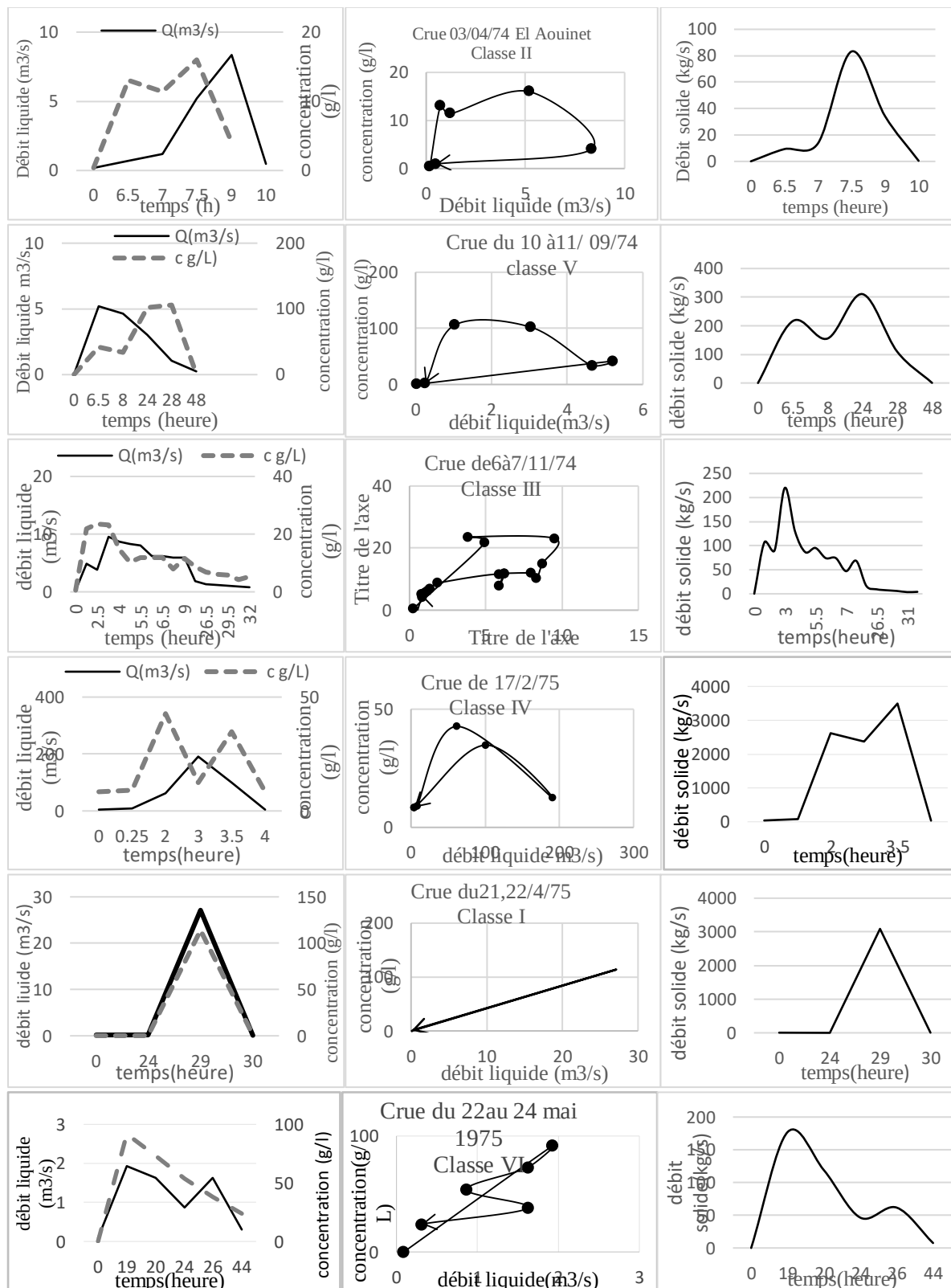


Figure 53 Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued Mellegue amont à L E LA ouinet et Classification des relations C- QI

IV.6.4.2 Oued Chabro à la station de Morsott

Deux types de modèles sont représentés par les courbes des concentrations en fonction des Débits liquides.

1. La courbe dans le sens des aiguilles d'une montre (**clockwise loop**), surtout pour les crues du printemps, pourraient être associées avec un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Paustian et Beschta 1979).
2. Dans le bassin versant de Morsott les formes en huit, se présentent souvent pendant les crues de printemps ou d'automne, saisons caractérisées par de fortes pluies tombant après une saison d'hiver bien que relativement froide mais généralement peu pluvieuse. Aussi, les sédiments accumulés dans le lit de l'oued et laissés pendant l'automne, seront mobilisés dès les premières crues du printemps pour donner au départ des pics de concentration antérieurs aux pics de débit liquide. Le phénomène s'inverse avec le temps dès l'épuisement du stock de sédiment.

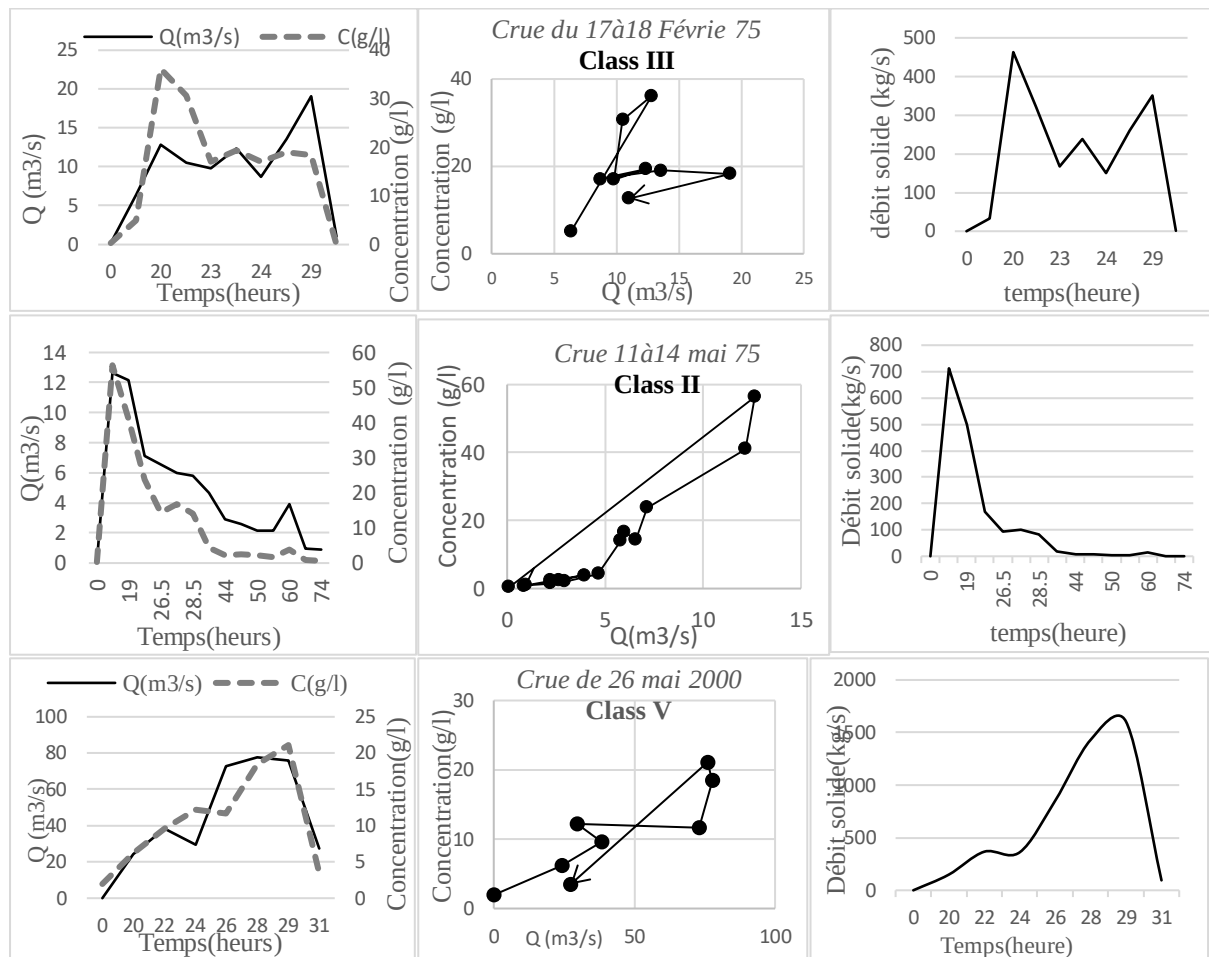


Figure 54 Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued Chébro à Morsott et Classification des relations $C - Q - I$

IV.6.4.3 Oued Mellegue aval à la station d'Ouenza

L'analyse des courbes de concentration en fonction des débits liquides (figure.56) pour L'oued Mellegue aval à l'Ouenza, montre que pour la majorité des événements enregistrés durant la période 1972/93, les courbes C-Qi présentent :

1. Plus de 36% des crues de modèle boucle dans le sens des aiguilles d'une montre « clockwise loop », se présente pour les crues survenues en automne après une saison généralement sans pluie et où le sol est dénudé et fragilisé. L'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes en sédiments en suspension.

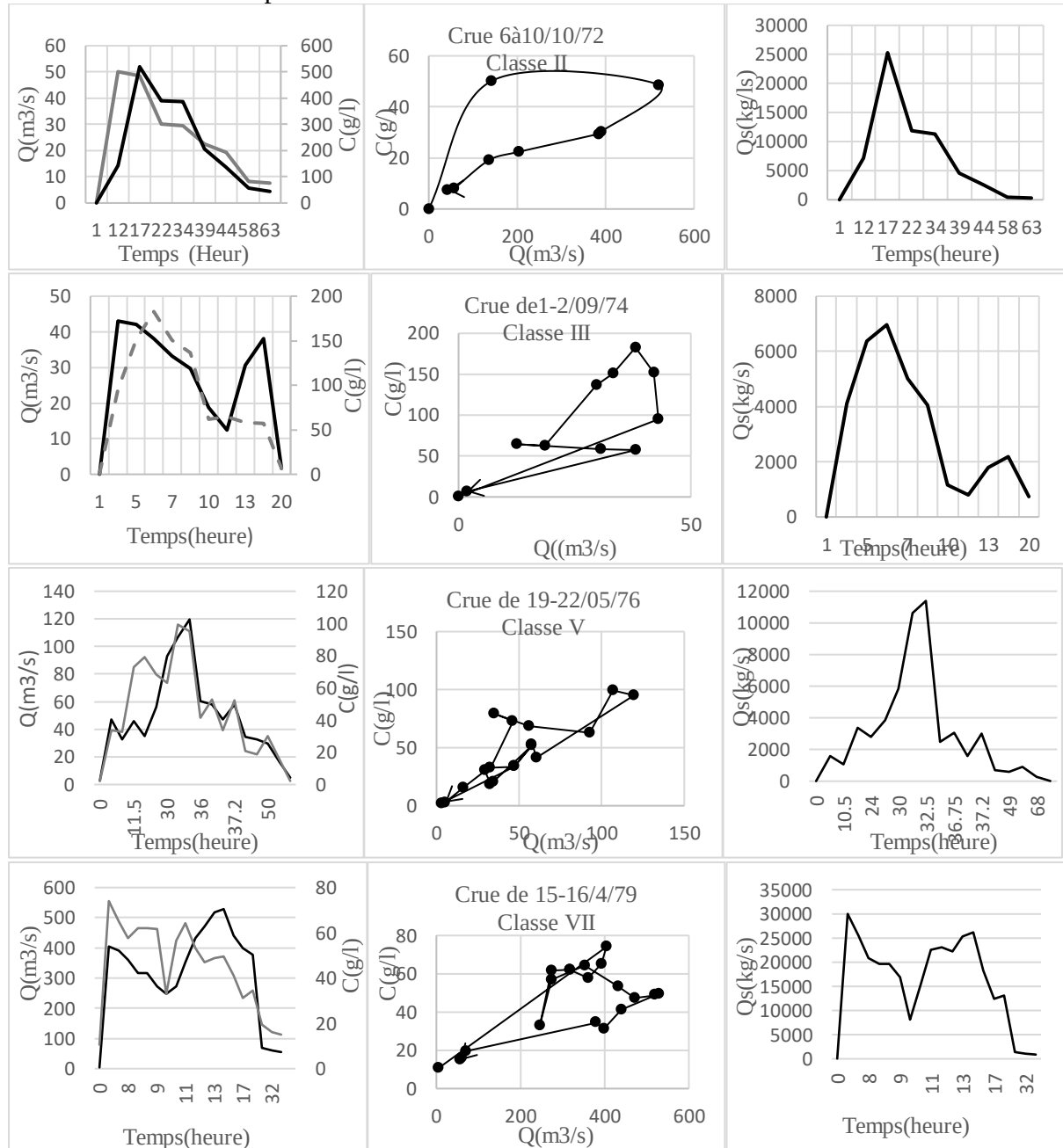


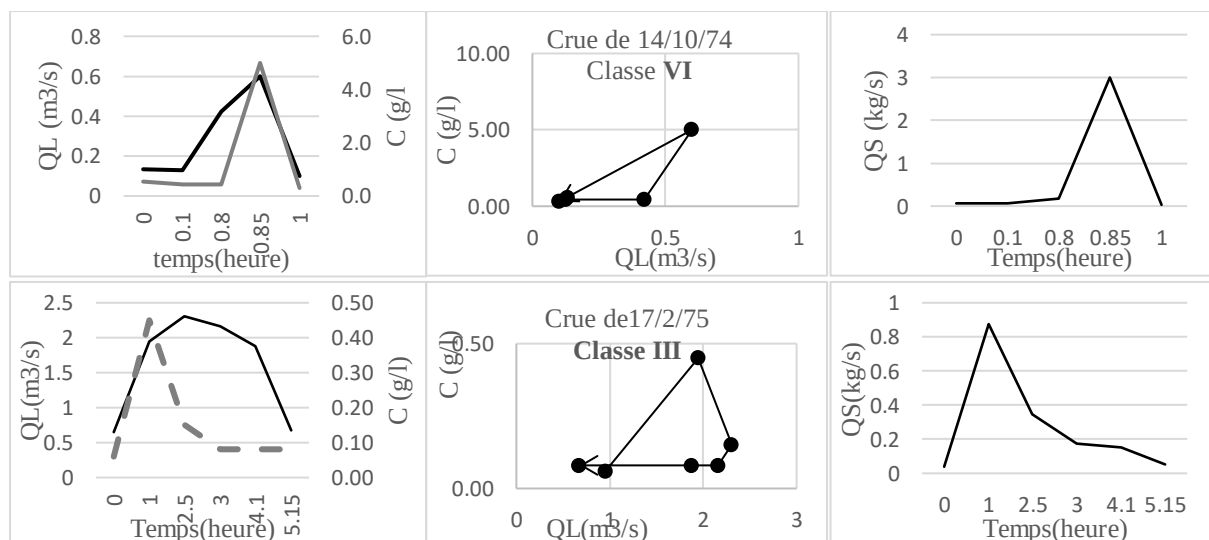
Figure 55 Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued Mellegue à Ouenza, et Classification des relations $C-QI$

2. Le modèle « counterclockwise loop » : à oued Mellegue aval les courbes en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre 56% du totale des crues sélectionnées sont caractéristiques surtout des crues d'hiver et de printemps. Le sol étant plus ou moins saturé et couvert résiste mieux à la pluie. L'érosion et le transport solide se verront légèrement retardés par rapport aux écoulements. Ainsi, ce n'est qu'après une érosion prolongée que la concentration en matières en suspension augmente.
3. Pour oued Mellegue à l'Ouenza, les formes en huit ne constituent que 15% des crues étudiés, se présentent souvent pendant les crues de printemps, saison caractérisée par de fortes pluies tombant après une saison d'hiver bien que relativement froide mais généralement peu pluvieuse. Aussi, les sédiments accumulés dans le lit de l'oued et laissés pendant l'automne, seront mobilisés dès les premières crues du printemps pour donner au départ des pics de concentration antérieurs aux pics de débit liquide. Le phénomène s'inverse avec le temps dès l'épuisement du stock de sédiment.

IV.6.4.4 Les Oueds (K'soub à El Azreg et Medjerda à Ain Dalia)

L'évolution de la relation concentration des sédiments en suspension, débit liquide pour les crues d'oued K'sob et Oued Medjerda, se présente surtout suivant le modèle boucle dans le sens des aiguilles d'une montre « clockwise loop » classe II, en général pour les crues survenues pendant les saisons de (automne, printemps et été). Cela pourrait être associé avec un apport continu de sédiments pendant les crues et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes en hiver. En effet, le transport solide à oued Medjerda est important pendant L'automne et le printemps.

D'autres modèles sont également présentés par les relations $C - QI$ en particulier ceux des classes III, pour les crues d'oued K'sob survenues au printemps, à la fin de l'automne ou même en hiver. Cela peut s'expliquer par la disponibilité des sédiments produits par des crues précédentes.



CHAPITRE IV : Estimation de TSS par les relations $QI - Qs$ et étude du phénomène d'hystérésis

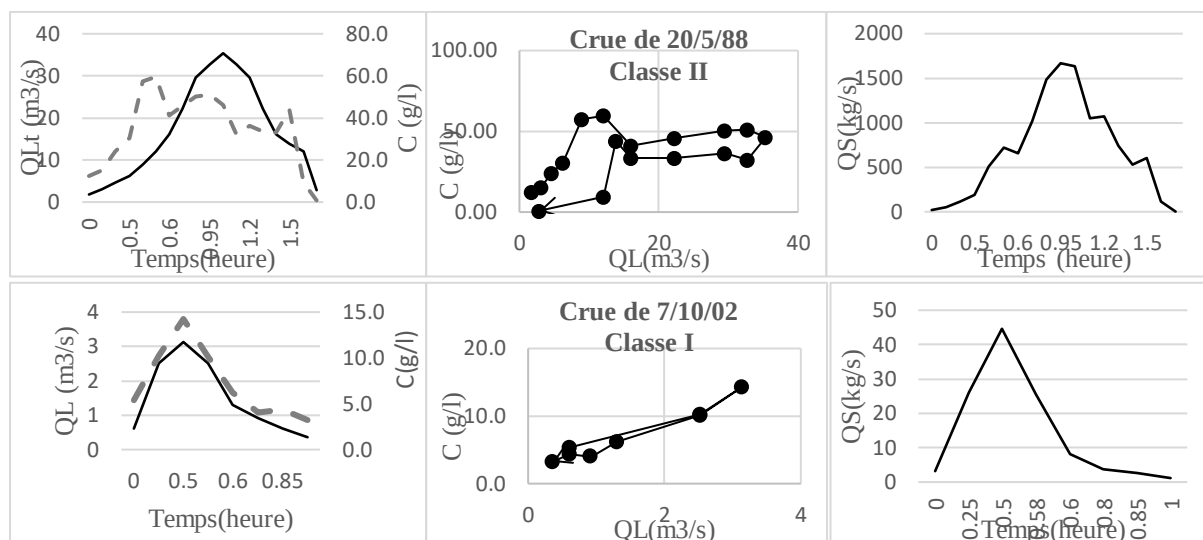


Figure 56 Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues d'oued Medjerda à Ain Dalia, et Classification des relations $C-Q_L$

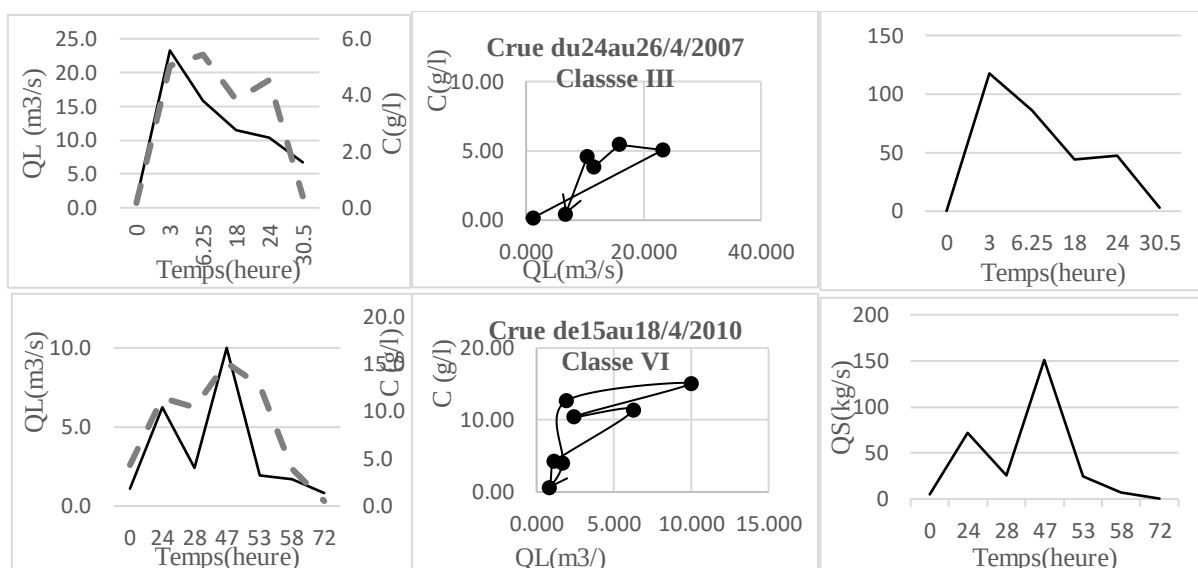


Figure 57 Évolution de la concentration des sédiments transportés et des débits en fonction du temps durant les crues de l'oued K'soub à El Azreg, et Classification des relations $C-Q_L$.

Conclusion

L'étude réalisée en zone semi-aride a montré la gravité du phénomène de l'érosion hydrique et particulièrement de l'érosion par ruissellement.

Les valeurs de T.S.S., calculées par le biais des régressions saisonnières débits liquides –débits solides par les débits liquides moyens mensuels sont faibles pour les bassins de l'oued Chabro (40 tonnes/km²/an), Mellegue aval à Ouenza (158 tonnes/km²/an), Mellegue amont à l'El Aouinet (160 tonnes/km²/an), Oued Medjerda à Ain Dalia (181 tonnes/km²/an) et oued K'sob à El Azreg (70 ton/km²/an). La valeur la plus forte est celle du bassin d'Ain Dalia (181 tonnes/km²/an). Par comparaison avec les bassins algériens étudiés, ces valeurs se situent en deçà de 500 tonnes/km²/an

Les calculs des écarts absolus et relatifs commises entre les transports solides spécifiques annuels avec les débits liquides moyens journaliers et les débits moyens mensuels ont permis de découvrir une surestimation qui varie du 144% à Morsott ,29% à l'Ouenza ,27% à El Aouinet,50% à El Azreg.

Les paramètres hydro-climatologiques contrôlent la variabilité temporelle des transports solides, alors que les caractéristiques physiques des bassins-versants (lithologie dominante, couverture végétale, systèmes de pentes) constituent les facteurs explicatifs et les facteurs de différenciation des débits solides et des apports solides entre les sous bassins de Medjerda-Mellegue. Les activités humaines ont un effet aggravant sur les phénomènes d'érosion.

Les caractéristiques morphologiques et hydrologiques des sous bassins étudiés (Medjerda-Mellegue) sont les principaux inducteurs. L'analyse de l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides durant les crues montrent, que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles de courbes (simple, dans le sens d'une aiguille d'une montre « clockwise », dans le sens contraire des aiguilles d'une montre « countr-clockwise » et forme en huit).

Le modèle contre le sens des aiguilles d'une montre est très dominant sur les bassins considérés. L'analyse de l'hystérésis par classes montre relativement l'effet saisonnier sur la forme de boucle obtenue. Les saisons de printemps et d'automne présentent une hétérogénéité de classes à cause d'une irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin et de l'étalement de la période d'été.

CHAPITRE V :

*Modélisation et cartographie des
risques d'érosion hydrique du sol par
l'application des SIG, télédétection et
directives PAP/CAR.*

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, le choix d'appliquer le modèle PAP/CAR pour étudier qualitativement l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue est basé sur les avantages de ce modèle, notamment sa faible exigence en données de mesures. Les différents travaux d'application du modèle PAP/CAR au Maroc et en Tunisie encouragent l'utilisation du modèle PAP/CAR). La deuxième raison est le fait que l'érosion hydrique dans ce bassin a été étudiée en appliquant l'analyse multicritère basée sur la ration de compétence et les régressions (Sédiment Rating Curve) proposé par Belloula M, (2017), mais le modèle le PAP/CAR n'a pas été appliqué au bassin versant de Medjerda.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier le degré de sensibilité des terrains à l'érosion hydrique dans le bassin de Medjerda-Mellegue en se basant sur la cartographie à l'aide de la télédétection et du SIG, et en adoptant le modèle PAP/CAR qui porte sur la superposition et l'analyse des facteurs causaux de l'érosion hydrique, tels que la pente, la nature des matériaux et le couvert végétal (Ousmana et al, 2017). La méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire/ Centre d'Activités Régionales) est un ensemble de directives pour la formulation d'un programme de lutte antiérosive.

Dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Ben Rhouma. Et al, 2018). La Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique par les directives PAP/CAR est présentée selon l'organigramme suivant.

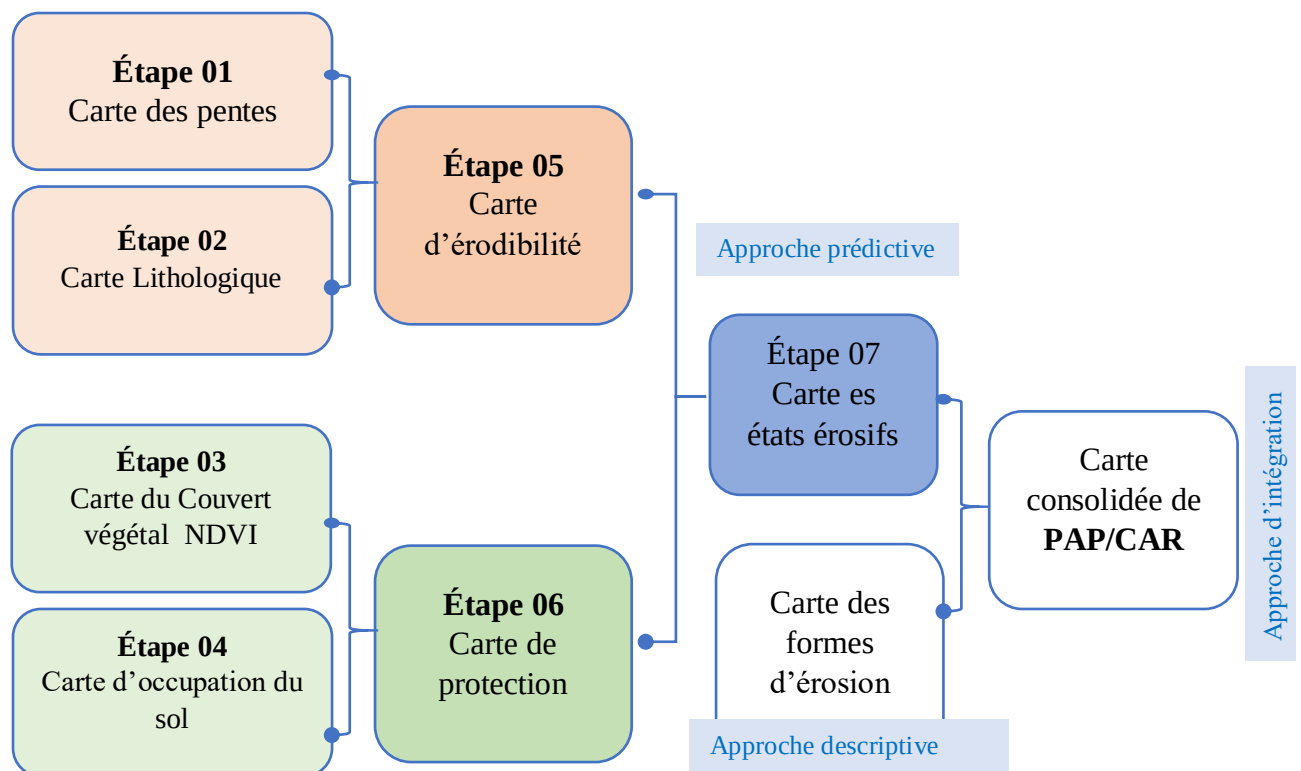


Figure 58 : Schéma méthodologique de l'approche PAP/CAR
(Source : PAP/CAR Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes, 1998)

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

V.2 Approche Méthodologique et Matériel Utilisé

La méthode PAP /CAR a été adoptée en 1988 par le Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAP/CAR) du Plan d'action pour la Méditerranée _PNUE, en collaboration avec la Direction générale de la conservation de la nature (DGCONA) du ministère espagnol de l'Environnement et la Division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Il faut noter aussi que la méthode PAP/CAR a été précédée par une action prioritaire intitulée "Promotion de la protection des sols en tant que composante essentielle de la protection de l'environnement dans les zones côtières méditerranéennes" entrepris par les mêmes coopérants. L'approche méthodologique repose sur 3 phases bien définies réparties en neuf étapes:

- **La phase prédictive** : qui se fait en 7 étapes qui aboutissent à 7 cartes thématiques.
- **La Phase Descriptive** : L'approche descriptive se fait en une seule étape.
- **La Phase d'intégration et de Consolidation** : La phase d'intégration est la neuvième étape de la procédure PAP/CAR.

Dans notre étude nous avons appliqué la phase prédictive car la phase descriptive se base sur la cartographie de l'érosion réelle qui exige des connaissances approfondies en géomorphologie et un travail de terrain avec des photos aériennes. La phase d'intégration consiste à intégrer les résultats des huit étapes précédentes obtenus dans les deux premières phases (prédictive et descriptive).

V.2.1 La phase prédictive

Le résultat escompté de cette phase est la réalisation de la carte des états érosifs obtenus par la superposition des cartes de plusieurs facteurs. Chaque facteur contribue par un certain degré aux différents états érosifs. L'objectif de cette phase est le traitement des cartes des facteurs d'érosion en trois étapes :

- ✓ **Étape 1 : Élaboration de la carte d'érodibilité par superposition de la carte des pentes et la carte de friabilité des affleurements rocheux**

L'érodibilité d'un sol exprime le potentiel d'un affleurement rocheux à fournir des éléments à l'érosion. On doit donc tenir compte de la friabilité d'un substrat et de l'importance de la pente.

A. La carte des pentes

La carte des pentes est élaborée à partir du MNT SRTM (résolution de 30 m) de cette région, et classifiée selon les directives du PAP/CAR selon le tableau suivant :

Tableau 56 : Classes de pentes selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Code PAP/CAR	Classes
1	Nulle à faible (0-3%)
2	Modérée (3%-12%)
3	Abrupte (12%-20%)
4	Très abrupte (20%-35%)
5	Extrême (>35%)

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

L'application de cette légende a permis d'élaborer la carte des pentes du bassin de **Medjerda-Mellegue** (Figure 59).

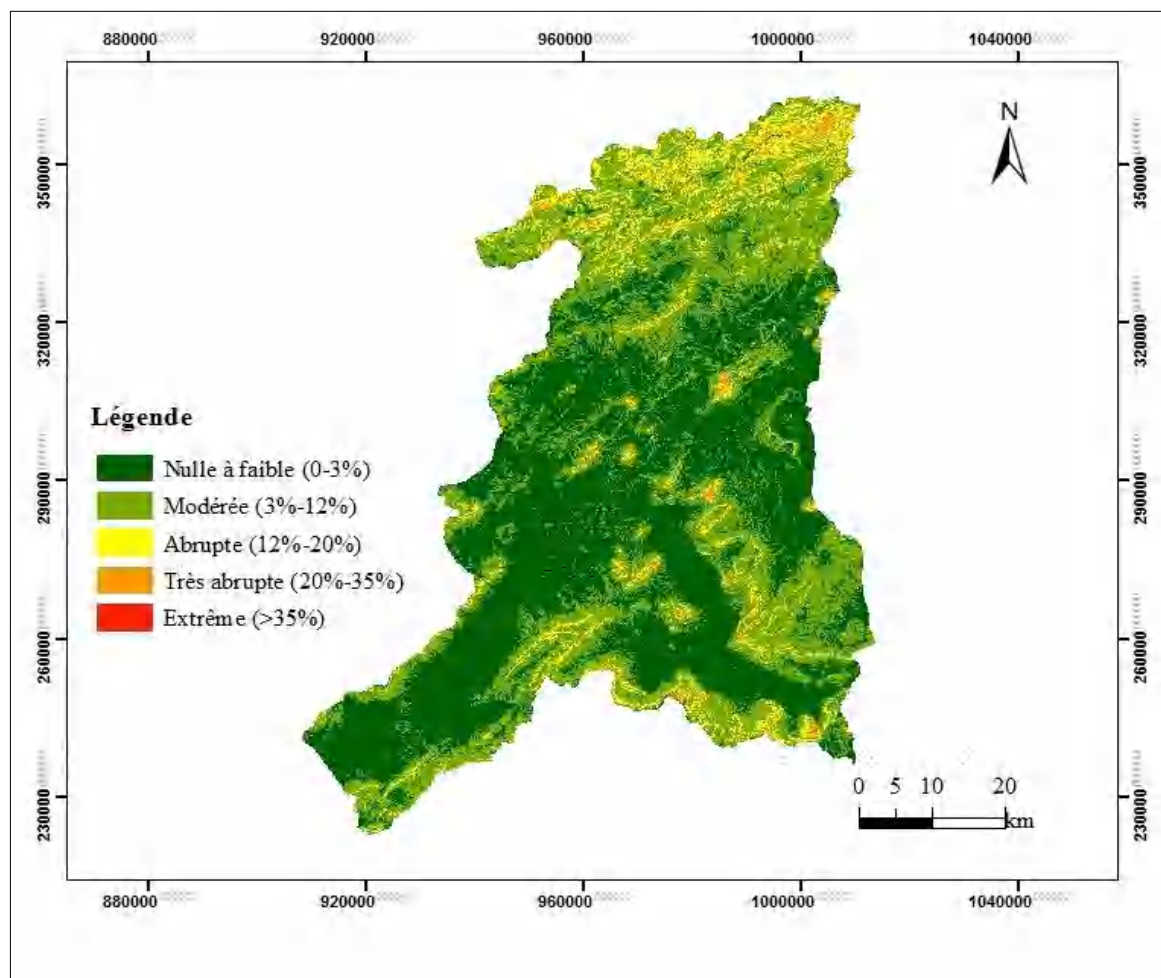


Figure 59 : Carte des classes des pentes du bassin de la **Medjerda-Mellegue** selon le modèle **PAP/CAR**

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

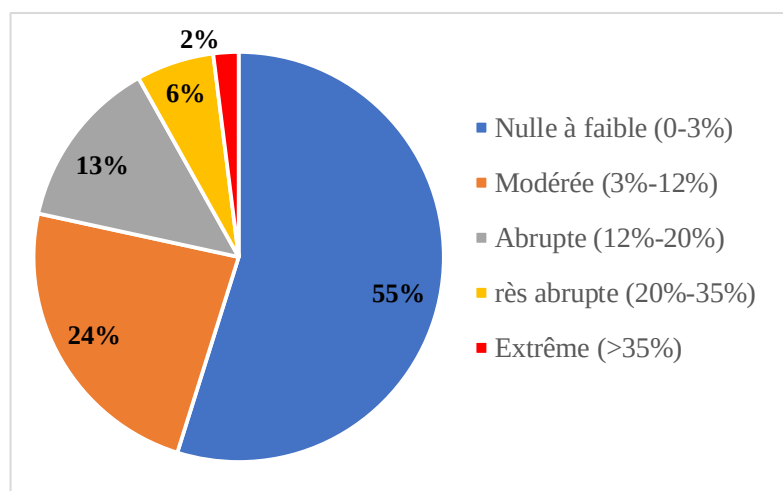


Figure 60 : Répartition des classes des pentes dans le bassin versant **Medjerda-Mellegue** selon le modèle **PAP/CAR**

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

La figure 60 montre que le bassin versant de l'Oued Medjerda-Mellegue est caractérisé par une prédominance des pentes nulle à faible (4300 km²) et modérée (1850 km²) qui représentent respectivement 55 % et 24 % de la superficie globale du bassin. La classe des pentes abruptes (12 %-20%) est également moins importante avec 480 km² soit 13 % de la superficie totale. La classe des pentes très abrupte (20 à 35 %) s'étale sur une superficie de 480 km² soit 6% de la zone d'étude, et les 2% restant représentent les zones à pente extrêmes (>3 %) qui occupent une superficie de 155 km².

B. La carte de friabilité

La carte des litho-faciès identifie les différents types de roches ou de sédiments/sols de surface en fonction de leur degré de résistance mécanique et classés selon le degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion (Ben Rhouma et al,2018). La démarche est basée sur le géo-référencement de la carte des friabilités établie par l'institut national de cartographie et de télédétection suivie par la digitalisation des différents types de roche qui couvrent la zone d'étude.

La carte établie (Figure 61) montre les différents types de roches ou de sédiments/sols de surface, et renseigne sur le degré d'érodibilité des formations géologiques classées selon leur degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion du sol. Les différents affleurements sont répartis en 5 classes (tableau 57).

La (figure 62) montre la répartition des terrains, codées en fonction de leur degré de friabilité et de leur résistance mécanique répartis en 5 classes imposées par le modèle PAP/CAR allant de (roches compactées non altérées, roches modérément altérées, roches faiblement compactées, roches peu résistantes, et roche meubles. Cette carte montre la répartition des terrains en fonction de leurs degrés de friabilité. Les différents affleurements sont répartis en 5 classes et on affecte un code à chaque degré de friabilité, 1 pour les roches dures et progressivement 2, 3, 4 et 5 pour les roches de moins en moins dures. Le tableau suivant résume l'ordre de friabilité des substrats :

Tableau 57 : Classes de Litho-faciès selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Classes de Litho-faciès	Type de matériel
1	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, affleurement degrés de calcaire ou des roches ignée ou éruptives
2	Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés.
3	Roches sédimentaires ou sols faiblement ou modérément compactés (marne, marno-calcaire).
4	Roches peu résistantes et fortement altérées (Gypse, schistes, encroûtement tufeux, molasses...).
5	Sédiments ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique.

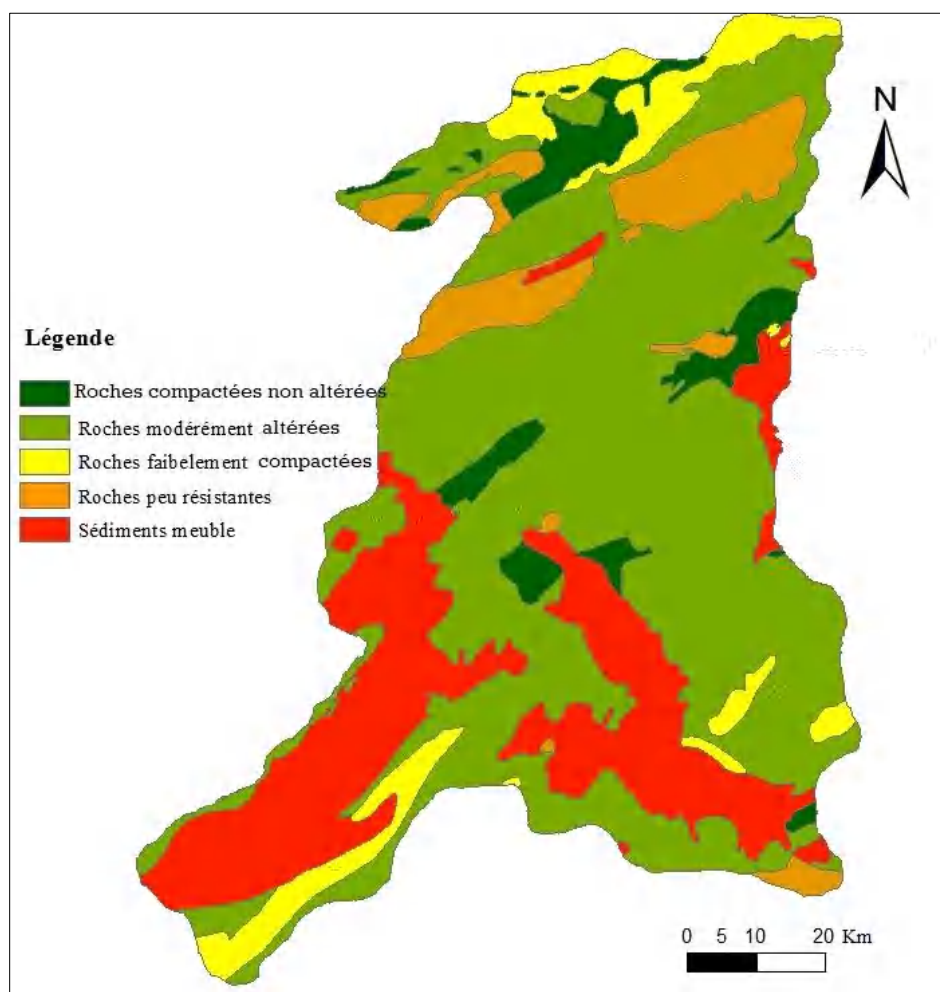


Figure 61 : Carte des classes des litho-faciès du bassin versant de la *Medjerda-Mellegue* selon le modèle **PAP/CAR**

Source : La carte est réalisée par kheniche, Soufyane2022 à l'aide de logiciel ArcGis, par la digitalisation sur la carte géologique de l'Algérie.

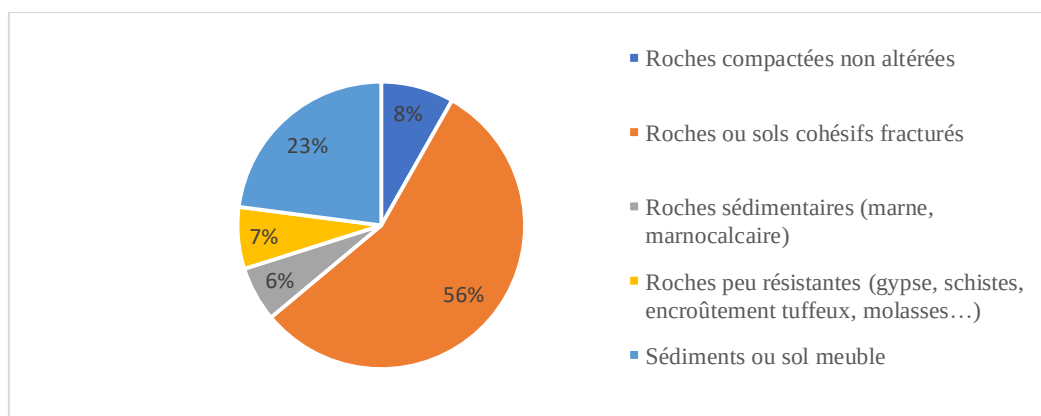


Figure 62 : Répartition des classes des litho-faciès du bassin versant de la *Medjerda-Mellegue*.

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

La répartition spatiale représentée par la figure 62, il ressort que les roches modérément altérées (2) occupent plus de la moitié du bassin-versant, s'étendent sur une superficie de 4369, km² représentant 56 % de la superficie totale du bassin versant. Les sédiments ou sol meuble (5) occupent 1799km² soit 23 % de la superficie totale du bassin et se localisent dans le Sud et Sud Est au niveau des lits majeurs des oueds Mellegue et Chébro. Ensuite, les roches sédimentaires et les roches à faible résistance (3 et 4) occupent ensemble une superficie de 1029.7km² représentant 13 % de la superficie totale. Les roches très résistantes (1) n'occupent que 8 % de la superficie totale s'étalent sur une superficie de 643.3km.

C. La carte d'érodibilité

L'érodibilité d'un sol exprime la sensibilité du sol à l'érosion hydrique en fonction de sa composition, sa structure et sa texture. L'érodibilité est également définie à partir de la carte des litho-faciès en fonction de la nature des roches et de leur résistance à l'érosion. La carte d'érodibilité est réalisée à partir de la superposition de la carte des pentes et de celle des friabilités selon la matrice d'érodibilité des sols du modèle PAP/CAR (Oussmana.H,2017).

La carte d'érodibilité est le résultat de la superposition de la carte de litho-faciès et de la carte des pentes, selon la matrice suivante :

Tableau 58 : Matrice d'érodibilité des sols selon le modèle PAP/CAR
(Directives PAP/ CAR, 1998).

Classe des pentes	Classes de litho-faciès				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	3	3
3	2	2	3	4	4
4	3	3	4	5	5
5	4	4	5	5	5

Les polygones résultant du produit croisé des deux tables (classe des pentes et celle des litho-faciès) sont classés selon les directives du modèle PAP/CAR pour hiérarchiser le terrain en fonction du degré d'érodibilité selon le tableau suivant:

Tableau 59 : Degrés d'érodibilité é selon le modèle PAP/CAR
(Directives PAP/ CAR, 1998).

Classe	Degrés d'érodibilité
1	Faible
2	Modéré
3	Moyen
4	Fort
5	Extrême

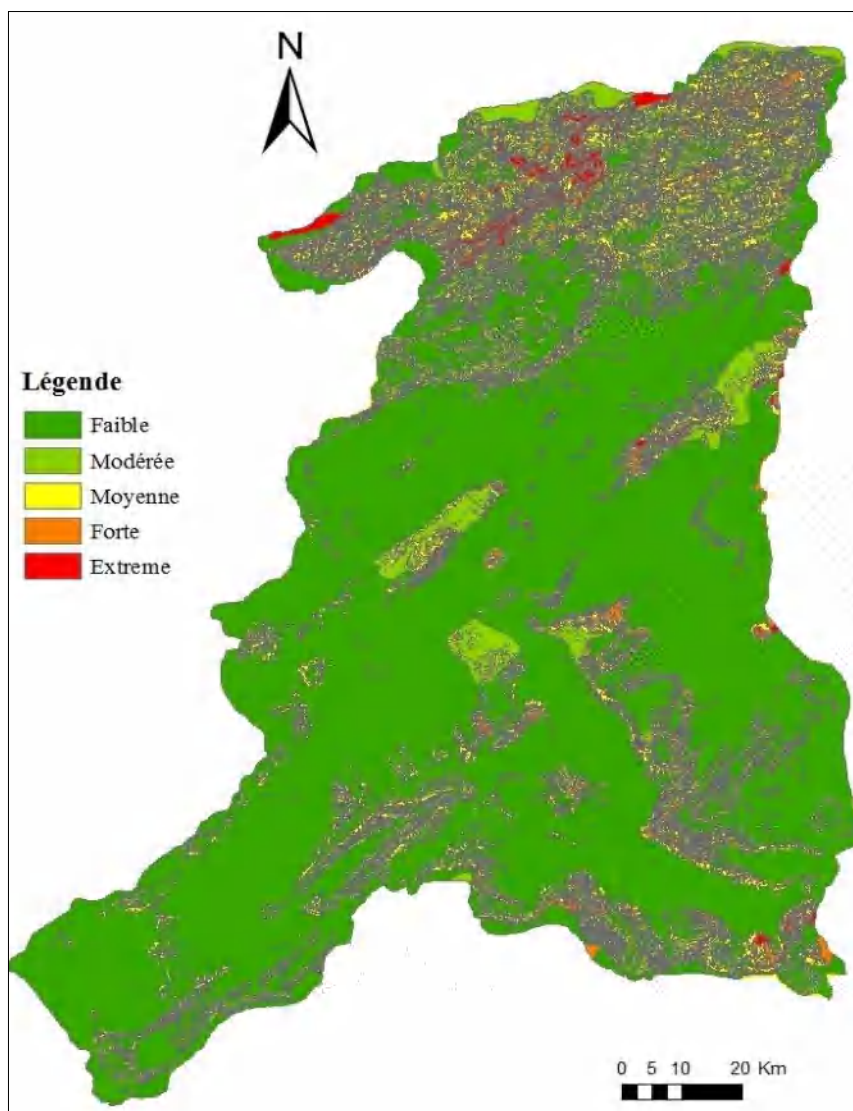


Figure 63 : Carte des classes d'érodibilité des matériaux du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR.

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

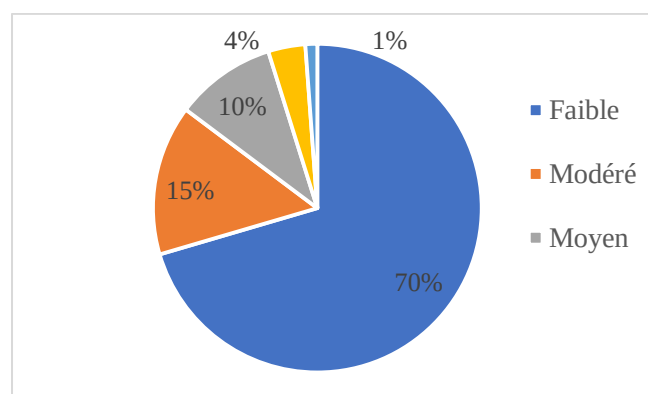


Figure 64 : Répartition des classes d'érodibilité du bassin de la Medjerda-Mellegue.

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

D'après la carte d'érodibilité (Fig.63), on constate que 70 % de la superficie du bassin versant de l'Oued Medjerda-Mellegue sont caractérisés par une érodibilité faible relative à des zones où les matériaux sont modérément altérés 5520Km², suivis par des sols à érodibilité modéré qui occupent 1160km² (15 %) de la superficie totale du bassin versant. La classe d'érodibilité moyenne s'étend sur une superficie de 778 km² et couvre 10 % de la superficie totale du bassin versant. Les classes d'érodibilité forte à Extrême s'étendent sur une superficie de 378.3 km² et affectent que 5 % de la superficie totale.

✓ Étape 2 : Réalisation de la carte de protection des sols par superposition de la carte d'occupation du sol et du degré de recouvrement végétal (NDVI).

A. La carte de degré de couvert végétal

Le couvert végétal joue un rôle important dans le maintien de la résistance des sols, il permet une bonne conservation du sol et de l'eau. La carte de densité de recouvrement du bassin versant d'Oued Medjerda-Mellegue a été réalisée à partir de la combinaison des l'images satellitaires LAndSAT8 novembre 2021 avec une résolution de 30 m. Cet indice se calcule par la différence entre la réflectance du rouge (R) et du proche infrarouge (PIR), sa formule est donnée par l'expression suivante:

$$NDVI = \frac{pir - rouge}{pir + rouge}$$

NDVI : abréviation en anglais (indice de végétation normalisé)

Pir : proche infrarouge

Les directives du **PAP/CAR** proposent quatre classes pour classifier le degré du couvert végétal. À chaque classe est assignée une valeur entre **1** et **4** selon le tableau suivant :

Tableau 60: Classes du degré de couvert végétal selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Classes	Degré de couvert végétal
1	Inférieur à 25 %
2	25%-50%
3	50%-75%
4	Supérieur à 75%

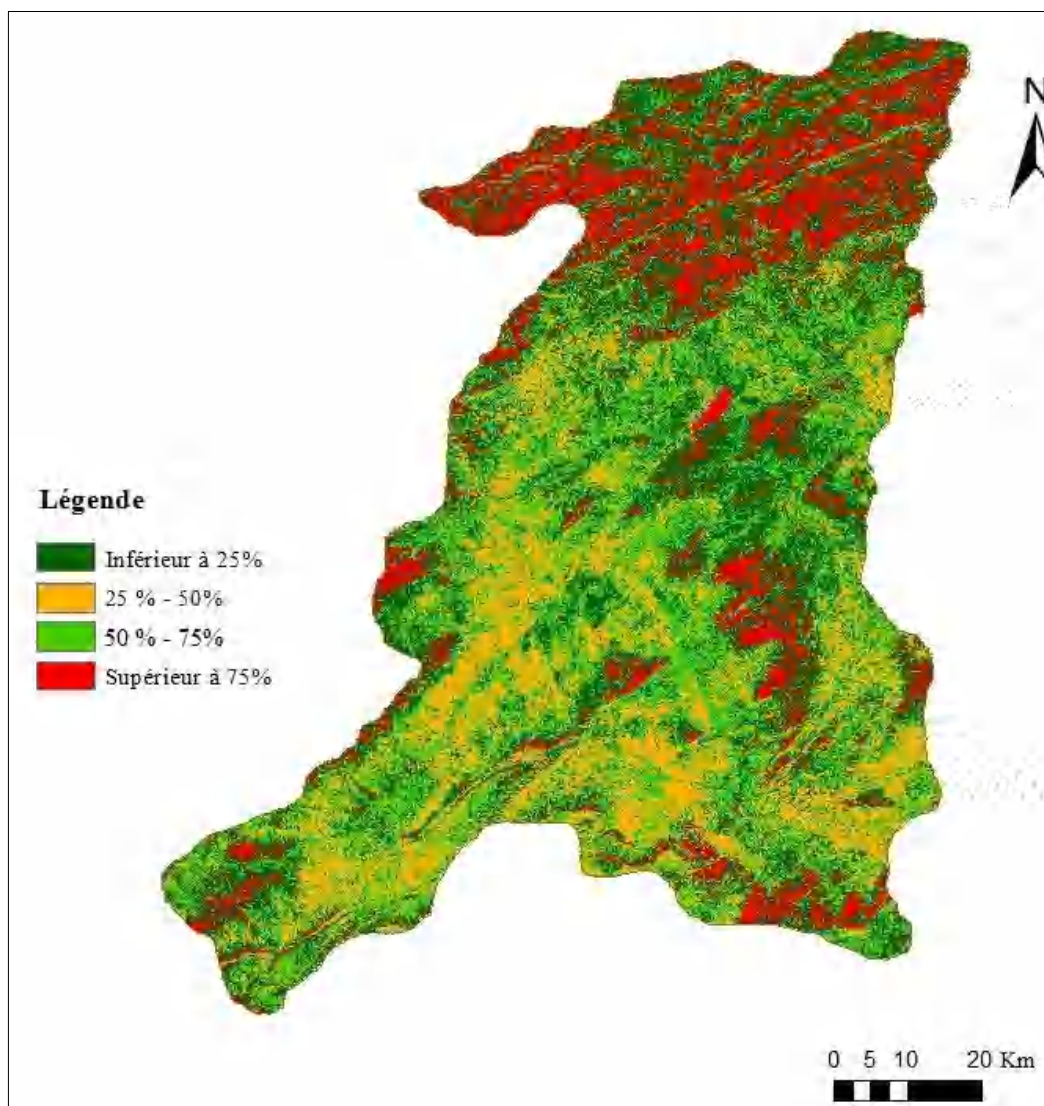


Figure 65 : Carte des classes de degré de couvert végétal du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, basé sur MNT, résolution 30 mètres, projection (WGS84 /zone 32)

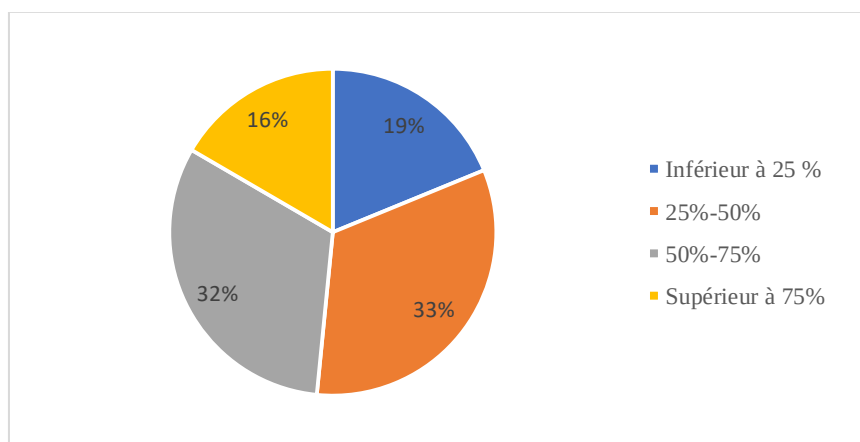


Figure 66 : Répartition des classes de couvert végétal du bassin de l'oued Medjerda-Mellegue

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

La carte de l'indice de végétation (NDVI) du bassin de l'oued Medjerda-Mellegue (Fig.65), montre que le bassin versant Medjerda-Mellegue est caractérisé par une densité moyenne de couvert végétal car les deux classes 2 et 3 occupent 65% de la surface totale du bassin-versant. La pauvreté du recouvrement végétal dont souffre ce bassin versant, puisque plus de 19 % des terres ont un recouvrement inférieur à 25%, qui correspond aux zones de jachère, sol nu et des terrains agricoles.

La surface qui reste concerne la classe de végétation (>75%), s'étend sur une faible superficie de 1475 km² (16 %). Cette classe correspond aux zones de forêts où la végétation est très dense.

B. La carte d'occupation des sols

L'occupation des sols ou la couverture des sols décrit la couverture biophysique de la surface des terres émergées (Bouزيد, T,2010). Elle distingue plusieurs catégories biophysiques: zones humides, plans d'eau (ruisseaux), sols nus (même si la couverture est insuffisante), zones de végétation (arbres, arbustes, champs, prairies), surfaces dures (rochers, bâtiments) et zones inondables, afin de mieux cibler les zones susceptibles d'être aménagées (Mohammed, T.2018). La carte d'occupation du sol pour le cas du bassin versant d'Oued Medjerda-Mellegue est établie à partir d'une classification supervisée de l'image satellitaire Land SAT 8(résolution de 30 m), sur les bandes (LC08_L1TP_193036_20211120) ;(LC08_L1TP_193035_20211120) ;(LC08_L1TP_192035_20211113) ; (LC08_L1TP_192036_20211113).

Le croisement entre les informations acquises lors des prospections du terrain et les résultats issus de l'interprétation visuelle de l'image satellitaire a permis de réaliser une carte d'occupation du sol classifiée selon les directives du modèle PAP/CAR.

Tableau 61 : Classe d'occupation du sol selon le modèle PAP/CAR (PAP/ CAR, 1998)

Classes	Occupation de sol
1	Cultures en sec ou terrain nu
2	Arboriculture et reboisement
3	Cultures intensives de proximité d'habitat ion
4	Forêt naturelle
5	Matorral à couvert dense
6	Matorral a couvert clair

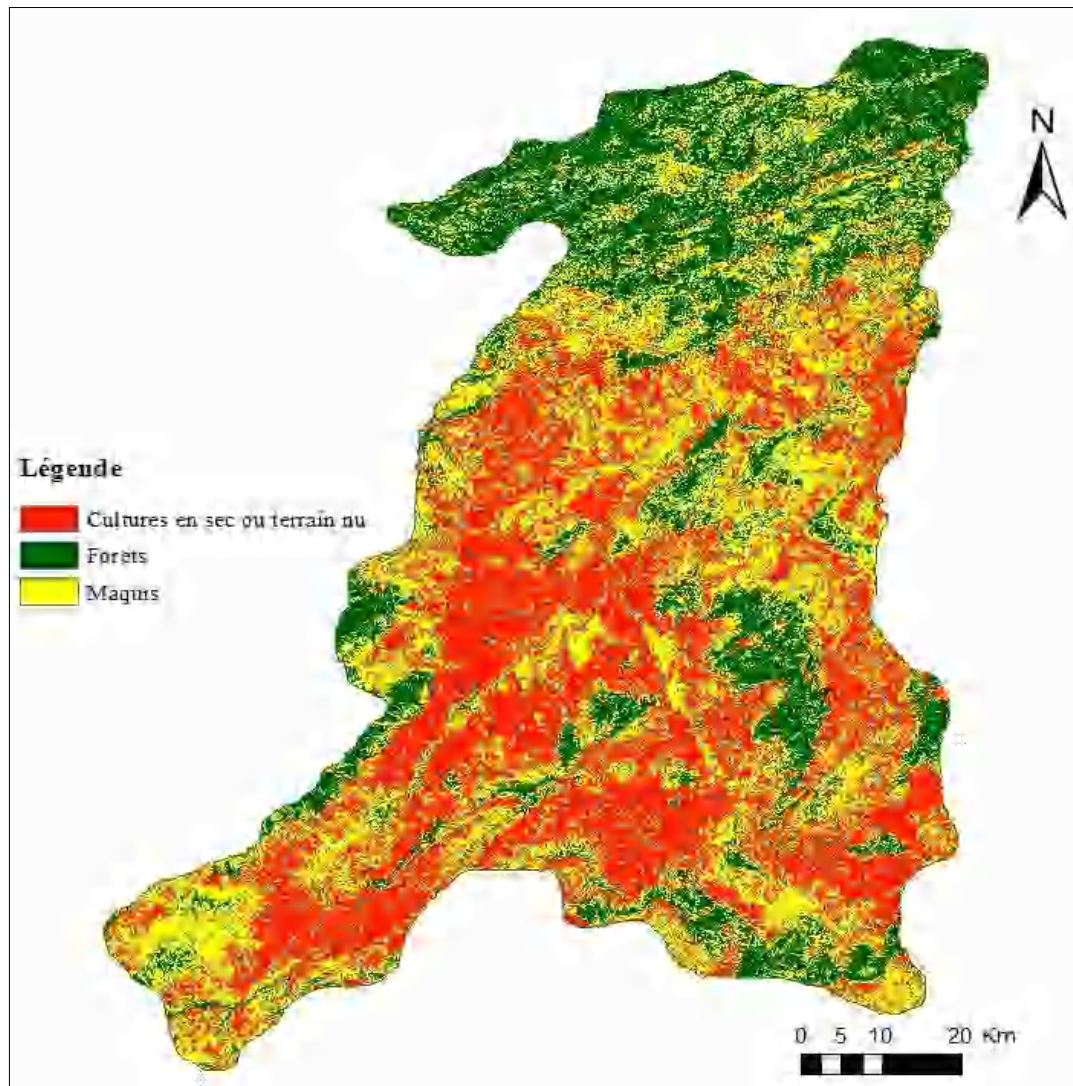


Figure 67 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le Modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, à partir d'une classification supervisée de l'image satellitaire Land SAT 8

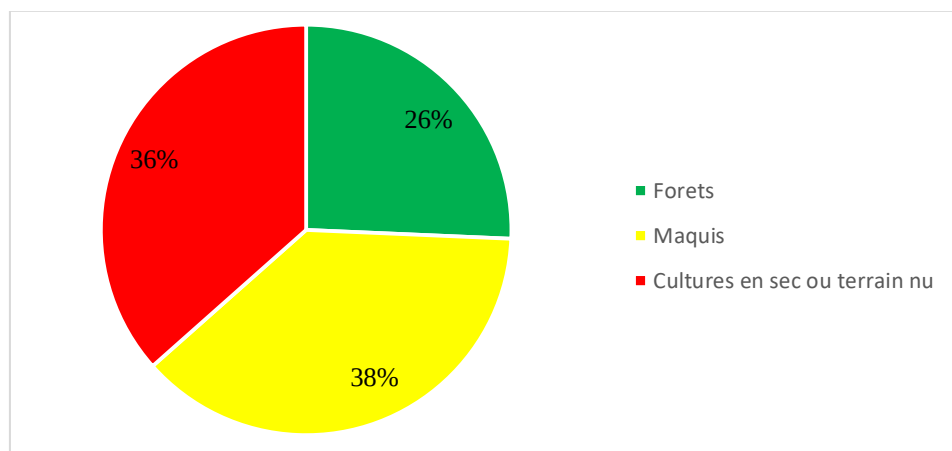


Figure 68 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin l'oued Medjerda-Mellegue.

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

Selon la carte des unités d'occupation du sol (figure 67) et le tableau 61, les zones protégées qui ont une couverture végétale plus ou moins dense et permanente, sont représentées particulièrement par les forêts de de Pin d'Alep, Chêne-liège et Chêne zen avec une superficie de 2014 km² soit 26 % de la surface totale de la zone d'étude, et se localisent généralement au Nord du bassin versant. La majorité de la superficie de la zone d'étude est recouverte par des maquis qui s'étalent sur une superficie de 2961 km², soit 38 % de la superficie totale du bassin versant où la pente est assez élevée. Les zones de terres agricoles, jachère et sols nus qui se trouvent au Sud, au Nord-ouest et aussi au Sud-est du bassin versant sont les plus faiblement protégées contre l'érosion du sol occupent 37% de la surface du bassin versant.

C. La carte de protection des sols

La carte de protection des sols est réalisée par la superposition de la carte de l'occupation du sol et du degré de couvert végétal. Les polygones résultant de la superposition de ces 2 cartes différentes sont classés selon la matrice du tableau suivant :

La première colonne contient les codes de recouvrement végétale en fonction de l'intersection colonnes ligne on obtient les numéros de code qui sera affecté à la carte de protection des sols

Tableau 62 : Matrice de protection des sols selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Occupation Du sol	Degré de recouvrement végétal			
	1	2	3	4
1	5	5	4	4
2	5	5	4	3
3	3	2	1	1
4	4	3	2	1
5	5	4	3	2
6	5	4	3	2

Les différentes classes de la protection des sols selon les directives du PAP/CAR sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 63 : Classes du degré de protection des sols selon PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Classes	Degrés de protection des sols
1	Très élevé
2	Élevé
3	Notable
4	Faible
5	Très faible

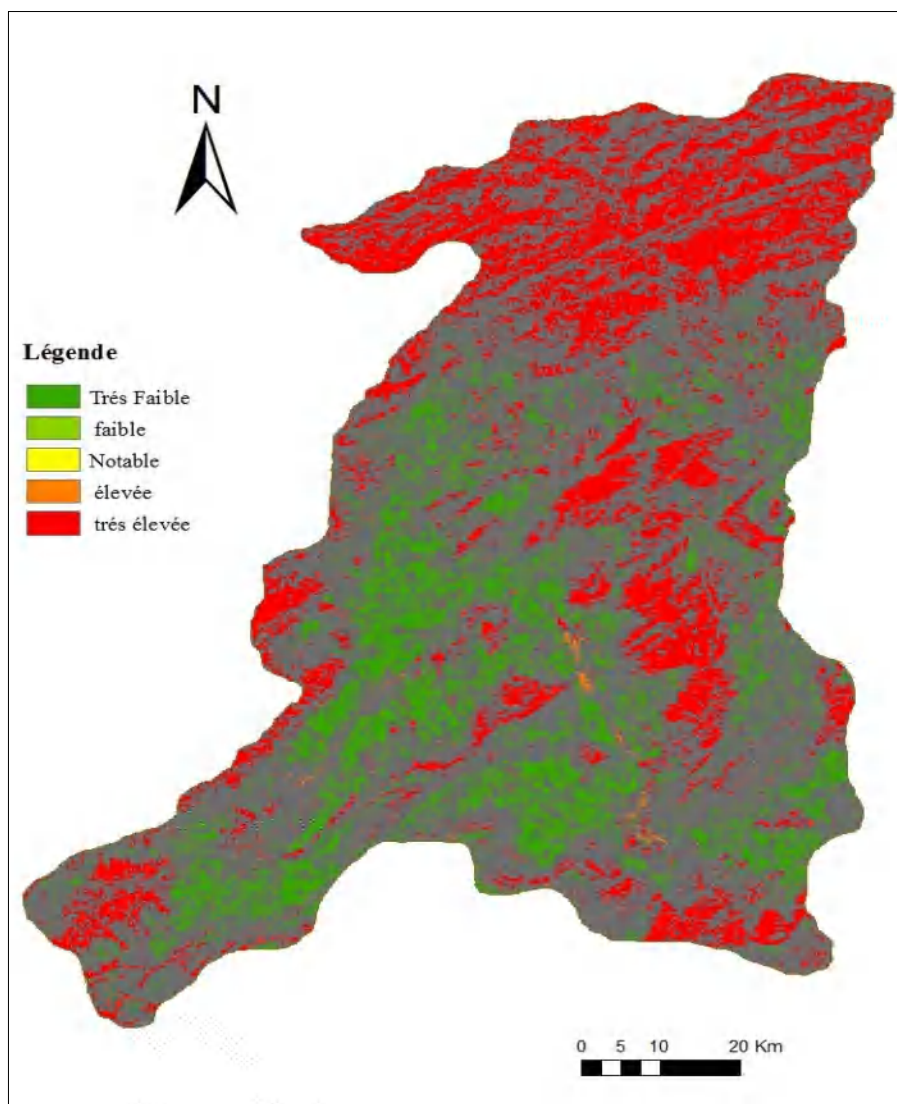


Figure 69 : Carte de protection des sols du bassin versant de l'oued Medjerda-Mellegue selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis

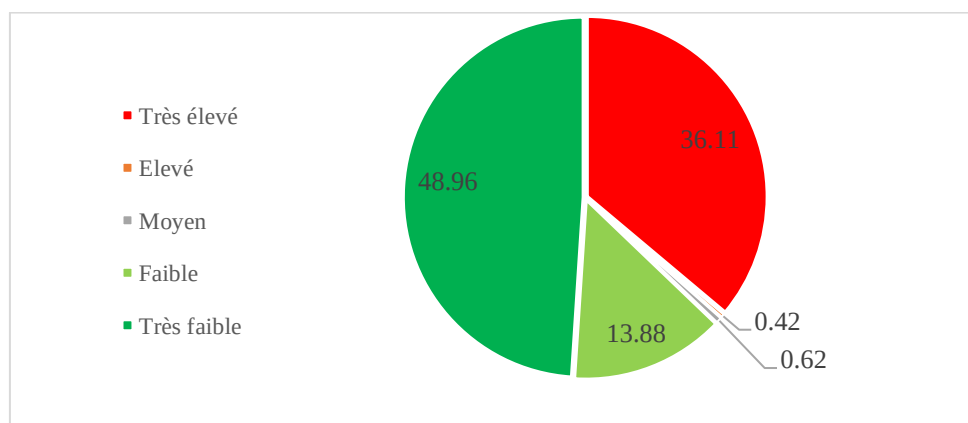


Figure 70 : Répartition des classes des degrés de protection des sols dans le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue.

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

La carte des classes de protection du sol (Fig.69) montre que les zones à protection des sols très faible couvrent la plus grande partie du bassin versant soit 48.96 % de la superficie totale, et se trouvent au Nord-est, au Nord-ouest et en aval du bassin versant, au niveau des zones qui sont occupées par des sols nus, des terres agricoles, de la jachère et une pente faible (<12%). La classe de protection très élevée occupe 2832 km² soit 36.11 % de la superficie totale, les deux classes qui offrent la protection moyenne et élevée occupent ensemble une très faible surface, 01% de la superficie total du bassin. La partie qui reste concerne la classe de faible protection, occupe 1088.5 km² soit 13.88 % de la superficie totale du bassin versant. Ceci s'explique par une couverture végétale faible.

Donc le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue du point de vue, le sol est mal protégé. 63 % de la surface du bassin est recouverte par les classes à faible et très faible protection du sol. La classe protection très élevée occupe 36 % de la surface du bassin. On peut dire que plus la région est agricole (dominance du couvert végétale de faible densité) le sol est moins protégé présence d'érosion même si la pente est faible.

✓ Étape 03 Réalisation de la carte des états érosifs

La carte des états érosifs (Figure 71) est le produit final de la phase prédictive, et résulte de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte de degrés de protection des sols. Les polygones résultant sont classés selon la matrice du tableau suivant :

Tableau 64 : Matrice des états érosifs des sols selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Degré de Protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	3	4
3	1	2	3	4	4
4	2	3	3	5	5
5	2	3	4	5	5

Les polygones obtenus sont classifiés par PAP/CAR selon le tableau suivant :

Tableau 65 : Classes des états érosifs selon le modèle PAP/CAR (PAP/CAR, 1998)

Classes	Degrés des états érosifs
1	Très faible
2	Faible
3	Notable
4	Élevé
5	Très élevé

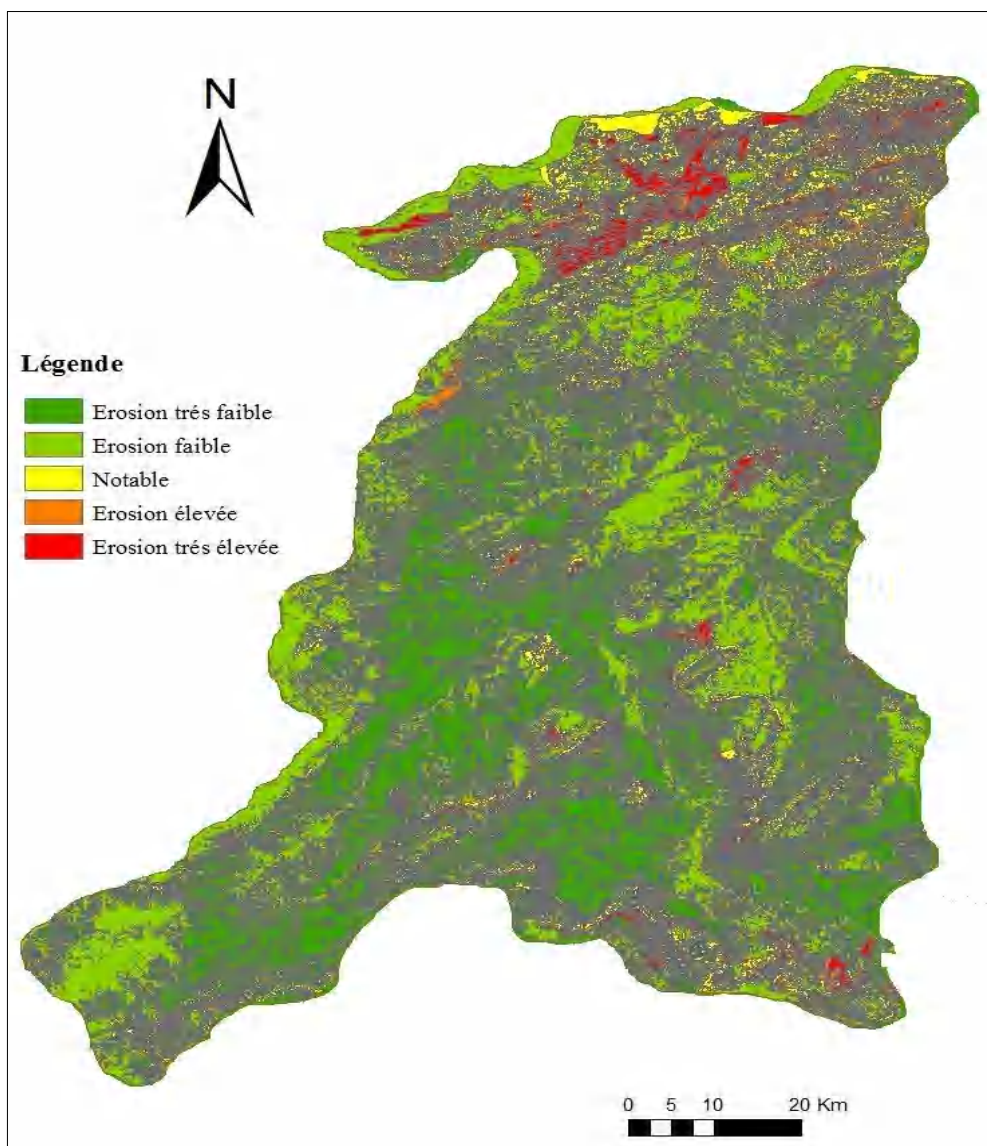


Figure 71 : Carte des états érosifs du bassin versant de l'oued Medjerda -Mellegue selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis

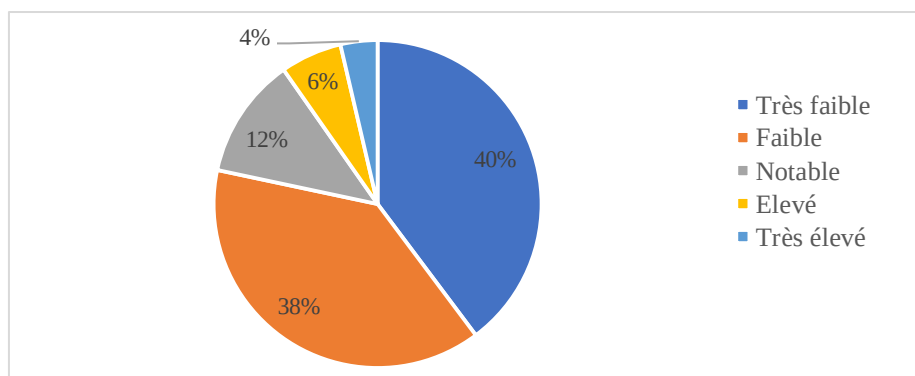


Figure 72 : Pourcentage des degrés de protection des sols dans le bassin de l'oued Medjerda-Mellegue.

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

À partir du tableau 65 et de la figure 71, il ressort que la classe de l'érosion très élevée avec 300 km² soit 4 % de la superficie totale du bassin versant. Cette zone est caractérisée par des pentes faibles à modérées, un couvert végétal plus ou moins abondant et des terrains à érodibilité extrême (très forte).

La classe du degré d'érosion élevé, elle occupe 475 km² soit 6 % de la superficie totale du bassin versant, essentiellement vers le nord et aussi vers sa partie Nord-est où le couvert végétal est inférieur à 50 %, et/ou les roches sont caractérisées par une faible résistance. En ce qui concerne les classes du degré d'érosion très faible et faible occupent 3118 km² et 3023 km² respectivement, ce qui fait 78 % de la superficie totale lorsqu'on les regroupe, et se localisent au centre et au Nord-ouest du secteur d'étude.

La partie qui reste concerne la classe de l'état érosif de degré moyen (notable) et représente 936km² soit 12 % de la superficie totale du bassin versant d'Oued Medjerda-Mellegue.

V.3 Comparaison des résultats obtenues du model PAP/CAR et TSS calculés

Après avoir abordé l'application du modèle PAP/CAR au bassin versant de la Medjerda-Mellegue, et du fait de la grande surface de ce dernier, 7841 km, nous n'avons pas pu contrôler sur le terrain les résultats obtenus par cette méthode du fait de la grande étendue du bassin.

Nous avons décidé de recourir à la division du bassin selon les sous bassins jaugés (cinq sous bassins), et de comparer les résultats obtenus en intégrant des cartes des différents phénomènes naturels de la surface du bassin (pentes, couvert végétal, et lithologie) en afin d'obtenir une carte d'état d'érosion potentiel du bassin avec les résultats de transport solide spécifique TSS, calculés par l'application du model exponentiel ($Q_s = bQI^a$) sur les mesures des stations hydrométriques.

Les résultats obtenus dans cette étude qualitative de l'érosion par la méthode PAP/CAR et l'étude quantitative du modèle exponentiel, ont été détaillés sur les cartes d'état érosive des sous bassins jaugé (figures : 73,75, 77,79, et 81) et dans le tableau (tableau n°66).

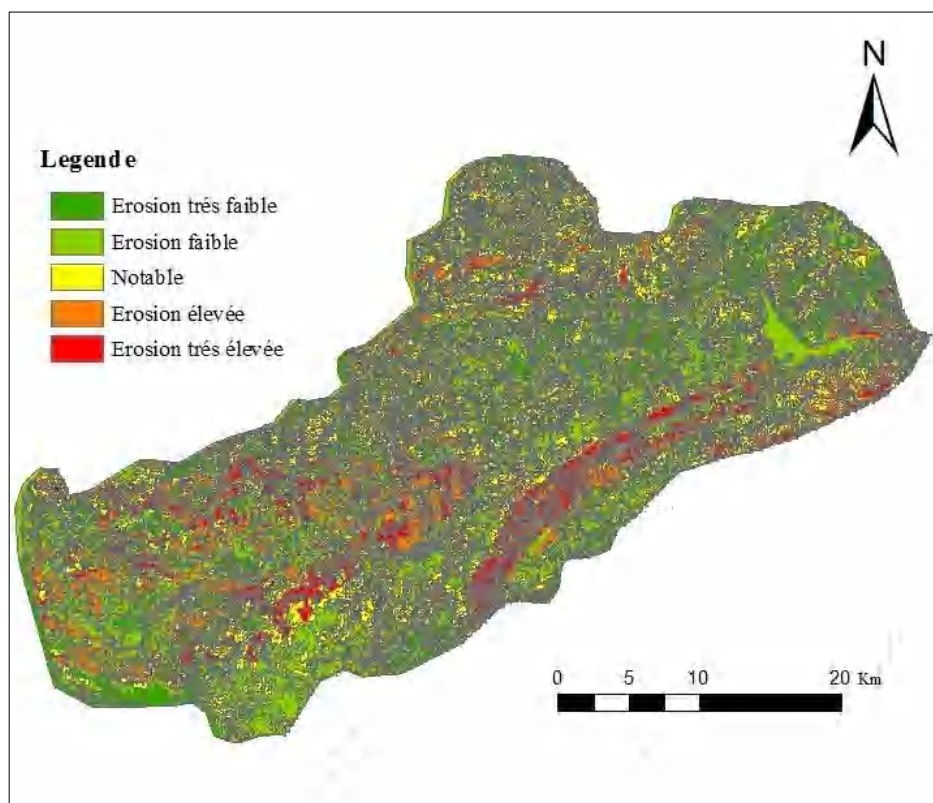


Figure 73 : Carte des états érosifs du bassin versant d'oued Medjerda à **Ain Dalia** selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, selon les directifs du modèle PAP/CAR

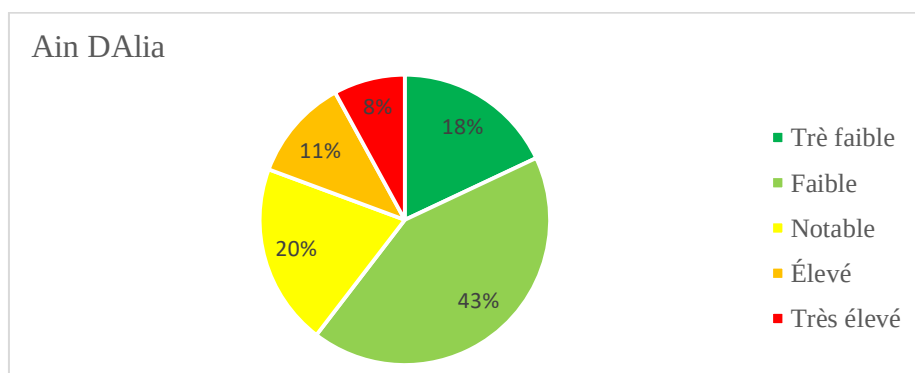


Figure 74 : Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued Medjerda à **Ain Dalia** selon le modèle PAP/CAR

La répartition de ces superficies sur la carte des états érosifs montre l'érosion élevée et très élevée qui affecte la partie amont du bassin couvre 39%. Par contre, on trouve une grande partie de superficie avec des degrés d'érosion très faible, faible à moyen occupent ensemble 61% de la surface totale du sous bassin. L'exploitation de ces données cartographiques en parallèle avec le T.S.S calculé (181 tons/km²/ans) permettent de déduire que le sous bassin versant d'Ain Dalia sur l'oued Medjerda est dans un état érosif faible à moyen.

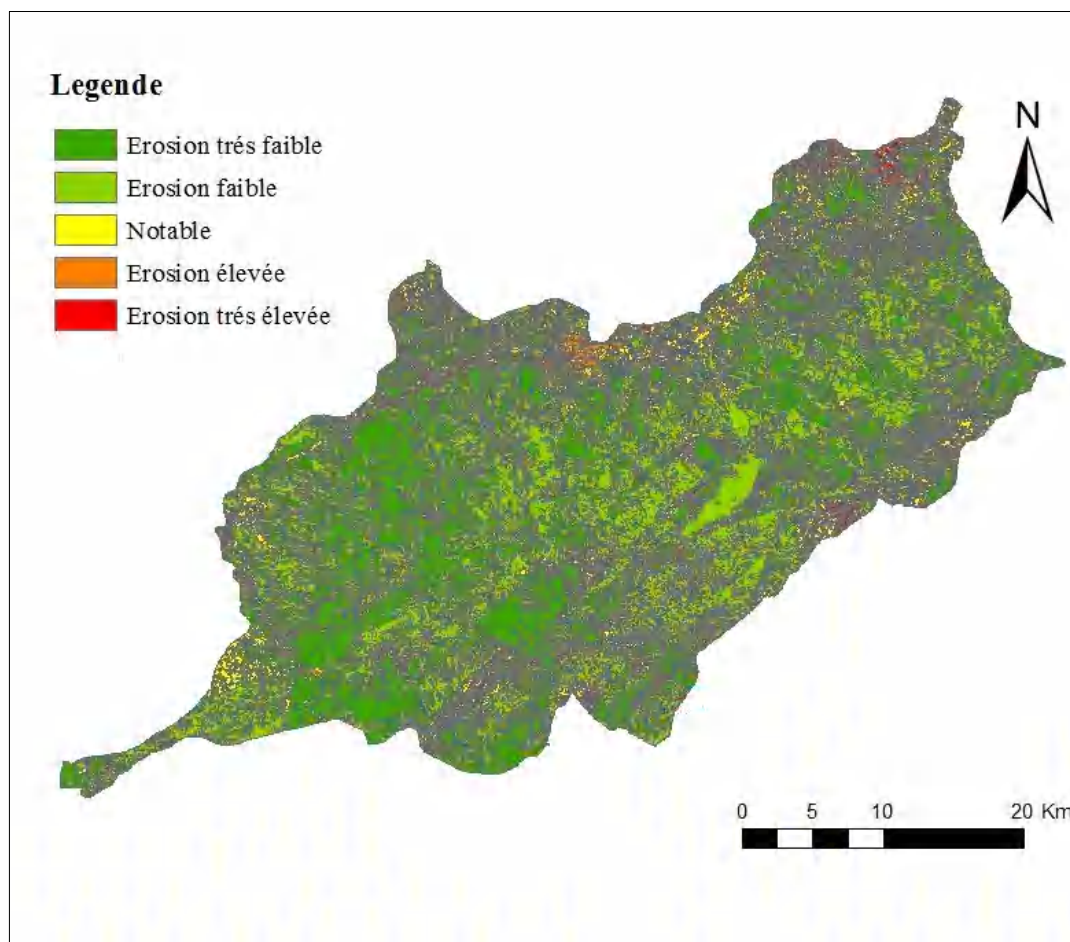


Figure 75 : Carte des états érosifs du bassin versant d'oued Mellegue aval à **Ouenza** selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, selon les directifs du modèle PAP/CAR

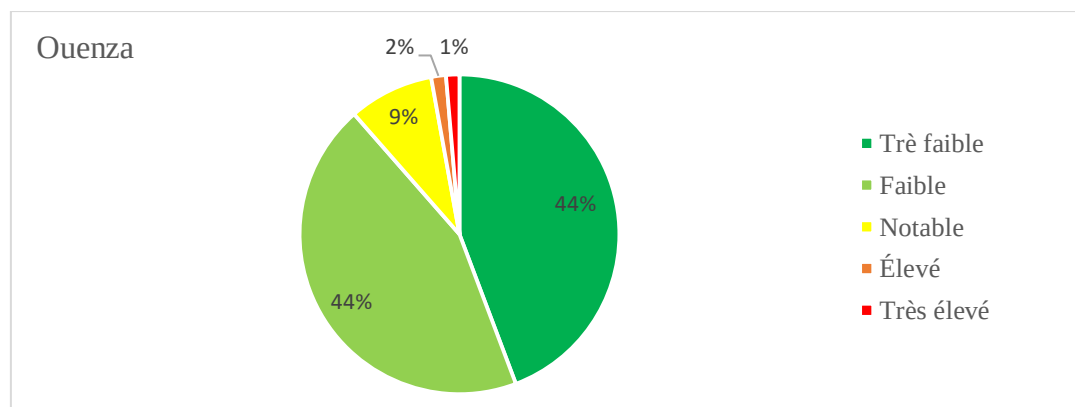


Figure 76 : Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued Mellegue aval à **Ouenza** selon le modèle PAP/CAR

L'analyse des données de cette carte montre que les classes de risque d'érosion faible à très faible occupent la majorité du territoire de ce bassin versant (88%), et que seulement 12% de la superficie de ce bassin présentent un risque à l'érosion de degré notable, élevé à très élevé.

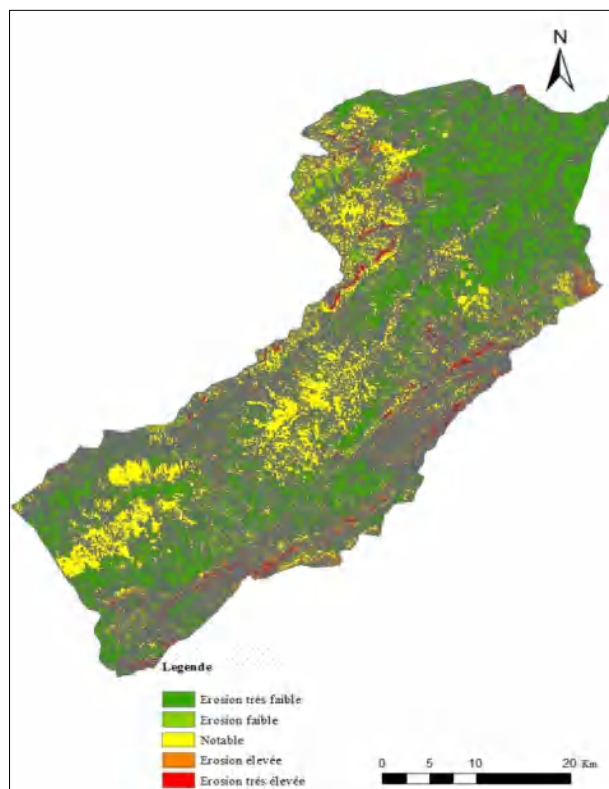


Figure 77 : Carte des états érosifs du bassin versant d'oued Mellegue amont à **Laouinet** selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, selon les directifs du modèle PAP/CAR

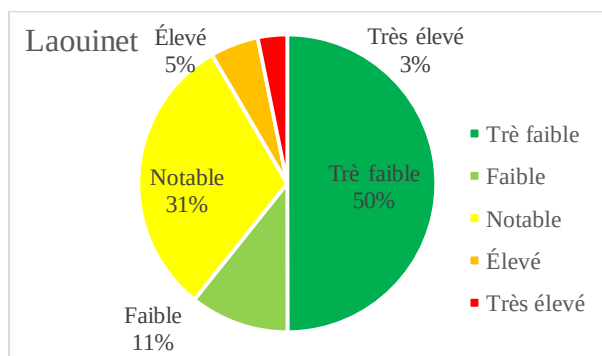


Figure 78 : Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued Mellegue amont à **Laouinet** selon le modèle PAP/CAR

Quant à la carte des états érosifs potentiels du sous bassin versant de Laouinet, c'est une carte de synthèse produite par la superposition des données des deux cartes : la carte d'érodibilité et celle des niveaux de protection du sol (phase prédictive). Cinq classes d'érosion ont été ressorties (figure 78) : la classe d'état d'érosion très faible et faible couvre une surface de 61% de la zone d'étude. La classe d'érosion notable couvre 31% de la surface du bassin versant. Les données de ces deux cartes soulignent que le bassin versant de l'Oued Mellegue amont à

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

Laouinet est très mal protégé et propice à une morphogenèse active, particulièrement à l'érosion hydrique et aux mouvements de terrain ce qui confirme l'apport important de **T.S.S (162 tons/km²/ans)**. Par ailleurs, la classe d'érosion élevée et très élevée couvre 8 % de la surface totale.

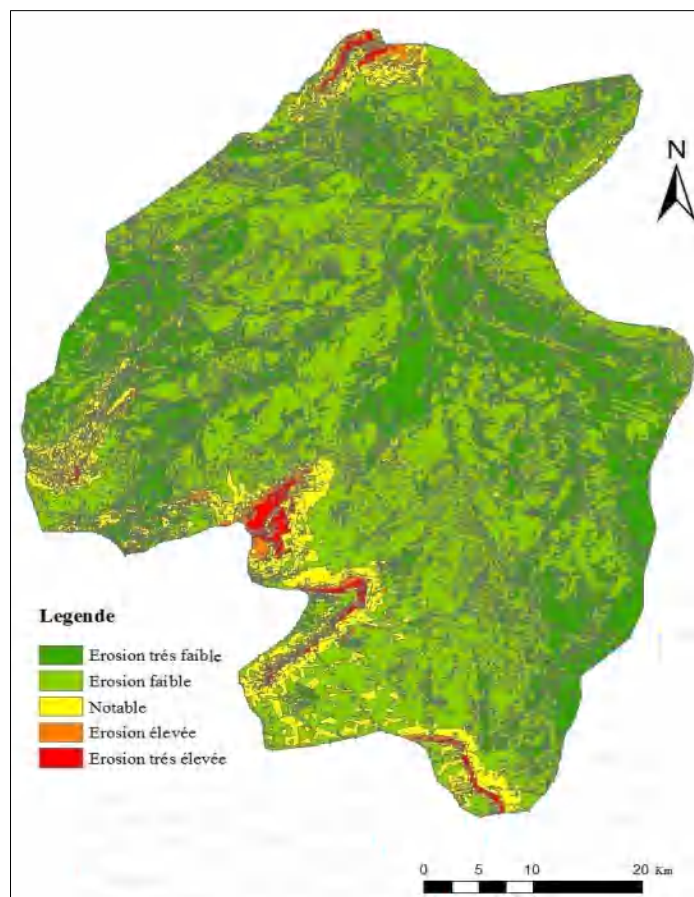


Figure 79 : Carte des états érosifs du bassin versant d'oued El Hourhir à **El Azregue** selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, selon les directifs du modèle PAP/CAR

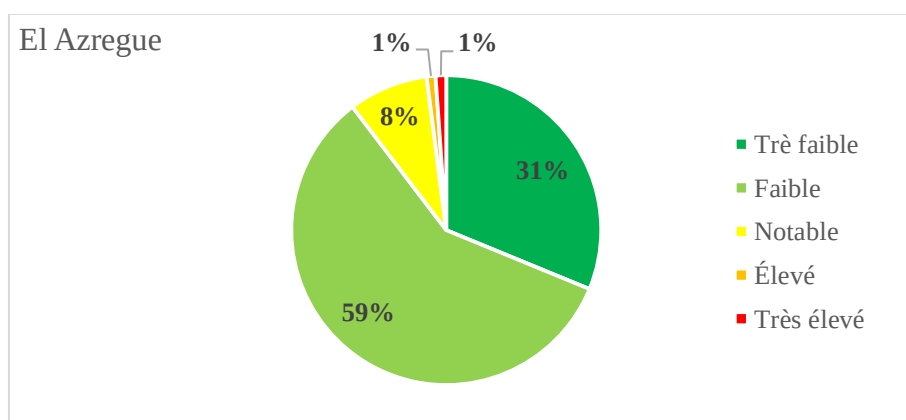


Figure 80 Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant d'oued El Hourhir à **El Azregue** selon le modèle PAP/CAR

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

L'analyse de la carte du bassin versant d'Elazregue permet de déduire que les classes considérées comme Notable, élevé et très élevé n'occupent que 10% de l'aire du bassin, alors que les classes de faible et très faible érosion occupent le reste (90%). L'érosion dans ce calculé donne un apport moyen annuel de 68,7 tons/km²/an.

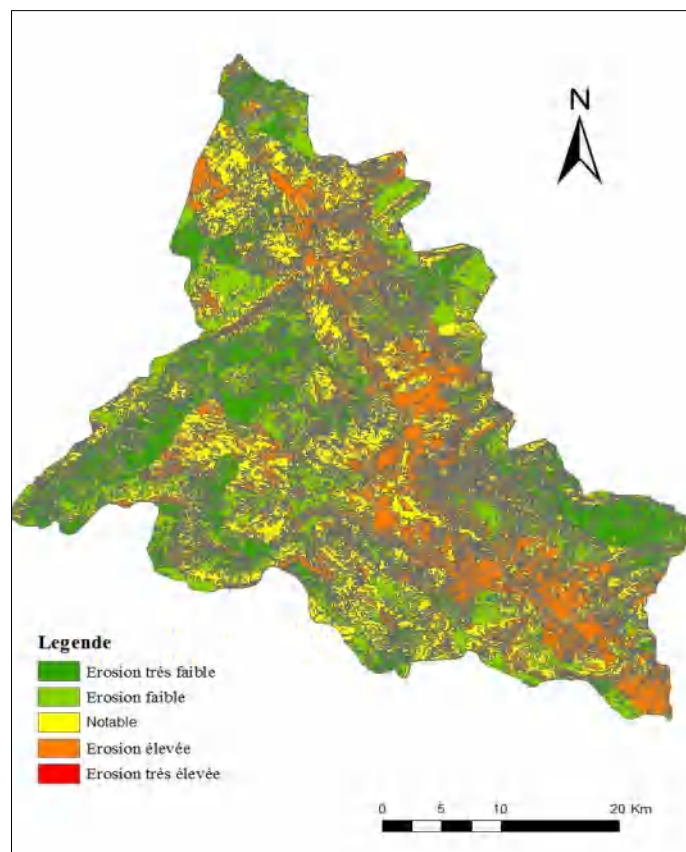


Figure 81 : Carte des états érosifs du bassin versant de l'oued Chabro à **Morsott** selon le modèle PAP/CAR

Source : La carte a été réalisée par Kheniche soufyane 2022 à l'aide du logiciel Arc Gis, selon les directifs du modèle PAP/CAR

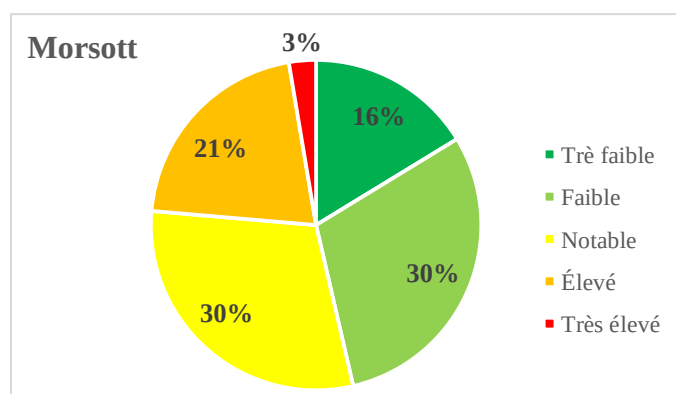


Figure 82 : Répartition des classes des états érosifs dans le bassin versant l'oued Chabro à **Morsott** selon le modèle PAP/CAR

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

Le traitement de la carte érosive du sous bassin versant de Morsott montrent que la classe de degré d'érosion faible est de 30%, et très faible de 16% c'est à dire environ 50 % de la superficie totale du bassin versant. Pour la classe de degré moyen on a 30 % de la superficie totale. Par contre les classes de degré d'érosion élevé et très élevé couvrent ensemble 24 % en total. Cela montre que le bassin versant de Morsott présente des terrains à superficie importante vulnérable à l'érosion. La répartition de ces superficies sur la carte des états érosifs montre l'érosion grave et très grave qui affecte la partie centrale du bassin versant. L'érosion élevée suit le schéma que dessine le réseau hydrographique, surtout le cours d'eau principal qui produise un apport moyen annuel de **40 tonnes/km²/an**.

Par contre, on trouve une grande partie de superficie avec des degrés d'érosion très faible, faible à moyen surtout dans les monts sur les deux rives gauche et droite, cela est expliqué par la présence d'un couvert végétal (forêt) ou de terrains à roche compacte qui diminuent l'influence de ce phénomène.

Tableau 66 : Synthèse des résultats du modèle PAP/CAR appliqué sur les bassins jaugés

Stations	Classe de degré d'érosion potentiel	%
Morsott	Très faible	16
	Faible	30
	Notable	30
	Élevé	21
	Très élevé	03
Ouenza	Très faible	44
	Faible	44
	Notable	09
	Élevé	02
	Très élevé	01
El Aouinet	Très faible	50
	Faible	11
	Notable	31
	Élevé	05
	Très élevé	03
Ain Dalia	Très faible	18
	Faible	43
	Notable	20
	Élevé	11
	Très élevé	08
El Azreg	Très faible	31
	Faible	59
	Notable	08
	Élevé	01
	Très élevé	01

CHAPITRE V : Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR.

Conclusion:

L'étude qualitative de l'état d'érosion par la méthode PAP/CAR (approche prédictive), basée sur les facteurs naturels (pente, litho-faciès, couvert végétal et occupation des sols) a permis d'analyser et d'identifier les états érosifs dans les bassins jaugés de l'oued Medjerda-Mellegue.

La carte d'érodibilité qui résulte de la superposition de la carte des pentes et celle de litho-faciès montre que 70 % du bassin versant étudié présente une érodibilité faible. La carte de protection montre que 36 % de la superficie totale du bassin présente une protection très élevée, et que 49 % de la superficie totale est mal protégée (très faible).

La carte des états érosifs montre que 78% de la superficie totale du bassin versant de l'Oued Medjerda-Mellegue présente une érosion faible à très faible, et que 12% de la superficie totale présente une érosion moyenne (notable). Les 10 % restants présentent une érosion élevée à très élevée. Ceci est confirmé par les résultats quantitatifs TSS des sous bassins jaugés, car les résultats obtenus sont faibles (varient de 40 t/km²/an à 180 t/km²/an au niveau du bassin au barrage d'Ain Dalia) par apport aux celles citées dans des études similaires.

Au niveau des bassins jaugés, les résultats du modèle PAP CAR diffèrent pour le bassin de l'oued Medjerda au barrage de Ain Dalia qui présente 19 % de sa surface concernée par les classes 4 et 5, respectivement état érosif élevé à très élevé (180 t/km²/an).

Les zones les plus menacées par le risque d'érosion se situent beaucoup plus dans la partie Nord du bassin versant sur le long de l'oued Medjerda et le long de l'oued Mellegue, ce qui confirme le rôle important de la pente, la lithologie, et la couverture végétale dans la protection du sol contre l'érosion hydrique.

CHAPITRE VI :

*Analyse du bilan de régularisation du
barrage d'Ain dalia et estimation de la
vase déposée*

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.1 Introduction

Malgré les conséquences gênantes de ce phénomène l'Algérie a déployé de grands efforts depuis l'indépendance pour réduire les dépôts dans les barrages, ce qui a engendré la prolongation de vie de plusieurs barrages. (Remini, 2005).

En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse, face à la concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'alimentation en eau potable (AEP) pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau. La rareté de l'eau freine les efforts de développement de nombreux pays. Tous les barrages du monde sont exposés au phénomène de la sédimentation, mais avec des vitesses qui diffèrent d'une région à une autre, ce phénomène a été largement signalé aux États Unis, en Russie, à Taiwan, en Chine, en Iran, au Soudan et en Afrique du nord. À titre d'exemple, le barrage Mohamed V au Maroc, d'une capacité de 567 Hm³ reçoit annuellement un volume de vase de 14.5Hm³, soit une perte annuelle de 2.5% de sa capacité totale. Le barrage de Ghrib en Algérie d'une capacité de 280 Hm³ reçoit annuellement un volume de vases qui lui fait perdre 1,14% de sa capacité. (Remini B., 2005).

L'Algérie dispose à fin septembre 2019, 80 barrages achevés (dont 65 sont exploités) sur l'ensemble du territoire national avec une capacité totale de stockage de 8 milliards de mètres cubes, ces barrages reçoivent annuellement une quantité de vase estimée à 32 Hm³ (Remini, 2017) ; ces quantités des matières proviennent de l'accélération de l'érosion des bassins versants due aux conditions physiques, géomorphologiques, hydro climatiques et socio-économiques favorables.

En Algérie, l'envasement est caractérisé par un rythme accéléré. Les effets néfastes de ce phénomène sont nombreux allant de la réduction considérable de la capacité de stockage du barrage, la dégradation de la qualité de l'eau et l'obturation des organes de vidange.

Dans ce chapitre on a tenté d'analyser le bilan de la régularisation du barrage d'Ain dalia en se basant sur les données de la période 1990 à 2015, estimer les apports hydrologiques ainsi que l'estimation de la vase déposée dans la retenue.

VI.2Présentation du site de barrage :

Le sous bassin versant de Medjerda (193km²) est l'un des cinq sous bassin qui constituent le grand bassin de Medjerda-Mellegue, ce dernier situe au Sud-est du Nord Algérie d'une superficie de 7841 Km² (partie algérienne) ; le sous bassin d'intérêt prend le code **12-01** d'après l'**A.B.H**

Le bassin de Medjerda à Ain Dalia est drainé par l'oued Medjerda et ses affluents, alimentant le barrage de Ain Dalia dont l'eau est destinée à l'alimentation en eau potable de la ville de Souk-Ahras et d'autres villes limitrophes telles que: Taoura, Drea, Ouled-Driss, Zaarouria, Hennancha, Kheddara (à Bordj M'Raou) et Ouillen (à Boukebch). Ainsi qu'aux transferts de Ouenza vers Laouinet (Guesmi, 2004).

Le barrage d'Ain Dalia est situé sur le territoire de la Wilaya de Souk Ahras sur l'Oued Medjerda, Z= 712m d'altitude par rapport au niveau de la mère.

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

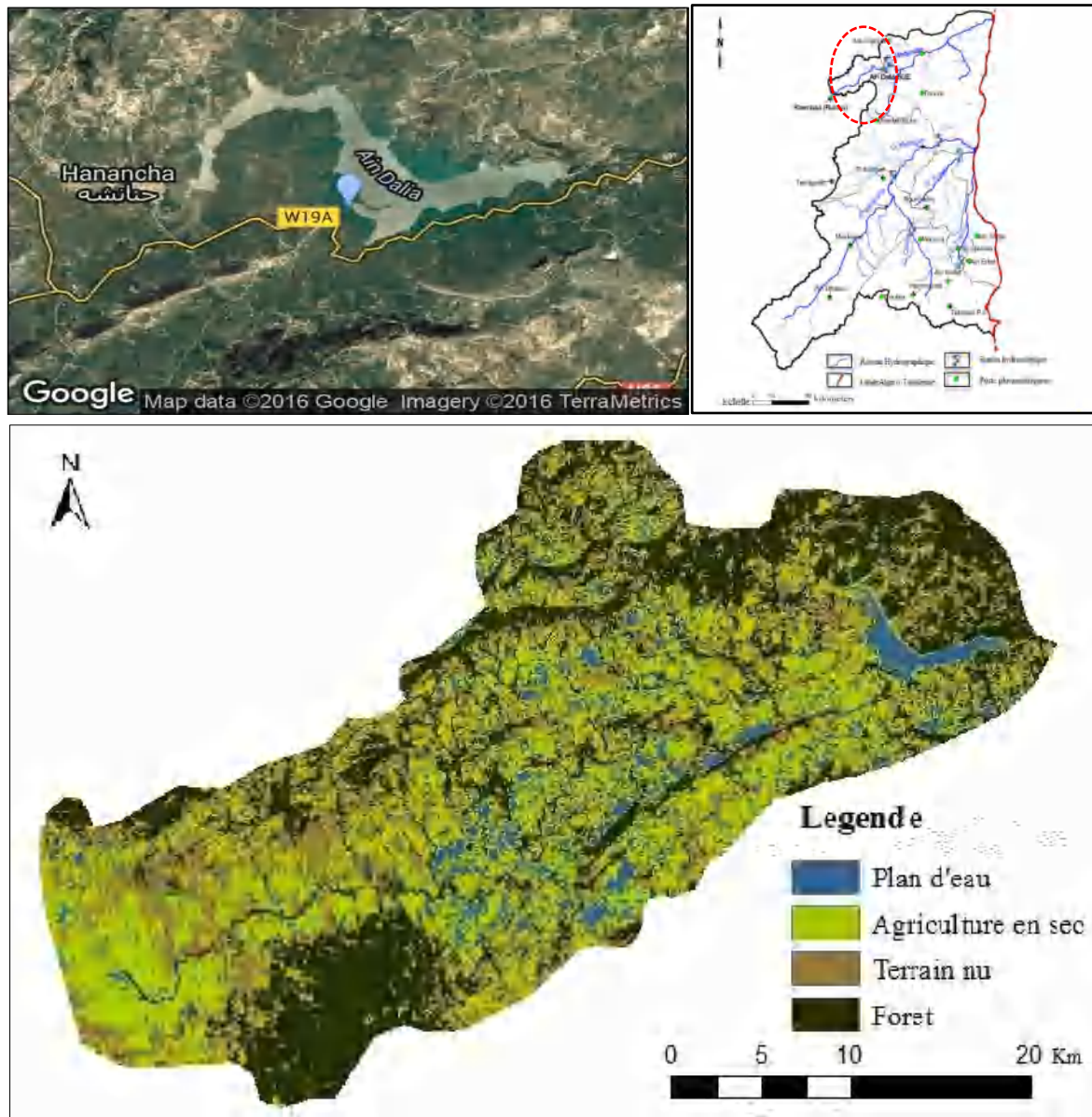


Figure 83 : Situation du barrage d'Ain Dalia dans le bassin de la Medjerda

VI.3 Présentation du barrage

L'aménagement du barrage Ain Dalia est un ensemble d'ouvrages, chacun à sa conception. Cette figure (fig. 84) montre les différents éléments constituant l'aménagement. La digue est constituée d'un remblai en enrochement compact de pente moyenne à l'amont de 2,1/1 et à l'aval de 2/1. Les risbermes situées respectivement à niveau 700m et 685m de largeur 5 m et 8 m. la cote de la crête est de 715,50 et la largeur de 9 m, et d'une longueur de 300 m. Dans le plan horizontal, la crête de la digue présente une courbure vers l'amont de 1500m de rayon. (Maître d'ouvrage : ANBT ; Études d'exécution : TRACTEBEL ; Période des travaux : 1985-1988).

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.3.1 Coupe de la digue du barrage d'Ain Dalia

-La figure 84 présente le profil en long du barrage

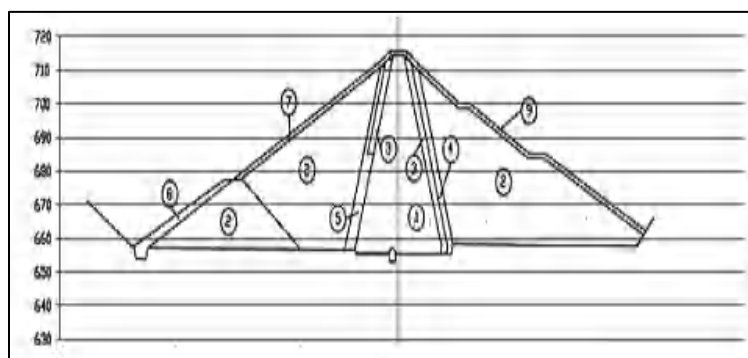


Figure 84 Profil de la digue du barrage

Tableau 67 Caractéristiques de la digue du barrage d'Ain Dalia (ANBT)

1 noyau en silt argileux
2 Enrochement calcaire
3 Filtre
4 Drain
5 Zone de transition amont (1/3 de 3 + 2/3 de 4)
7 Ripe-Rap
8 Silt
9 Enrochement aval
L'évacuateur des crues de surface implanté dans les grés et les marnes de

L'évacuateur des crues de surface implanté dans les grés et les marnes de la rive droite, ce dernier est dimensionné pour l'évacuation des crues :

- Dix-milléniales $Q=1040 \text{ m}^3/\text{s}$ sous une charge maximum de 2,9m (niveau : 712,90),
- Evacuation d'une crue de $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ sous le niveau 714,10.

Le fond de canal d'approche est arasé à la cote 706,00, Le seuil déversant, arasé à la cote 710,00



Figure 85 évacuateur de crue

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.3.2.1 Le coursier

Il se compose de deux tronçons présentant successivement des pentes de 2,5% et 26% auxquelles correspondent des longueurs de 241,54 m et 108m. La largeur est de 35 m à l'aval du seuil (cote 707) et se réduit progressivement à 20 m à la côte 701 et à 16,75 m à la côte 672,92 avant d'aborder la cuillère de dissipation.



Figure 86 : Le coursier

VI.3.2.2 Cuillère de dissipation située à l'aval du coursier, assure la dissipation de l'énergie, sa largeur est de 16,75 m, elle comporte un déflecteur des crues.

VI. 3.3 Bassin de réception

Situé à l'aval de la cuillère, il assure l'amortissement de l'énergie de l'eau avant qu'elle ne regagne l'oued. La tour de la prise d'eau est située en rive gauche, à l'amont de la galerie de vidange de fond.

La conception et dimensions de l'ouvrage permettent d'effectuer :

Une prise d'eau verticale est immergée de 53,46 m de hauteur.

La prise d'eau pour l'adduction et l'irrigation se fait par trois (03) pertuis disposés à trois (03) niveaux de la tour : 686,00 m, 693,90 m 701,80 m.

Constitution de la vidange de fond par une galerie souterraine creusé dans les marnes et les grés de la rive gauche

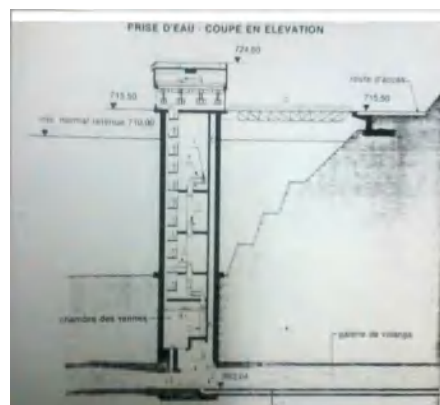


Figure 87 Conception de l'ouvrage hydraulique (ANBT)

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

Tableau 68 Caractéristiques de la digue (barrage en chiffres)

Niveau crête	715.50 m NGA
Hauteur au-dessus du fond de la vallée	55 m
Emprise dans le fond de la vallée	272 m
Longueur de la crête	300 m
Pente du talus amont	2.1/1
Pente du talus aval	2/1
Berme amont	Niveau 677.50
Berme aval	Niveau 685.00 et 700.00
Largueur de la crête	9 m
Largeur de la route (sur crête)	4 m
Volume de remblai	1275 000 m ³
Volume d'excavation	576 000 m ³
Nature fondations	Marne grès

VI.3.4 Retenue

Tableau 69 Caractéristiques de la retenue du barrage

Capacité brute initial (niveau 710)	82 millions de m³
Capacité brute actualisé en 2004 (niveau 710)	76.07 millions de m ³
Capacité utile :	73.4 millions de m ³
Envasement moyen annuel	0.75 millions de m ³
Volume annuel régularisable	45 millions de m ³
Cote de retenue normale :	710
Cote de retenue minimum :	684
Cote de retenue maximum :	712.9
Débit de la crue de projet T=10000 ans :	1040m ³ /s

VI.3.5 Galerie de dérivation

Tableau 70 Caractéristiques de la galerie de dérivation

Niveau radier entonnement	662.19
Longueur galerie de dérivation	338.50 m
Section	circulaire
Diamètre intérieur	4.50 m
Pente	0.8%
Débit maximum	(sous h= 15 m) 190 m ³ /sec

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.3.6 Galerie de vidange

Tableau 71 Caractéristiques de la galerie de vidange

Raccordé à l'amont de la galerie de dérivation	
Niveau radier entonnement : 662.68 m NGA	
Longueur entonnement : 15 m	
Largeur : de 14 à 7 m	
Pente : 0.8%	
Débit maximum :	190m/s
Pertuis de vidange :	
Section	2.11 m *3.17m
Longueur tronçon blindé 38.35 m	
Équipement de contrôle :	1 batardeau
	1 vanne wagon
	1 vanne segment
Tronçon de raccordement à la dérivation : longueur 155.20 m	

VI.3.7 Tour de prise d'eau

Tableau 72 Caractéristiques de la Tour de prise d'eau

Hauteur totale (au de dessus des fondations)	40.60 m
Fut cylindrique :	diamètre 11.20 m h =30.36 m
3 prises d'eau 1000	niveau 686,00 - 693,90 - 701,80
Planchers	niveau 679.40 - 684 .47 - 692.37 - 700.27 - 715.50
Chambre inférieure :	niveau plancher 669.81
Niveau vannettes de dévasement	662.94
Niveau des chambres de dévasement :	662.50



Figure 88 : (photo vue de la tour de prise d'eau (KHENICHE Soufyane 2016)

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.4 Hydrologie du bassin

Le site du barrage d'Ain Dalia est situé sur l'oued Medjerda, fleuve qui s'étend de l'est algérien traversant la Tunisie et se jetant dans la Méditerranée au nord de Tunis. D'une superficie de 193 km² au droit du site, le haut bassin de la Medjerda culmine au Ras El Alia (1317 m) au pied duquel l'oued Medjerda prend sa source. L'eau coule au centre d'une gouttière encadrée de longs reliefs culminant entre les niveaux 1000 et 1300 m, l'altitude moyenne du bassin versant est de 890 m.

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin est de l'ordre de 700mm, mais sa répartition n'est pas homogène du point de vue spatial et temporel. En 1975, la DEMRH a retenu comme estimation du transport solide de la Medjerda à la station de Souk Ahras, la valeur de 780 t/km²/an ce qui correspond à un envasement annuel de 155 000 tonnes.

VI.5 Géologie de site

Le site du barrage est formé de roches très différentes du point de vue perméabilité et résistance de la rive gauche vers la rive droite:

VI.5.1 En rive gauche :

- ✓ Des alternances de marnes calcaires et de marnes feuilletées très plissées,
- ✓ Des marnes schisteuses qui alternent avec des marnes grises indurées,
- ✓ Cet ensemble repose sur des grès jaunes plus ou moins argileux

VI.5.2 En fond de vallée

Une série mylonitisée qui comprend des grès gris-vert, peu cimentés, des sables et des argiles schisteuses,

- ✓ Des marnes schisteuses, Cet ensemble est découpé par des bandes de brèches argileuses,

VI.5.3 En rive droite, se présentant en allure plissée dans la moitié inférieure de l'appui :

- ✓ Des alternances de marnes grises compacte et de calcaire microcristallin,
- ✓ Des marnes gris-bleu à intercalation de calcaire compact,
- ✓ Des marnes jaunes à niveaux calcaire,
- ✓ Des calcaires à nummulites et coquilles (lamellibranches et brachiopodes).
- ✓ En rive droite, la moitié supérieure de l'appui est formée d'alternances de calcaires
- ✓ Fossilifères et de marnes à glauconie qui passent vers le haut à une série marno-gréseuse plus ou moins calcaire.

Au niveau de l'évacuateur des crues, les roches sont constituées de grès jaunes, puis verts, suivis de marnes grises compactes et de marne calcaire indurée.

VI.6 Évolution de la capacité du barrage d'Ain Dalia selon le bilan de régularisation mensuelle pour la période (1990-2015).

La régularisation des eaux de barrage est l'expression analytique de contrôle et de suivi de l'état de fonctionnement hydrologique de l'ouvrage, ce qui permet de gérer rationnellement la capacité de la retenue.

VI.6.1 Présentation du schéma théorique de fonctionnement du barrage

Comme le montre le schéma de la figure 89, les calculs des principaux termes du bilan d'eau d'un barrage (apports ou entrées, défluent ou sorties, stock ou réserve), permet de suivre l'évolution du gain et perte de capacité d'une retenue. Il permet, on outre, d'estimer les déficits de régularisation, liés aussi bien au régime irrégulier des apports qu'à l'importance des pertes (Boutouatou, et al 2019).

Les données de base utilisées sont les mesures établies par l'ANBT sur une série de 25ans (1989/1990-2014/2015).

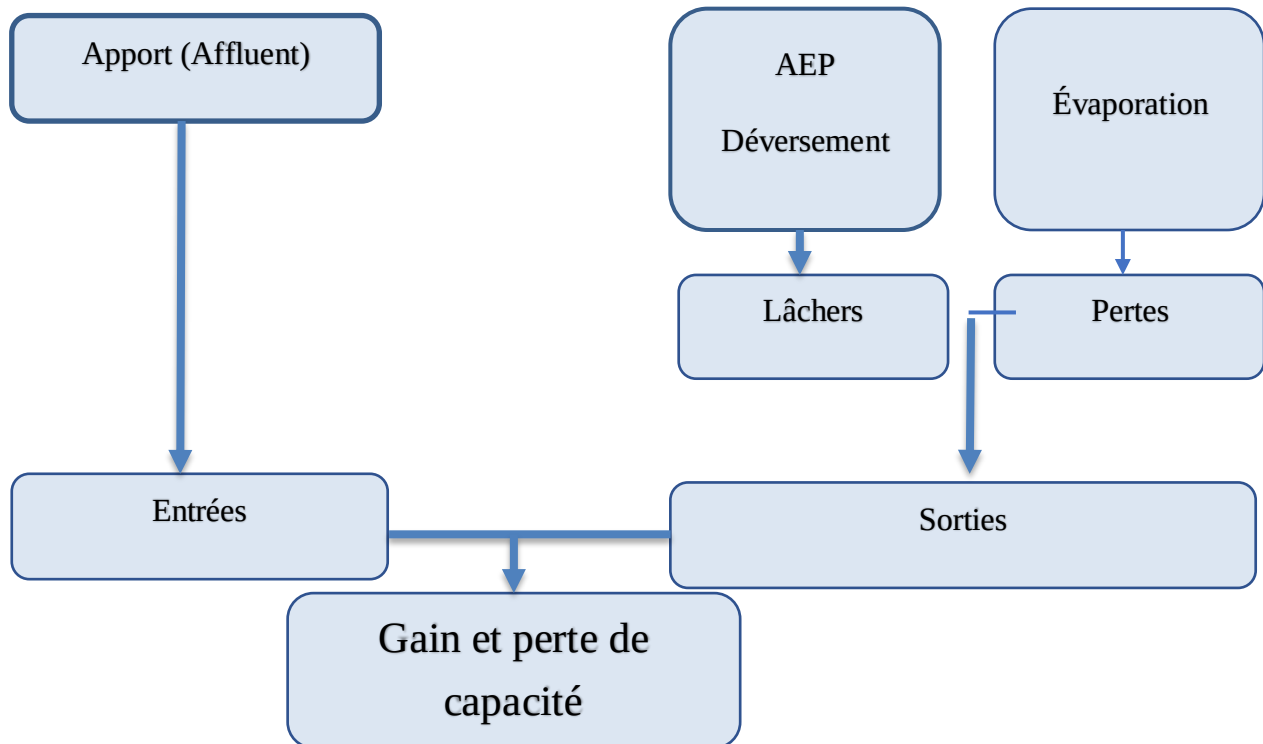


Figure 89 : Schéma explicatif des éléments du bilan hydraulique d'un barrage (Boutouatou, et al 2019).

VI.6.2 Remplissage du barrage d'Ain Dalia

Le tableau de variation interannuelle de la capacité du barrage durant la période étudiée est remarquable pour l'année 2003-2004 par une capacité de 70 hm³, avec une moyenne de 40,207 hm³ /an, la faible année de la période est celle de 2000-2001, on distingue une irrégularité des apports au niveau du bassin.

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

Tableau 73 Bilan de régularisation inter annuelle du barrage d'Ain Dalia pour la période (1990-2015)

Année	Début d'Années	Durant l'année					Durant l'année		Fin d'année		Pluie (mm)
	Capacité(Hm3) (1)	Lâchers			Pertes		Affluent (7)= (2+3+4) + (5+6)	Défluent (8)= (9-1) +7	Capacité (hm3) -9	Gains (Hm3) (10)= (9-1)	
		AEP (Hm3) (2)	Évacuateur (Hm3) (3)	Vidange de fond (Hm3) (4)	Évaporation (Hm3) (5)	Fuite (Hm3) (6)					
1990	0	0	0	0	1,052	6,748	0	9,295	9,295	9,295	428,9
1990/91	9,012	28,345	0	0	3,94	6,946	0	58,444	58,444	58,444	666
1991/92	57,792	4,68	12,874	22,616	5,104	0	0	55,641	55,641	55,641	764,8
1992/93	52,529	4,745	4,422	23,913	4,978	0	0	30,703	30,703	30,703	444,9
1993/94	29,667	4,238	1,3	5,421	5,113	0	0	37,345	37,345	37,345	475,2
1994/95	36,37	4,745	0,029	0	7,688	0	0	47,179	47,179	47,179	488
1995/96	46,911	5,768	7,644	6,395	7,905	0	0	68,191	68,191	68,191	850
1996/97	66,507	19,933	1,487	0	10,038	0	0	60,269	60,269	60,269	491
1997/98	46,179	23,725	0,039	0	10,1215	0	0	62,292	62,292	62,292	898,8
1998/99	60,781	24,709	9,805	0,829	9,323	0	0	58,713	58,713	58,713	802,3
1999/00	62,131	26,718	0,167	0,008	7,294	0	0	52,781	52,781	52,781	685,5
2000/01	42,033	30,079	0,043	0	6,193	0	0	30,857	30,857	30,857	793,4
2001/02	27,974	20,804	0,012	0	3,63	0	0	10,313	10,313	10,313	491,6
2002/03	9,141	12,718	0,252	2,074	6,606	0	0	73,009	73,009	73,009	1222,9
2003/04	70,465	22,478	9,568	0,914	7,255	0	0	76,11	76,11	76,11	1000,2
2004/05	67,25	22,051	5,763	1,251	7,842	0	0	60,21	60,21	60,21	931
2005/06	61,862	23,31	0,943	0,91	7,185	0	0	52,657	52,657	52,657	627,2
2006/07	59,192	26,294	0,097	0	7,097	0	0	48,748	48,748	48,748	632
2007/08	45,022	28,661	0,307	0	5,876	0	0	24,618	24,618	24,618	606,7
2008/09	21,646	23,29	0,048	0	4,595	0	0	43,964	43,964	43,964	898,6
2009/10	41,128	24,974	0,014	0	3,962	0	0	21,979	21,979	21,979	595,5
2010/11	19,177	22,805	0,102	0	3,293	0	0	36,647	36,647	36,647	918,6
2011/2012	33,45	28,683	0,664	6,546	5,365	0	0	61,862	61,862	61,862	862,5
2012/2013	58,427	28,607	0	0	5,189	0	0	36,084	36,084	36,084	660,5
2013/2014	32,914	25,068	0	0,028	4,564	0	0	28,635	28,635	28,635	680
2014/2015	25,613	25,946	0,993	0,126	6,494	0	0	60,62	60,62	60,62	1067

VI.6.3 Régularisation inter annuelle

Le défluent représente 75% des apports liquide et ceci dans le but de garantir la stabilité de l'ouvrage. Le barrage a enregistré un apport liquide exceptionnel pendant l'année hydrologique 1998-1999 avec un apport de 44,66 hm³.

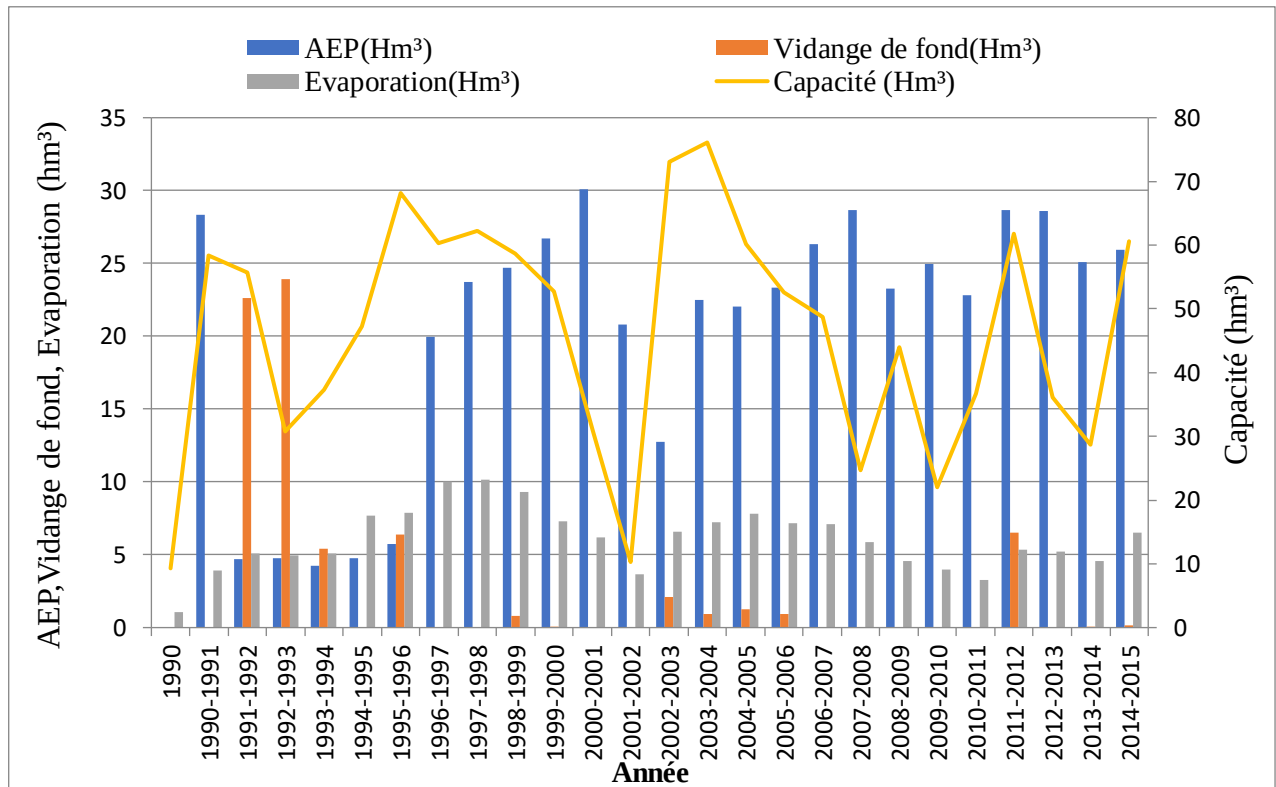


Figure 90 : La courbe des variations annuelles de la capacité en fonction des affluents et des défluent du barrage d'Ain Dalia.

VI.6.4 La régularisation mensuelle :

VI.6.4.1 Affluents (Apport liquides) et pluies mensuelles

Les apports liquides, conditionnés par la pluviométrie, contrôlent le niveau de remplissage du barrage. Pour l'année 2002/2003, la pluie annuelle a été de 1222 mm, les apports liquides de 21.65 hm. La capacité au début de cette année était très faible (10.3 hm). Pour l'année 2003/2004, la pluie annuelle a été de 1000,2 mm, les apports liquides de 40.215 hm³. La capacité au début de cette année étaient de 73 hm. L'apport annuel le plus faible de la période est celui de l'année de mise en eau (1990/91 : 7.8 hm³) et 1994/95 (12.46 hm³). A ces deux années correspondent respectivement des pluviométries annuelles de 428.9 mm et 488 mm.

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

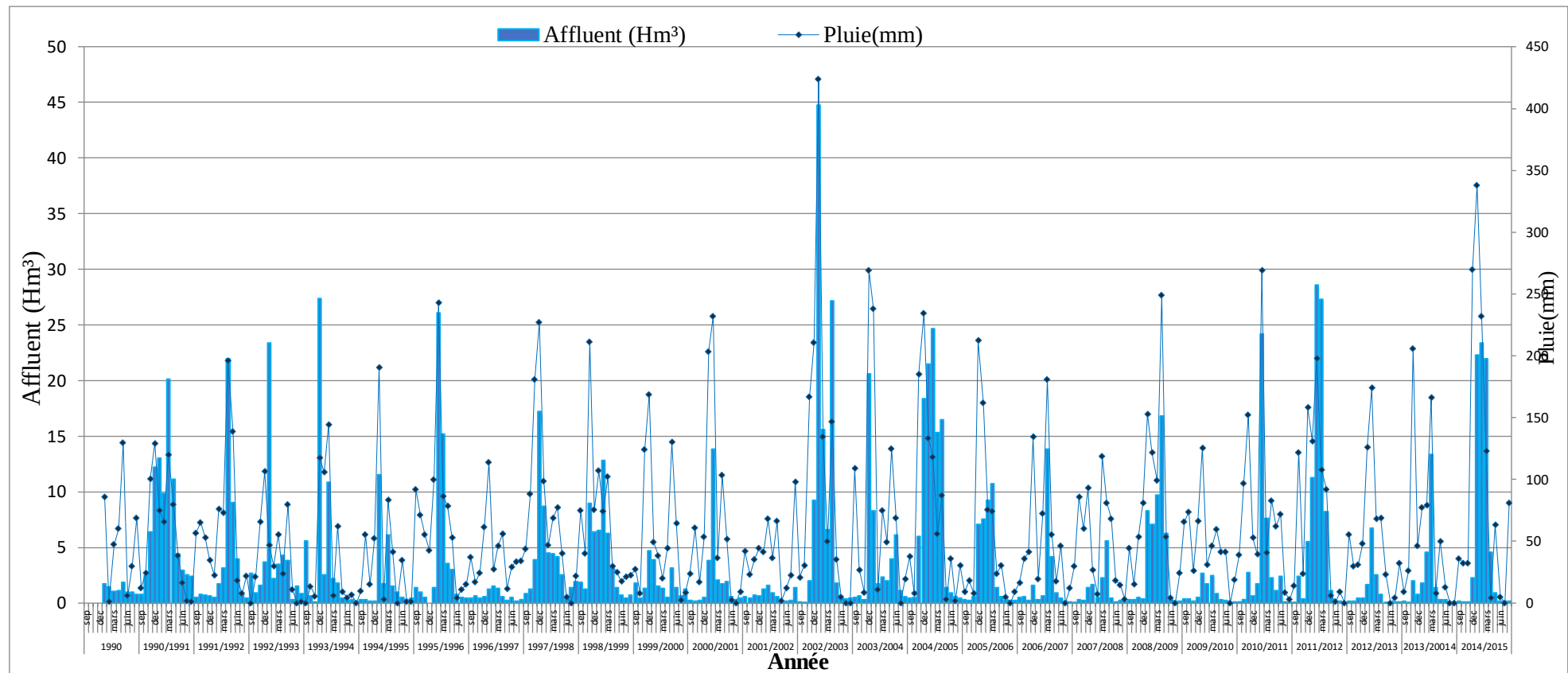


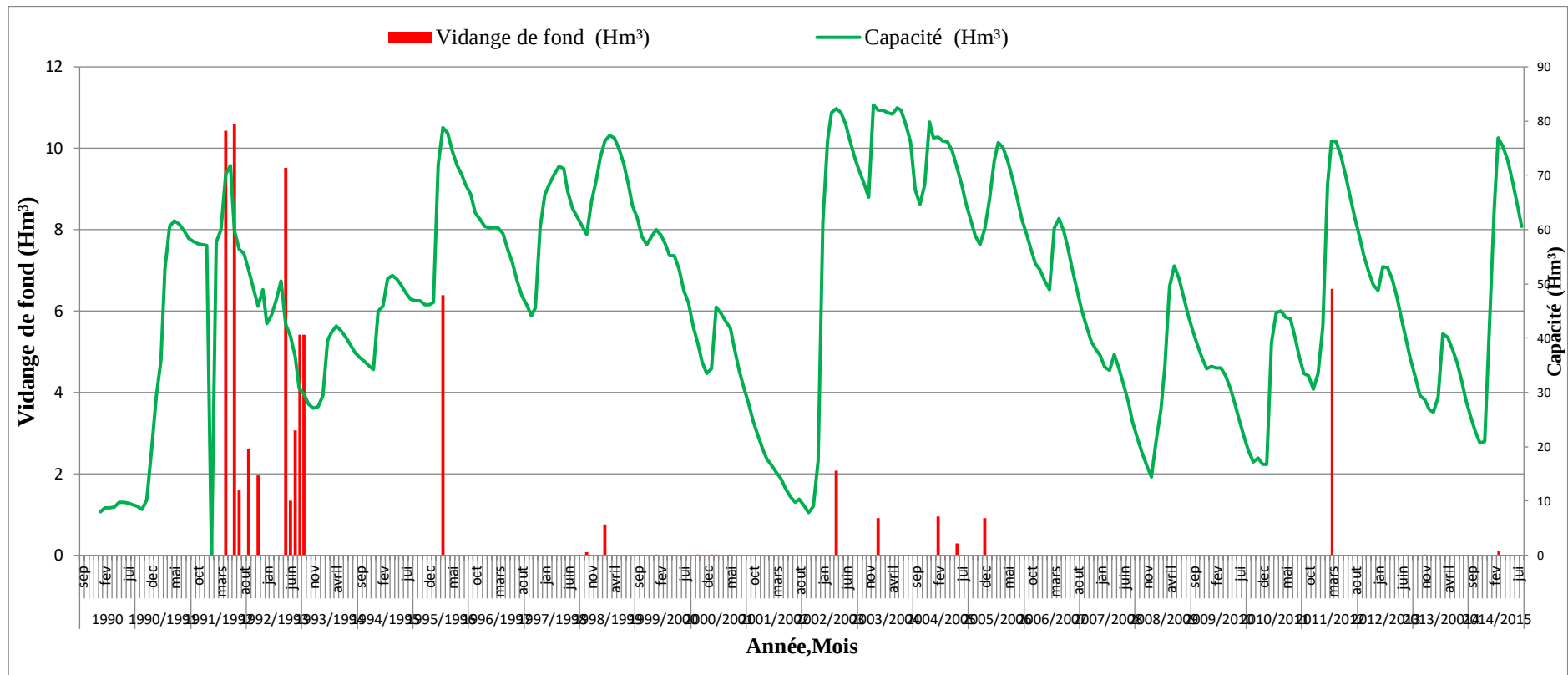
Figure 91 : La courbe des variations annuelles des précipitations et de capacité du Barrage d'Ain dalia

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI .6.4.2 Défluent

VI .6.4.2.1 La vidange de fond

La vidange de fond est un des outils de régularisation pour le gestionnaire. Elle est parmi les défluent le facteur important en termes de volume, elle peut atteindre à titre d'exemple près de 10.61Hm³ pour le mois d'avril 1992 pour une capacité de 70.2hm³.



CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

VI.7 Envasement des barrages

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leurs dépôts dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse, Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans le retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays aride et semi- aride.

VI.7.1 Les barrages en exploitation suivant les bassins hydrographiques

Pour assurer la gestion de la ressource en eau, En 1996 l'Algérie à créer cinq Agences de bassins hydrographiques il s'agit des bassins suivants

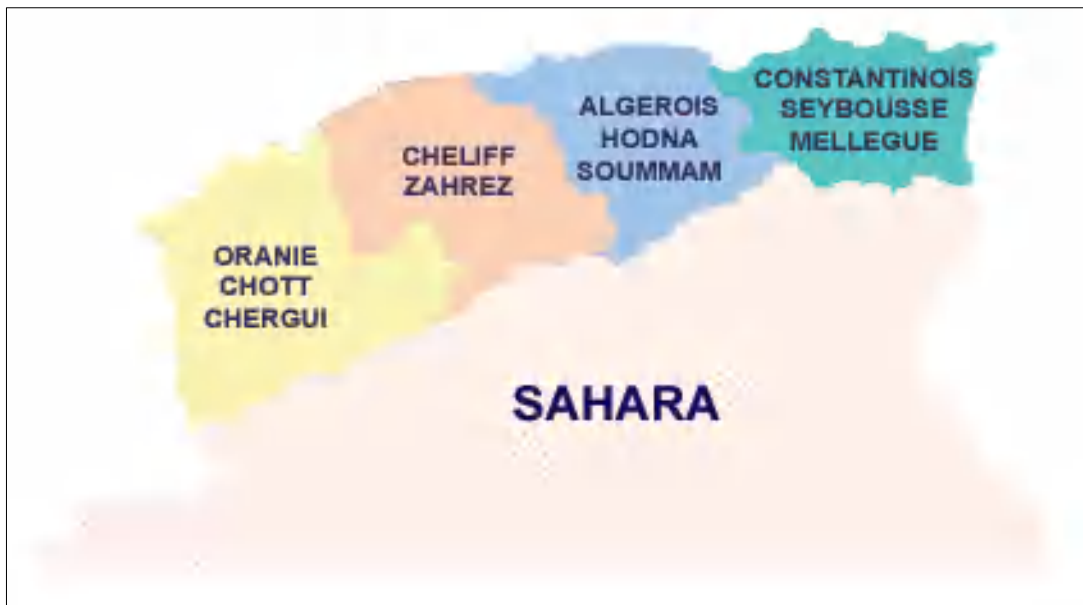


Figure 93 : Bassins hydrographiques (ABH)

- Oranie Chott-Chergui
- Cheliff - Zahrez
- Algérois - Hodna – Soummam
- Sahara
- Constantinois - Seybouse – Mellegue

**CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage
d'Ain dalia et estimation de la vase déposée**

Tableau 74 les barrages dans « Constantinois - Seybouse – Mellegue »

N°	Barrage	Wilaya	Année mise en service	Capacité initiale Hm3	Volume régularisé Hm3/an	Affectation
38	H.Grouz	Mila	1987	45	16	AEP
39	AinDALia	S.Ahras	1987	82	45	AEP
40	O.Cherf	S .Ahras	1995	157	30	IRR
41	Zerdazas	Skikda	1977	31	32	Mixte
42	Guenitra	Skikda	1984	125	48	Mixte
43	H.Dbeghe	Guelma	1987	220	55	Mixte
44	Chefia	El Taref	1965	171	95	Mixte
45	F.E.Gueiss	Khenchla	1930	3	-	Mixte
46	Babar	Khenchla	1985	41	12	IRR
47	Mexa	El Taref	1998	47	37	AEP
48	Beni Zid	Skikda	1993	40	20	Mixte
49	Zit Emba	Skikda	2001	117.39	43.4	IRR
50	El Agrem	Jijel	2002	33.9	21.5	AEP
51	B .Haroun	Mila	2003	960	435	Mixte
52	Kt.Medouar	Batna	2003	62	20	Mixte

VI.7.2 Méthode de détermination du taux d'envasement

Le contrôle de l'envasement des retenues permet la surveillance des ouvrages et la détermination des mesures de protection à prendre, parmi les méthodes les plus utilisées pour déterminer le taux d'envasement des retenues, on trouve :

a. Mesure à l'échosondeur

Le principe de cette méthode est de faire des relevés des fonds de la retenue le long du profil en travers choisi au préalable, les profondeurs sont enregistrées par un échosondeur à ultra-son qui se compose lui-même d'un émetteur et d'un enregistreur sur papier, le tout est transporté par un bateau ; Connaissant les profils en travers d'origine, et en utilisant les nouveaux profils en vases on peut déduire le volume de la vase déposée au fond de la retenue, cette méthode est utilisée dans les grandes profondeurs car la précision est de l'ordre de 20 cm (Ameziane K. et Ben Sid A., 2000)

b. Méthode de turbidimétrie

C'est plutôt une méthode qui donne un aperçu sur l'envasement au futur, le débit massique instantané au niveau d'une station est obtenu en multipliant la turbidité instantanée par le débit liquide instantané, on trace le turbidigramme fournissant la masse solide instantanée véhiculée en fonction de la durée de la crue. (Ameziane K. et Ben Sid A., 2000).

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

Le volume en eau mort de la retenue est déterminé en partant de l'hypothèse de son envasement avec transport solide de l'Oued et des produits de transformation des berges sous l'action du remous alternatif et des vagues, le volume d'envasement calculé d'après la formule de

TEXERONT :

$$Vm = S * Ta * \frac{t}{\gamma_s}$$

Avec:

V_m : Volume mort (m^3)

S : La superficie du bassin versant ;($S=191.7km^2$)

t : temps de fonctionnement (an)

γ_s : Poids spécifique des matériaux ;($\gamma_s=1,6T /m^3$)

Ta : taux d'abrasion ($T/Km^2/ans$).

C. Méthode de stéréophotogrammétrie

L'un des procédés actuels le plus précis pour établir les données de base est la stéréophotogrammétrie ancienne complétée au sol par un travail topographique, l'erreur commise par ce procédé dans l'évaluation des coordonnées des points particuliers, et de l'ordre de 0.1m. Une telle précision permet l'utilisation de cette technique pour déterminer le volume d'envasement des retenues par réitération de photographies semblables, à des intervalles de temps suffisant de l'ordre de 5 ans ou même de 20 ans. (Ameziane K. et Ben Sid A., 2000)

d. Méthode bathymétrique

Cette méthode est basée sur les levées bathymétriques du réservoir et les épaisseurs des sédiments déposés, suivant les profils préalablement repérés.

Dans ce chapitre on s'intéresse à la méthode de bathymétrie :

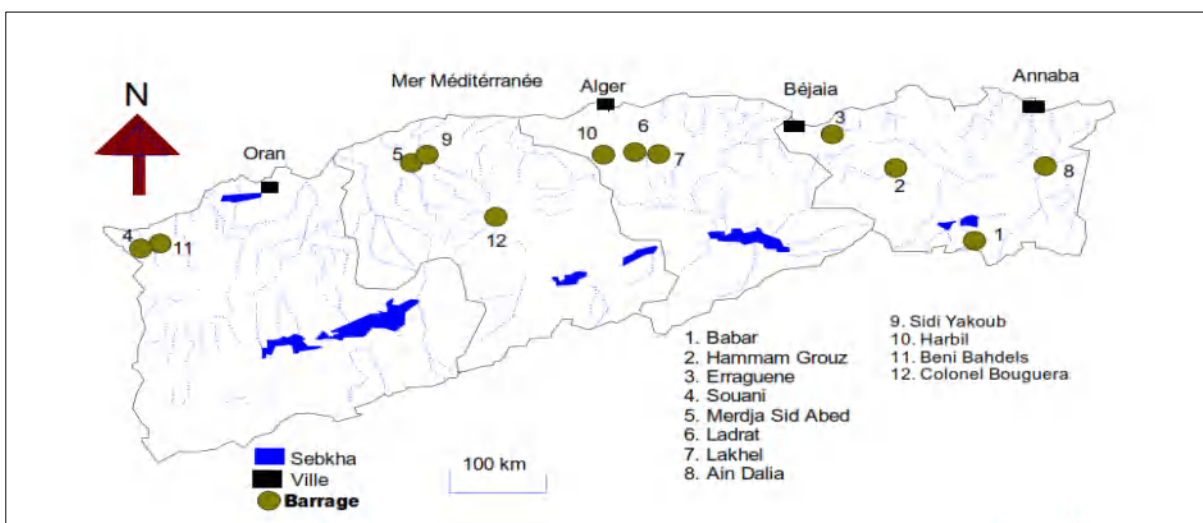


Figure 94 : Localisation des barrages moyennement envasés
(Remini, b 2017)

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

Selon Remini (2017), le barrage de Ain Dalia se classe dans la catégorie des barrages à envasement moyen dans dernier levé bathymétrique avec un comblement de 11.5 % pour l'année 2014, soit un taux moyen annuel de 0,43%/ an. De ce fait, la capacité du barrage en 2014 est de 70.5 hm³.

**Tableau 75 : Les barrages moyens envasés de l'Algérie
septentrionale (Remini, b en 2017)**

N°	Barrage	Année de la mise en eau	Capacité initiale (Million de m3)	Taux de comblement annuel (%/an)	Taux ce comblement (%) en 2014
01	Babar	1995	41	0.8	11
02	Hammam Grouz	1987	45	0.65	18
03	Erraguen	1963	200	0.4	20
04	Souani	1990	13	0.75	18.5
05	Merdja Sidi Abed	1984	54.9	0.65	20
06	Ladrat	1989	10	0.75	22.5
07	Lakhel	1985	30	0.5	14.5
08	Ain Dalia	1987	82	0.43	11.5
09	Sidi Yakoub	1985	280	0.53	15
10	Harbil	1988	1	1	25
11	Beni Bahdel	1952	63	0.25	16
12	Colonel Bouguerra	1989	13	0.85	13

VI.8 Dévasement des Barrages

VI.8.1 Moyens de lutte contre l'envasement

Les ouvrages hydrauliques qui souffrent directement des conséquences de l'érosion et du transport solides (envasement ou sédimentation) sont les barrages qui voient leurs capacités diminuées sous l'effet de ces phénomènes, les moyens de lutte contre l'envasement des retenues peuvent être classées en deux genres : les moyens préventifs et le moyen curatif.

a. Moyens préventifs

Ils regroupent tous les moyens de lutte contre l'érosion et le transport solide auxquels s'ajoutent les méthodes d'évacuation des matériaux solides et les vidanges de fond,

b. La chasse par les vidanges de fond

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

La vidange de fond du barrage a été conçue spécialement pour la chasse annuelle des sédiments de la retenue.

Dans chaque retenue menacée par le problème de la sédimentation, il est souhaitable lors de la conception du barrage d'envisager une évacuation des matériaux solides par des vidanges de fond. Il faut également prendre en compte les méthodes d'exploitation de la retenue. Parmi toutes les méthodes employées pour évacuer des matériaux, l'utilisation des vidanges de fond semble être la plus efficace.

Les vidanges de fond peuvent être utilisées pour évacuer une crue, pour vidanger une retenue dans des cas d'urgence où une vidange très rapide est nécessaire. Elles peuvent également servir à chasser des sédiments, en abaissant le niveau d'eau afin de chasser des dépôts de limon, de sable et de graviers, qui sont donc érodés par la force tractrice de l'écoulement. D'une façon analogue, on peut évacuer des courants de densité de retenues servant au stockage. Quand les vidanges de fond sont situées en dessous des prises d'eau, elles empêchent les matériaux solides de pénétrer dans la prise d'eau, et elles minimisent ainsi l'usure des turbines.

c. La chasse par vidange

La vidange d'une retenue est une méthode fréquemment employée pour freiner la sédimentation ou pour encourager une érosion des sédiments afin de récupérer du volume. L'efficacité de la chasse des sédiments dépend de la situation topographique de la retenue, de la capacité d'évacuation des vidanges, de la hauteur des vidanges, des caractéristiques des matériaux solides entrant, du type d'exploitation ; de la durée de l'opération de chasse, du débit de la chasse,

d. Surélévation des barrages

La surélévation constitue l'une des techniques qui permettent de prolonger la vie d'un barrage. L'augmentation de la hauteur de la digue permet de compenser le volume d'eau perdu en profondeur occupé par la vase. Cette opération est très encourageante (M. Kassoul, A Abdelkader, M Belorgey 1997). La surélévation d'un barrage permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée. Dans ce contexte, la surélévation des barrages existants est une solution intéressante, lorsqu'elle est techniquement réalisable c'est-à-dire lorsque la stabilité du barrage n'est pas mise en jeu. Spécialement, si elle n'entraîne pas de contestations sociales. L'évacuateur de crues doit faire passer la crue de projet sans mettre en danger le barrage et sans provoquer des conditions à l'aval qui serait plus dangereuses que celles existant avant la construction du barrage. Il existe deux méthodes pour surélever un barrage soit : en surélevant le corps du barrage ainsi que tous les ouvrages annexes, ou bien par des brochures mobiles.

En Algérie la première technique a été réalisée sur cinq barrages : Fergoug Mefrouch, Bakhada, K'sob, Zardezas. La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de retenue et donc décompenser la valeur envasée.

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

✓ Barrage El Hamiz :

L'envasement accéléré de la retenue permis à l'administration en 1883 de surélever la digue du barrage de 7m pour porter sa capacité à 23 millions de m³.

✓ Barrage de K'sob :

Du fait de la progression de l'envasement du barrage, la capacité a été réduite à moins de 4 millions de m³. En 1975, la hauteur du barrage a été portée à 43m (15m de plus) pour porter sa capacité à 31 millions de m³.

✓ Barrage de Zérdézas :

Du fait de l'envasement accéléré, la capacité du barrage est passée à 7,5 millions de m³ en 1974. En 1977, la hauteur du barrage a été portée à 45 m (12,5 m de plus). Le volume ainsi obtenu est de 31 millions de m³.

e. Réalisation de barrage de décantation

L'exemple du barrage de Boughezoul (situé à l'amont du Ghrib) qui est exploité partiellement comme réservoir de décantation au barrage de Ghrib, a permis de retenir depuis sa création environ 35 millions de m³ de vase, il a réduit ainsi l'envasement de Ghrib de près de 24%, (Remini B., 2003).

f. Le dragage

La technique consiste à extraire les sédiments déposés par des moyens mécaniques. Cette technique utilisée en Algérie depuis plus de 50 ans permet l'extraction d'un maximum de sédiments pour des pertes en eau minimales. Après désagrégation des sédiments consolidés au moyen d'une roue à augets, actionnée à partir de la plateforme de la drague, le mélange eau- sédiment est aspiré et refoulé à l'extérieur du réservoir.

La technique du dragage devient indispensable pour les barrages dont la stabilité est en danger ou dans le cas où des sites de remplacement sont inexistants. L'expérience algérienne dans ce domaine date d'une cinquantaine d'année.

Un important programme de dragage est en cours et porte sur le traitement de six (06) barrages et le dévasement de 30 Hm.

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

On a recours au dragage pour enlever les sédiments d'une retenue si :

- ✓ Les opérations de chasse ne sont pas efficaces
- ✓ La construction d'une galerie de dérivation est impossible
- ✓ L'abaissement de la retenue pour la chasse est impossible pour des raisons de conservation d'eau
- ✓ Le barrage est irremplaçable et ne peut être surélevé
- ✓ La quantité d'énergie requise pour réduire l'envasement en vidangeant la retenue représente une grande perte économique.

CHAPITRE VI : Analyse du bilan de régularisation du barrage d'Ain dalia et estimation de la vase déposée

Conclusion

La mobilisation des eaux de surface au niveau du bassin d'Ain Dalia est assurée par le barrage d'Ain Dalia qui régularise un apport important, soit 45hm³ /an. Cependant, ce dernier perd chaque année un taux de capacité de 0,43% soit environ 0.3526 hm³/an.

L'envasement des retenues est la conséquence la plus dramatique des phénomènes d'érosion. La recherche de solutions nécessite la prise en compte du problème dans son ensemble c'est-à-dire l'étude des causes du comblement et du comportement des sédiments à l'extérieur de la retenue ainsi que dans la cuvette.

Les apports liquides, conditionnés par la pluviométrie, contrôlent le niveau de remplissage du barrage. Pour l'année 2002/2003, la pluie annuelle a été de 1222 mm, les apports liquides de 21.65 hm. La capacité au début de cette année était très faible (10.3 hm). Pour l'année 2003/2004, la pluie annuelle a été de 1000,2 mm, les apports liquides de 40.215 hm³. La capacité au début de cette année étaient de 73 hm. L'apport annuel le plus faible de la période est celui de l'année de mise en eau (1990/91 : 7.8 hm³) et 1994/95 (12.46 hm³). A ces deux années correspondent respectivement des pluviométries annuelles de 428.9 mm et 488 mm.

L'évacuateur de crue : La valeur maximale 12.89 hm³ pour l'année 1991/92. La seconde valeur est de 9.38 hm³ pour l'année 1998/99. Ces valeurs correspondent à des journées de crues. La vidange de fond a fonctionné fortement pendant les années 1991/92 et 1992/93. A ces deux années correspondent des apports annuels de 45, 27 hm³ et 38,05 hm³. L'objectif est de vidanger les sédiments issus des apports de crues.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le processus de production et de transport des matières solides en suspension dans les bassins versants est complexe. La dégradation du sol est un phénomène en grande partie naturel et un mal qui est difficile à combattre. Donc Il faudrait en revanche la gérer et développer des stratégies pour surmonter ou réduire ces effets. La diversité du milieu qui caractérise le bassin de la Medjerda-Mellegue, la variation climatique, ainsi que la nature et l'intensité des processus morphogéniques qui les distinguent, génèrent un régime hydrologique souvent brutal qui a amplifié le phénomène d'érosion hydrique et le transport des sédiments vers l'exutoire et les lacs de barrages.

Au terme de notre travail, mené sur les sous bassins versants des oueds Medjerda-Mellegue, 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 axes suivants :

- Sur les frontières Algéro-tunisienne, le bassin versant de la Medjerda occupe une superficie de 7841 km². L'étude morphométrique de la zone d'étude nous a permis de montrer que la topographie est marquée par une dénivelée plus au moins importante, avec une altitude qui varie entre 1600 et 300 m.
- Il présente une forme allongée dans l'ensemble ($K_g = 1.46$ à $1,7$) il se caractérise par un relief modéré à assez fort. Selon la taille et la densité de drainage, autour de 2, et avec un temps de concentration et de 8 à 31 heures, selon la surface du bassin
- Dans son ensemble le bassin versant de la Medjerda présente une forme dendritique de son réseau hydrographique et les différents paramètres calculés, 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.
- Les caractéristiques biogéographiques montrent un faible taux d'occupation du sol par la végétation. 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'action humaine.
- D'un point de vue climatique, il est à noter que la zone d'étude se caractérise par un climat semi- aride. Les précipitations moyennes annuelles au niveau du bassin atteignent plus de 300 mm pour la période d'observation allant de 1972 à 2012. Durant cette même période, la variabilité interannuelle des modules pluviométriques ($0,26 < C_v < 0,45$) est moins marquée que la variabilité mensuelle. Cette variation est liée au caractère du climat méditerranéen du Maghreb 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.

L'insuffisance de l'équipement hydrométrique et le manque de données précises ont été largement ressentis dans l'analyse et 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. L'effet et l'agressivité des écoulements se fait aussi sentir à l'échelle saisonnière.

- Le régime saisonnier du bassin est essentiellement pluvial, il se fait sous forme de crues. L'étude des formes extrêmes de l'écoulement, a mis successivement en évidence : le caractère torrentiel des crues principalement due à la forte intensité des précipitations, leur mécanisme de propagation.

Dans notre travail on 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 d'un bassin à l'autre sur l'oued Chabro à Morsott (40 tonnes/km²/an), oued K'sob à El Azreg (70 ton/km²/an), Mellegue aval à Ouenza (158 tonnes/km²/an), Mellegue amont à l'El Aouinet (160 tonnes/km²/an) et à oued Medjerda à Ain Dalia (181 tonnes/km²/an).

L'aboutissement de l'analyse des données par modélisation s'est fait, à 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 versants est de type puissance de la forme générale ($Q_s = bQ_l^a$).

L'analyse de l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides durant les crues montre, que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles de courbe (simple, dans le sens d'une aiguille d'une montre « Clockwise », dans le sens contraire des aiguilles d'une montre « Countr-Clockwise » et forme en huit). Le barrage d'Ain Dalia régularise un apport moyen annuel de 45hm³/an, et à un taux d'envasement annuel de 0,43% /an, d'après le dernier levé bathymétrique de 2014 (11,5%).

L'étude qualitative d'état d'érosion par la méthode PAP/CAR (approche prédictive), basée sur les facteurs naturels (pente, litho-faciès, couvert végétal et occupation des sols) a permis d'analyser et d'identifier les zones à risque d'érosion dans le Bassin versant de l'Oued Medjerda-Mellegue. La carte des états érosifs montre que 78% de la superficie totale du bassin versant présente une érosion faible à très faible.

Ceci est confirmé par les résultats quantitatifs TSS des sous bassins jaugés, car les résultats obtenus sont faibles (varient de 40 tons/km²/ans à 180tons/km²/ans au niveau du bassin au barrage d'Ain Dalia) par apport aux celles citées dans des études similaires Les zones les plus menacées par le risque d'érosion se situent beaucoup plus dans la partie Nord du bassin versant sur le long de l'Oued Medjerda et le long de l'Oued Mellegue ce qui confirme le rôle important de la pente, la lithologie, et la couverture végétale dans la protection du sol contre l'érosion hydrique.

Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.B.H, 2006. Agence National des bassins hydrographiques, (Constantinois - Seybouse – 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.

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.

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 2003.*

Benkhaled. A, Remini. B, 2003. *Temporal variability of sedithent concentration and hystérésis phenomena in the Wadi Wahrane basin. Algeria. Hydrological Sciences Journal. N°48(2), pp 243-255.*

Boiffin . N J, 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. INAPG Institut National Agronomique Paris-Grignon, Grignon (FRA).*

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.*

Bourouba .M, 1996. *Essai de quantification de l'érosion actuelle a partir des mesures de turbidité en Algérie 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.*

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.*

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.*

Castany G, 1982 . *Hydrogéologie. Principes et méthodes, Paris, Dunod, 236 p.*

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.*

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., 1 993. *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.

Coutagne A. 1954. *Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. La Houille blanche.* p 360 - 369 ., déficit

Cosandey. CL, Robinson. M, 2001. *Hydrologie continentale.* Paris, Armand Colin, Collection U. Géographie, 360 p.

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.*

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.

Dutta S (2016) *.Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir*

Eastman J.R, Jin. W, Kyem P.A.K et Toledano J. 1995 *Raster procedures for multicriteria multiobjective 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.*

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.
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. 3^e 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 Mouilah 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 Algerien)* *Sécheresse* vol 18 n°1 p 39-44.

Ghenim A., Seddini A., Terfous A., (2008). *Variation temporelle de la dégradation spécifique du basin 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.

Gomer, D. Smati, A., 1991. *Quantification et modélisation du débit liquide et solide des*

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 .

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.

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. facility location to enhance public participation.* Waste Management and Research, 24(2), p105-117.

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.

KASSOUL M., Abdelkader A, Belorgey M 1997. *Caractérisation de la sédimentation des Barrages en Algérie revue des sciences de l'eau.*

Kattan. Z, Gac. J L, Probst. J L, 1987. *Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senagal 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 : Tasiujoq, Nunavik Québec, Départ Géographie, Université Montréal, p 85.*

Khanchoul . K 2006. *Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants de l'exteme Nord-Est algérien.* Thèse doctorat, Univrsité 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).*

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.

Lannani. K et Abdouni. L, 2008. *Etude go -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.*

Langbein WB, Schumm SA (1958) Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *EOS Trans Am Geophys Union* 39:1076–1084

Le Bissonnais, Y., Cros-Cayot, S., & Gascuel-Oudou, C. (2002). Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*, 22(5), 489-501.

Louamri, A., 2010. Contribution à l'évaluation des transports solides de l'Oued Bouhamdane à la station de Medjez Ammar II et au barrage de Hammam Debagh. *International Journal of Conflict Management*, 1 (1), 23–29. <http://www.igetecon.org/revista/index.php/inicio/article/download/7/170> [Accédé le 21 mars 2013]

Louamri, A., Mebarki, A., et Laignel, B., 2013. Variabilité interannuelle et intra-annuelle des transports solides de l'Oued Bouhamdane, à l'amont du barrage Hammam Debagh

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).

Mebarki A., 2005 : Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse d'Etat, Université Mentouri de Constantine, 360 p.

Mebarki A., 2007 Une Nouvelle Cartographie du Déficit Hydrique : Application à l'Est Algérien, *Bulletin des Sciences Géographiques* N°20, (Octobre 2007) pp39-45

Mebarki, A., 2009. Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est. Alger, Algérie: Office des Publications Universitaires.

Mebarki A., 2009 La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien : mobilisation et gestion durable des ressources, **ICID+182nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions** August 16-20, 2010, Fortaleza - Ceará, Brazil.

Mebarki, A., 2010. Apport des cours d'eau et cartographie du bilan hydrologique: cas des bassins de l'Algérie orientale. *Sécheresse*, 21 (4), 301–308. http://www.jle.com/e-docs/00/04/5F/E1/vers_alt/VersionPDF.pdf [Accédé le 21 mars 2013]

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 (NordOuest 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 octobre2014 (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.*

Nemouchi A, *Géographie hydrologique du bassin-versant endoréique du Chott El Hodna, Thèse d'Etat, Université de Constantine, 2000,295 p,fig.*

O.R.S.T.O.M. *Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, monographie hydrologique n°6, Tunisie.*

Ousmana, H., El Hmadi, A., Essahlaoui, A., & Bekri, H. (2017). *Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des direct ives PAP / CAR. Cas du bassin versant de l ' Oued Zgane (Moyen At las tabulaire, Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de La Terre, 39, 103–119.*

PAP/CAR1998: *Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO. 1998. pp xii+72.*

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, 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.*

Remini. B 2000, *L'envasement des barrages en Bull Réseau érosion, vol. 20, p 165-171.*

Remini, B., et Hallouche, W. (2004) *La sédimentation dans les barrages algériens. Gestion du risque Eau en pays semi-aride, La Houille Blanche, 1*

Remini, B., et Bensafia, D. (2009) *Le problème de la sédimentation dans les barrages des zones arides: Cas algériens, Atelier scientifique MED - FRIEND Rabat 11-12 décembre 2009 Université Mohamed V-Agdal, Faculté des Science*

Roche, M., 1963. *Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars. 430 p. 204 fig.*

Roose E. 1973. *Dix-sept ans de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse cote d'Ivoire. ORSTOM, Abidjan, 12 p. Thèse Doc . Ing. Fac.Sci. Abidjan, n° 20.*

Tixeront .J, Barkaloff. H, 1958. *L'évaluation de l'érosion en Tunisie. C/R de l'assemblée de L'AIHS de Toronto 1957-1958.*

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.*

Terfous A, Bouanani A, Meghnounif A. 1999. *Evaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser(N-O Algérien), 2eme séminaire maghrébin sur l'eau. Tizi ouzou, 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 aménagementhydraulique. 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.*

Scott SH (2006) *.Predicting sediment transport dynamics in ephemeral channels: a review of literature. Engineer Research and Development Center Vicksburg Ms Coastal and Hydraulics Lab*

Vörösmarty C.J, Meybeck M, Fekete B et al (2003) .*Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. Glob Planet Chang 39:169–190*

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)*

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.*