



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM



كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الري

Département d'Hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme De Master En
Hydraulique :

Option : Hydro-informatique

**Contribution à la quantification du Transport
Solide dans un cours d'eau : Cas du bassin
versant de l'Oued Sikkak (N.W algérien)**

Soutenu le : 03 / 07 / 2017

Présenté Par :

M^r MERKACHE Soufyane

&

M^r ZAIR Zine El Abidine

Devant les membres du Jury :

M^r :A. BENMANSOUR : Professeur. Univ. Abou Bekr Belkaid – Tlemcen

Président

M^r : A. BOUANANI : Professeur. Univ. Abou Bekr Belkaid

Encadreur

M^{lle} : W. FANDI : Maître assistante. Univ. Abou Bekr Belkaid

Encadreur

M^r : A.N. GHENIM : Professeur. Univ. Abou Bekr Belkaid

Examineur

M^{me} : H. DJEDID : Maître assistante. Univ. Abou Bekr Belkaid

Examinatrice

2016/2017

Remerciements

Nous tenons à remercier ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce modeste travail en particulier :

- *Nous exprimons nos vifs remerciements à Melle **Wassila FANDI**, Maitre-Assistant à l'université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, et Monsieur **Abderrazak BOUANANI**, Professeur à l'université Abou Bakr Belkaid Tlemcen qui ont bien voulu diriger ce travail et qui nous ont fait bénéficier de leurs conseils et critiques.*
- *Nous remercions, M^r le Professeur **Abdelhalim BENMANSOUR**, d'avoir accepté de présider le Jury.*
- *Nous remercions vivement les membres de jury de nous faire l'honneur de lire et de juger ce modeste Effort. Mr **Abderrahmane NEKKACHE GHENIM** et M^{me} **Hayat DJEDID**, qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail.*
- *Et surtout l'Agence Nationale des Ressources en Hydriques « **ANRH** » d'Alger et celle de Tlemcen de nous avoir permis d'accéder aux données utilisées dans ce travail.*
- *Nos sincères remerciements s'adressent à Monsieur **Jaloul SMIR** Chargé des eaux Superficiel de la Direction des Ressources en eaux de la Willaya de Tlemcen pour son soutien pour obtenir certaines informations concernant notre élaboration des données.*

Dédicaces

Mr Merkache Sofiane

Je dédie ce mémoire

*A mes très chers parents qui m'ont soutenu dans mes longues
années d'études et qui m'ont donnée du courage que dieu les
bénisse.*

*A mon frère et mes sœurs qui m'ont donné beaucoup de conseils
que dieu les protège.*

A tous ceux qui m'ont soutenu pendant ces cinq années d'étude.

A tous mes chers amis

2016-2017

Dédicaces

Mr Zair Zine El Abidine

Je dédie ce mémoire

*A mes très chers parents, ma mère et mon père que dieu me les
garde.*

*A mes frère et mes sœurs qui m'ont donné beaucoup de conseils
que dieu les protège.*

A mes grands parents

A ma belle famille

A tous mes chers amis

2016-2017

Résumé :

Actuellement, le phénomène de l'érosion devient de plus en plus important dans les bassins-versants algériens. L'érosion hydrique est la forme la plus répandue dans les bassins algériens. Elle dépend de la résistance des sols et de l'agressivité climatique. L'intensité de l'érosion se produit principalement en période de crue, où une quantité importante de sédiments est produite par les bassins. L'érosion, le transport des sédiments et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, de l'envasement des barrages et des dommages portés aux infrastructures dont les coûts sont considérables. Dans un souci de préservation de la ressource en eau déjà rare en ce début de siècle et pour mieux cerner le problème de l'érosion hydrique et les processus qui engendrent ce phénomène, on s'est intéressé au bassin versant, drainé par l'oued Sikkak (217,5 km²). L'approche du transport solide dans cette étude a été entamée par une analyse détaillée de séries de débits liquides et solides recueillies aux stations hydrométriques d'Ain Yousef (1972/73 – 1998/99) et de Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10). Dans un but de quantification spatio-temporelle des apports solides en suspension qui transitent le long de l'oued, on s'est intéressé à établir un modèle statistique basée sur l'analyse de la variabilité de la charge en suspension par rapport aux fluctuations des débits d'écoulement suivant des échelles de temps différentes. Le modèle en puissance a été retenu comme le plus représentatif du phénomène car les coefficients de corrélation ont été encourageants variant de 0.8 à 0.9. Ce modèle a précisé l'interrelation entre les différents paramètres hydrologiques et permet d'appréhender les facteurs explicatifs des processus de l'érosion hydrique dans cette zone semi-aride de l'Algérie entraînant l'envasement des réservoirs. Cette étude, a aussi pour objectif de cartographier les zones vulnérables à l'érosion par le modèle (USLE) dans le bassin de Sikkak, en élaborant un Système d'information Géographique (SIG) tenant compte des types de sol, des réseaux de drainage et du sens de circulation et intégrant les données spatiales de télédétection. Afin d'atteindre l'objectif de calculer le Facteur de l'équation (USLE), on s'est basé sur des données de précipitations annuelles et journalières, le modèle numérique de terrain et l'imagerie satellitaire. Les résultats obtenus mettent en évidence les phénomènes hydrologiques et leurs effets sur les ressources en eau.

Mots clés : érosion hydrique, transport solide, USLE, bassin versant, quantification, débit liquide, débit solide, Oued Sikkak, Algérie.

Abstract :

Nowadays, erosion phenomenon is becoming increasingly important in the Algerian catchment watersheds. Hydric erosion is the most extensive form in the Algerian watersheds. It depends on the soils resistance and climate aggressivity. Erosion intensity occurs mainly when there are floods, where a significant amount of sediments is being generated by the Watersheds. Erosion, sediment transport and sedimentation are the cause of the degradation of agricultural soils, siltation of dams and damaged substructures the costs are considerable. The priority is to preserve the few resource of water in this century and also to operate for understanding the phenomenon of solid transport. We have selected the river basin of wadi Sikkak (217,5 km²). A synthesis bibliographical of genesis suspended sediment transport was reached. In addition we approach the process that constitutes a complex system generated by mechanisms which operate in the whole of the catchment area. Detailed quantitative and qualitative analyses of the liquid flows and the bed loads collected at Ain Youssef's gauging station between. This analysis made it possible to investigate the relations between the solid transport of the wadi and its flow. We propose a statistical approach to quantify the solid yield at gauging site. The methodological approach adopted consists in finding a regressive model capable of explaining the sediment load as a function of the discharge measured by studying this relation at various scales: annual, seasonal, monthly and especially at flood event. The power relationship has been the best because the fact of the correlating coefficients of the models $Q_s = f(Q_L)$ are between 0.8 and 0.9. This model allowed knowing factors which induced process and mechanisms of soil erosion in semi aride basin. This study aims to map areas vulnerable to erosion using the USLE model in the Sikkak's Watershed, developed a Geographic Information System (GIS) into account soil types, networks of drainage and traffic direction integrating remote sensing and spatial data. The results highlight the hydrographic phenomena and their effects on water resources. To achieve the objective of calculating the RUSLE equation Factor, it was based on annual and daily climate data, the digital elevation model (DEM) and satellite imagery.

Key Words: water erosion, sediment transport, watershed, quantification, USLE, liquid flows, Solid flows, wadi Sikkak, Algeria.

ملخص:

حاليا، ظاهرة التعرية أصبحت ذات أهمية متزايدة في أحواض الصب الجزائرية. التعرية المائية هي الشكل الأكثر شيوعا في الأحواض الجزائرية. ان ذلك يعتمد على مقاومة التربة والعدوانية المناخية. شدة التعرية تحدث أساسا أثناء الفيضانات، حيث أن كمية كبيرة من الرواسب قد تنتجتها الأحواض. التعرية، نقل الرواسب والترسيب هي السبب في تدهور التربة الزراعية، وتؤدي أيضا تراكم الطمي في السدود والبنية التحتية حيث تؤدي هذه الأضرار إلى تكاليف ضخمة.

في قلق الحفاظ على الموارد المائية التي ستكون نادرة بالفعل في هذا القرن الجديد وفهم أفضل لمشكلة التعرية والعمليات التي تولد هذه الظاهرة، نهتم اليوم بحوض الصب سكاك في دراسة نقل الرواسب التي ستكون عبر تحليل مفصل لسلسلة من التدفقات المائية و الصلبة التي تم جمعها في المحطات الهيدرومترية عين يوسف في الفترة الممتدة من 1972 إلى 1999 و محطة سيدي موسى لفترة ما بين 2000 و 2010. لهدف التكميم الزمني والمكاني للرواسب العالقة على طول الوادي. كان هناك اهتمام في نموذج إحصائي على أساس تحليل التباين فيما يتعلق بالتغيرات في تدفق معدلات الرواسب العالقة وفقا لجداول زمنية مختلفة وخاصة خلال أحداث الفيضانات تم اختيار نموذج القوة باعتباره الأكثر تمثيلا لهذه الظاهرة لأن معاملات الارتباط تتراوح 0.8 و 0.9.

هذا النموذج سوف يحدد العلاقة المتبادلة بين العوامل الهيدرولوجية المختلفة، وسوف نفهم عملية التعرية المائية الكامنة في المنطقة الشبه القاحلة في الجزائر.

هذه الدراسة تهدف أيضا إلى نمذجة الخريطة المتعلقة بالمناطق المعرضة للتعرية باستعمال المعادلة العالمية الخاصة بالتعرية المائية للتربة في حوض الصب سكاك ووضع نظام المعلومات الجغرافية في حساب خصائص وأنواع التربة، شبكات الصرف لها وأنظمة المرور ودمج البيانات المكانية الاستشعار عن بعد. النتائج تسلط الضوء على الظواهر الهيدروغرافية وأثارها على الموارد المائية ويستند هذا النموذج أيضا إلى البيانات المناخية السنوية واليومية، ونموذج التضاريس الرقمية وصور الأقمار الصناعية.

كلمات مفتاحية: التعرية المائية، نقل الرواسب العالقة، حوض الصب، تكميم، المعادلة العالمية الخاصة بالتعرية المائية، التدفق المائي، التدفق الصلب، وادي سكاك، الجزائر

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure.I.1 : Situation géographique du bassin versant d'Oued Sikkak.....	(22)
Figure.I.2 : Réseaux Hydrographique du Bassin Versant d'Oued Sikkak.....	(24)
Figure.I.3 : Courbes Hypsométriques et histogramme des fréquences altimétriques du bassin versant de l'oued Sikkak.....	(28)
Figure.I.4 : Carte Hypsométrique du Bassin Versant d'Oued Sikkak.....	(29)
Figure I-5 : Profil en long d'Oued Sikkak.....	(33)
Figure.I.6 : Carte d'occupation de sol du bassin versant d'oued Sikkak.....	(35)
Figure.I.7 : Carte géologique du bassin versant de l'oued Sikkak.....	(37)
Figure. I.8 : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes Plaines.....	(40)

Chapitre II

Figure.II.1 : Répartition des stations pluviométriques au niveau du bassin versant de l'Oued Sikkak.....	(47)
Figure.II.2 : Précipitations moyennes annuelles aux stations étudiées.....	(48)
Figure.II.3 : Carte en isohyètes de bassin Sikkak (1974-2010).....	(49)
Figure.II.4 : Variation annuelles des précipitations aux différentes stations(1974-2010).....	(50)
Figure.II.5 : Variation annuelle des précipitations moyennes aux stations étudiées (1974-2010).....	(51)
Figure.II.6 : Variation du coefficient pluviométrique au niveau des stations pluviométriques étudiées (1974-2010).....	(52)
Figures.II.7 : Ajustement des précipitations à une loi normale pour les stations de Hennaya (1974-2012), Tlemcen (1964-2010), LalaSetti(1956-2010)etdeMefrouche(1943-2015).....	(55)
Figure.II.8 : Variabilité mensuelle des précipitations dans les quatre stations pluviométriques (1974 -2010).....	(57)
Figure.II.9 : Répartition des moyennes mensuelles dans le bassin versant d'oued Sikkak (1974 -2010).....	(58)
Figure.II.10 : Répartition mensuelle des coefficients de variation dans le bassin versant d'oued Sikkak (1974 -2010).....	(58)
Figure.II.11 : Distribution des précipitations saisonnières au bassin d'oued Sikkak (1974 -2010).....	(60)
Figure.II.12 : Variation saisonnière des précipitations dans le bassin d'Oued Sikkak.....	(60)
Figure.II.13 : Variation annuelle des températures moyennes, maximales et minimale au niveau de la station de Zenata (1980-2010).....	(62)
Figure.II.14 : Diagrammes pluvio-thermiques.....	(64)
Figure.II.15 : Carte de localisation des deux stations Sidi Moussa et Ain Youssef.....	(67)
Figure.II.16 : variation interannuelle des débits moyens annuels (m3/s) au niveau d'oued Sikkak (1999/2000 -2009/2010).....	(69)
Figure.II.17 : droite d'ajustement des débits à la loi log normale.....	(71)
Figure.II.18 : coefficient d'hydraulicité.....	(73)
Figure.II.19 : Répartition des débits mensuels à la station d' Ain Youssef (1972-1999).....	(75)
Figure.II.20 : Répartition des débits mensuels à la station de Sidi Moussa (1999-2010).....	(75)
Figure.II.21 : Valeurs du coefficient de variation à l'échelle mensuelle.....	(76)
Figure.II.22 : Variation interannuelles des précipitations (Tlemcen 1974-2010) et débit de l'oued Sikkak (Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10).....	(77)
Figure.II.23 : Variation des précipitations et débit mensuels (Ain Youssef (1973/74 à 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10) de l'oued Sikkak.....	(78)
Figure.II.24 : Relation liant les débits liquides aux précipitations annuelles de l'oued Sikkak (1973/74 – 2009/10).....	(78)
Figure.II.25 : Relation liant les débits liquides aux précipitations mensuelles de l'oued Sikkak (1973/74 – 2009/10).....	(79)

Chapitre III

Figure.III.1 : Modes du transport solide.....	(83)
Figure.III.2 : Localisation des deux stations hydrométriques (Ain Youssef et Sidi Moussa).....	(85)
Figure.III.3 : Apports liquides et solides annuels dans l'oued Sikkak.....	(89)
Figure.III.4 : Apports liquides et solides mensuels d'oued Sikkak à Ain Youssef (1972/73 – 1998/99).....	(91)
Figure.III.5 : Apports liquides et solides mensuels de Sikkak à Sidi Moussa(1999/00 – 2009/10).....	(91)
Figure.III.6 : Apports solides mensuels en pourcentage de l'apport annuel à Ain Youssef (1972/73-199/99), et à Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10).....	(92)
Figure.III.7 : Répartition Saisonnière des apports liquides et solides de l'oued Sikkak (Station d'Ain Youssef : de 1972/73 à 1998/99).....	(95)
Figure.III.8 : Répartition Saisonnière des apports liquides et solides de l'oued Sikkak (Station de Sidi Moussa : de 1999/00 à 2009/10).....	(98)
Figure.III.9 : Relations entre les débits liquides et solides instantanés de l'oued Sikkak à Ain Youssef (1972/73-1998/99).....	(99)

Figure.III.10: Relations entre les débits liquides et solides instantanés de l'oued Sikkak à Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)	(101)
Figure.III.11 : Relation débits solides débit liquides à l'échelle saisonnière à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99).	(101)
Figure.III.12 : Relation débits solides débit liquides à l'échelle saisonnière à Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10).	(102)
Figure.III.13 : Relation concentration-débits liquides à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10).	(104)
Figure.III.14 : Relation concentration-débits liquides à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) : Automne-Hiver-Printemps-Eté.	(104)
Figure.III.15 : Relation concentration-débits liquides à Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10) : Automne-Hiver-Printemps-Eté.	(107)
Figure.III.16 : Modèles des relations concentration débit liquide (Williams,G.P., 1989).	(110)
Figure.III.17 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (15 Novembre 2000) – Classe II.	(110)
Figure.III.18 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (14 Octobre 2000) Classe II.	(111)
Figure.III.19 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (2, 3 ,4 et le 5 Janvier 2004) Classe III.	(111)
Figure.III.20 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (29, 30, 31 Janvier et le 1 Février 2004) – Classe III.	(111)
Figure.III.21 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (14, 15 ,16 et le 17 Mars 2004) – Classe II.	(112)
Figure.III.22 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (9 Septembre 2009) – Classe II.	(112)

Chapitre IV

Figure.IV.1 : Le tracé distinct formé par les eaux de ruissellement est un signe d'érosion en rigoles ayant emporté le sol.	(119)
Figure.IV.2 : Sans intervention, l'érosion en rigoles peut mener à l'érosion par ravinement.	(120)
Figure.IV.3 : érosion en nappe.	(121)
Figure.IV.4 : L'érosion des berges résulte du sapement et de l'affouillement des berges des cours d'eau naturels et des canaux de drainage	(122)
Figure.IV.5 : Facteur R du bassin versant d'oued Sikkak.	(130)
Figure.IV.6 : les trois codes des sols du bassin versant d'oued Sikkak.	(132)
Figure.IV.7 : Triangle des textures	(133)
Figure.IV.8 : Facteur K du bassin versant d'oued Sikkak	(135)
Figure.IV.9 : Carte des Pertes en Terres du Bassin Versant d'oued Sikkak	(137)
Figure.IV.10 : Facteur LS du bassin versant d'oued Sikkak.	(138)
Figure.IV.11 : Facteur C du bassin versant d'oued Sikkak.	(140)

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau.I.1 : Caractéristiques de forme du bassin versant d'Oued Sikkak.	(23)
Tableau.I.2 : Paramètres morphométriques du Réseau hydrographique d'oued Sikkak.	(26)
Tableau.I.3 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Sikkak.	(27)
Tableau.I.4 : Les Altitudes Caractéristiques du Bassin Versant d'Oued Sikkak.	(30)
Tableau.I.5 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM.	(31)
Tableau.I.6 : Classification du relief selon DS par l'ORSTOM.	(31)
Tableau.I.7 : Indice de pente et Relief du Bassin versant de Sikkak.	(23)
Tableau.I.8 : Valeurs de coefficient de torrentialité et du temps de concentration des eaux du Bassin Versant d'Oued Sikkak.	(32)
Tableau.I.9 : calcul des pentes de chaque Tronçon.	(32)
Tableau.I.10 : Distribution du couvert végétal dans le bassin d'Oued Sikkak.	(34)
Tableau.I.11 : Principaux Paramètres du bassin versant d'oued Sikkak.	(42)

Chapitre II

Tableau. II.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques.	(47)
Tableau.II.2 : Caractéristique des précipitations annuelles aux différentes stations.	(48)
Tableau.II.3 : Représentation du nombre d'années humides et sèches au niveau des quatre stations.	(51)
Tableau.II.4 : paramètres de position des précipitations.	(53)
Tableau.II.5 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques Aux différentes stations.	(54)
Tableau.II.6 : Ajustement des précipitations annuelles des stations étudiées.	(55)
Tableau.II.7 : Valeurs des précipitations estimées pour les fréquences décennales, centennales et millénaires pour les années humides.	(56)
Tableau.II.8 : Les valeurs des pluies moyennes mensuelles (1974 -2010).	(56)
Tableau.II.9 : Précipitations saisonnières aux différentes stations (1974 -2010).	(59)
Tableau.II.10 : Températures moyennes, maximale et minimale annuelles à la station de Tlemcen (1981-2010).	(61)
Tableau.II.11 : Paramètres statistiques des températures annuelles (1980-2010).	(62)
Tableau.II.12 : Moyennes mensuelles des températures à la station de Zenata – Tlemcen (1981-2010).	(63)
Tableau.II.13 : Caractéristique des stations hydrométriques et périodes de mesure... (66)	(66)
Tableau.II.14 : Débits moyens annuels (m3/s) à la station d'Ain Youssef et Sidi Moussa (1972/1973-1998/1999).	(68)
Tableau.II.15 : Caractéristiques statistiques des débits annuels (1925/26-2009/10).....	(69)
Tableau.II.16 : Caractéristiques statistiques des débits annuels (1925/26-2009/10).....	(70)
Tableau.II.17 : Résultats du test du χ^2	(70)
Tableau.II.18 : fréquences pour l'ajustement de la droite d'HENRY.	(71)
Tableau.II.19 : Débits décanale ; centennale et millénaire.	(72)
Tableau.II.20 : valeurs caractéristiques des modules au niveau de bassin versant d'Oued Sikkak.	(72)
Tableau.II.21 : valeurs caractéristiques des modules.	(73)
Tableau.II.22 : Répartition des Débits moyens mensuels à la station d'Ain Youssef (1972/73 - 1998/99).	(74)
Tableau.II.23 : Répartition des Débits moyens mensuels à la station de Sidi Moussa (1999/00 - 2009/10).	(74)
Tableau.II.24 : Répartition des coefficients de variation des débits mensuels aux stations de Ain Youssef et Sidi Moussa.	(76)

Chapitre III

Tableau.III.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques et périodes de mesure.....	(85)
Tableau.III.2 : Valeurs des apports liquides, solides et des dégradations spécifiques au niveau d'oued Sikkak au niveau de la station d'Ain Youssef et celle de Sidi Moussa.....	(88)
Tableau.III.3 : Apports liquides et solide moyens mensuels à oued Sikkak (Station Ain Youssef (1972-1999), Station de Sidi Moussa, 1999 /2010).	(90)
Tableau.III.4 : Charges liquides et solides mesurées lors de quelques crues. A oued Sikkak de la période (1998/99 – 2009/10).	(92)
Tableau.III.5 : Tableau 66 : Apports liquides et solides moyens saisonniers à l'oued Sikkak (Station de Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10).	(93)
Tableau.III.6 : Valeurs de quelques paramètres d'écoulement et du transport solide dans le bassin versant d'oued Sikkak.	(97)
Tableau.III.7 : Paramètres de la relation débits solides – débits liquides.	(99)
Tableau.III.8 : Modèle saisonniers liant les débits solide en suspension aux débits liquides.	(100)
Tableau.III.9 : Paramètre du modèle en puissance ; r : coefficient de corrélation ; n : Taille d'échantillon.	(100)
Tableau.III.10 : Relation concentration-débits liquides à l'échelle saisonnière à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99).....	(103)
Tableau.III.11 : Classes des relations C – Ql.	(106)
Tableau.III.12 : Fréquences des différents classe d'évolution de la relation C-Ql des crues au niveau d'oued Sikkak (Station de Sidi Moussa de 1999/00 à 2009/10).....	(109)

Chapitre IV

Tableau.IV.1 : Facteur LS.	(126)
Tableau.IV.2 : valeurs de facteur R aux différentes stations (1974-2010).	(129)

Tableau.IV.3 : Résultats de facteur R en fonction de la surface du bassin.	(131)
Tableau.IV.4 : Les données depuis « Harmonized World Soil Database v.1.21».....	(132)
Tableau.IV.5 : Facteur K.	(133)
Tableau.IV.6 : Pente globale moyenne.	(136)
Tableau.IV.7 : Coefficients correspondants aux différents types d'occupation du sol.	(139)
Tableau.IV.8 : Répartition des classes de perte en sol dans le bassin Sikkak.....	(143)

SOMMAIRE

RESUME	5
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX	11
INTRODUCTION GENERALE	17
CHAPITRE I – PRESENTATION DUBASSIN VERSANT	20
I - ETUDE MORPHOMETRIQUE.....	21
I.1 – INTRODUCTION.....	21
I.2 - SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE SIKKAK.....	21
I.3 - CARACTERISTIQUES DE FORME.....	22
I.3.1 - Indice de compacité de Gravelius.....	22
I.3.2 - Rectangle Equivalent.....	23
I.3.3 - Coefficient de Circularité.....	23
I.4 - ETUDE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	23
I.4.1 - Densité de drainage.....	25
I.4.2 - Rapport de confluence.....	25
I.4.3 - Rapport de longueur.....	25
I.4.4 - Fréquence des cours d'eau.....	26
I.5 - ETUDE DU RELIEF.....	26
I.5.1 – Hypsométrie.....	26
I.5.2 - Altitudes caractéristiques.....	28
I.6 - LES INDICES DE PENTE ET RELIEF.....	30
a- Indice de pente de Roche I_p	30
b- Indice de pente globale I_g	30
c- Dénivelée spécifique D_s	31
I.6.1 - Coefficient de torrentialité.....	31
I.6.2 - Temps de concentration.....	32
I.6.3 - Etude du profil en long.....	32
I.7 - SOL ET VEGETATION.....	33
II- CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	36
II.1 – INTRODUCTION.....	36
II.2 - LES FORMATIONS SECONDAIRES.....	38
a. Les grés de Boumediene.....	38
b. Les calcaires de Zarifet.....	38
c. Les Dolomies de Tlemcen.....	38
d. Les marno-calcaires de Raourai.....	38
e. Les calcaires de Lato.....	38
f. Les Dolomies de Terni.....	38
g. Les marno-calcaires de Hariga.....	39
h. Les marno-calcaires d'Ouled Mimoune.....	39
i. Les argiles de Lamoricière.....	39
j. Les grés de Berthelot.....	39
II.3 - LES FORMATIONS TERTIAIRES.....	39
a. L'Eocène.....	40
b. Le Miocène marin.....	40
c. Le Pliocène.....	41
II.3.1 - Les formations quaternaires.....	41
a- les alluvions anciennes.....	41
• Le complexe de piémont.....	41
• Les travertins.....	41
• La croûte calcaire.....	41
• Le glacis de pente Soltanienne.....	41

b- Les alluvions récentes	41
III – Conclusion.....	42
CHAPITRE II – HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT D’OUED SIKKAK	43
I - LES PRECIPITATIONS.....	44
I.1 – Introduction.....	44
I.2 - APERÇUE SUR LE CLIMAT DE L’ALGERIE.....	45
I.3 - APERÇUE SUR LE CLIMAT DE LA TAFNA.....	45
I.4 - ETUDE DE LA PLUVIOMETRIE.....	46
I.4.1- Répartitions des stations pluviométriques dans la zone d’étude.....	46
I.4.2 - Variation annuelle des précipitations.....	48
I.4.2.1 - Coefficient pluviométrique	51
I.4.2.2 - Etude statistique des précipitations annuelles.....	53
I.4.3 - Variation mensuelle des précipitations	56
I.4.3.1 - Coefficient de variation.....	58
I.4.4 - Variation saisonnière des précipitations.....	59
I.5 - ETUDE DES TEMPERATURES	61
I.5.1 - Introduction	61
I.5.2 - Les températures annuelles.....	61
I.5.3 - Les températures mensuelles.....	63
I.5.4 - Diagrammes pluvio-thermiques.....	63
I.6 – CONCLUSION.....	64
II - LES ECOULEMENTS.....	66
II.1 - INTRODUCTION	66
II.2 - RÉGIME HYDROLOGIQUE.....	67
II.2.1 - Débits moyens annuels.....	67
II.2.1.1 - Etude statistique des débits annuels.....	69
II.2.1.1.1 - Ajustement par la loi log normale.....	70
II.2.1.1.2 - Test graphique.....	70
II.2.1.2 - L'irrégularité inter annuelle des débits moyens annuels.....	73
II.2.1.2.1 - Coefficient d'immodération.....	73
II.2.1.2.2 - Coefficient de variation.....	74
II.2.2 - Débits moyens mensuels	74
II.2.2.1 - Coefficient de variation	76
II.3 - EVOLUTION DES DEBITS LIQUIDE EN FONCTION DES PRECIPITATIONS.....	76
II.3.1 - Variation interannuelle.....	76
II.3.2 - Variations mensuelles.....	77
II.4 – CONCLUSION.....	79
CHAPITRE III – ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE	81
I - INTRODUCTION.....	82
II - GENERALITES	83
II.1- Le transport solide en suspension.....	84
II.2- Le transport solide par charriage.....	84
II.3- La saltation	84
III- PRESENTATION DES DONNEES	84
IV- CALCUL DES APPORTS.....	86
IV.1- Apports annuels	86
IV.2 - Apports mensuels	90
IV.3 - Apports saisonniers	93
IV.4 – Interprétations.....	97
V- MODELES D’EVOLUTION DES PARAMETRES DEBITS LIQUIDES, CONCENTRATIONS ET DEBITS SOLIDES.....	97
V.1 - Evolution des débits solides en fonction des débits liquides.....	98
V.1.1 - Analyse annuelle	98
V.1.2 - Analyse saisonnière	99
V.2 - Evolution des concentrations en fonction des débits liquides	102

V.2.1 - A l'échelle annuelle	102
V.2.2 - A l'échelle saisonnière.....	103
V.3 - Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides durant les crues.	105
V.3.1- Méthodologie	105
a)- Modèle Classe I.....	107
b)- Modèle classe II.....	107
c)- modèle classe III	108
d)- le modèle classe V.....	109
V.3.2- Application au bassin du Sikkak.....	109
VI - CONCLUSION	112
CHAPITRE IV – ESTIMATION DU L'ÉROSION PAR LE MODELE USLE	113
I- INTRODUCTION.....	114
II- GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉROSION.....	114
II.1 – Définition.....	114
II.2 - L'érosion hydrique.....	115
II.2.1 – Définition.....	115
II.2.2 - Facteurs et mécanisme	116
A)- Intensité et agressivité des précipitations	116
B)- Ruissellement.....	117
a) Infiltration.....	117
b) Détention superficielle et rugosité du sol.....	118
c) Pente et longueur de pente.....	118
d) Couvertvégétal.....	118
C)- Etat hydrique initial.....	118
II.2.3 - Type d'érosion hydrique.....	119
II.2.3.1 - Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles.....	119
II.2.3.2 - Érosion par ravinement.....	120
II.2.3.3.Érosion en nappes.....	120
II.2.3.4.Érosion des berges.....	121
III- QUANTIFICATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE	122
III.1 - Méthodes empiriques d'estimation de la dégradation spécifique.....	122
III.1.1- Formule de la Sogréah.....	122
III.1.2- Formule de Tixeront.....	122
III.1.3- Formule de Fournier	123
III.1.4- Formule de l'ANRH.....	123
III.1.5- Formule de Wischmeier et Smith (1978).....	123
III.2 - Formule de Wischmeier et Smith (1978).....	124
III.2.1.Toile de fond	124
III.2.2. Evaluation de l'érosion hydrique par le modèle USLE.....	124
IV-DONNÉES ET MATÉRIELS UTILISÉS	127
IV.1.Documents	127
IV.2.Matériels	127
V- MÉTHODOLOGIE.....	127
V.1 - Élaboration des données.....	128
V.2 - Estimation des facteurs (R ; LS ; K ; C ; P).....	128
V.2.1 - Agressivité de la pluie, R	128
V.2.2 - Erodibilité des sols, K.....	131
V.2.3 - Le facteur topographique, LS.....	136
V.2.4 - Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales, C.....	139
V.2.5 - Le facteur aménagement anti - érosif, P.....	141
VI- CONCLUSION	144
CONCLUSION GENERALE	146
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	152
NOTATIONS ET ABREVIATIONS	163
ANNEXE	166

INTRODUCTION GENERALE

De nombreux phénomènes, tels que l'érosion hydrique, décapent continuellement les sols et les roches à la surface des continents. Les particules solides ainsi libérées sont entraînées par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau, les retenues d'eau, les dépressions intracontinentales ou jusqu'à la mer. Les matériaux ainsi transportés, en suspension ou par charriage, peuvent alors être quantifiés.

La quantification de l'érosion spécifique d'un bassin versant et du transport solide des cours d'eau a fait l'objet de plusieurs études. L'alluvionnement des retenues de barrages et la dégradation des bassins versants sont un phénomène préoccupant en Algérie, à l'instar des pays du Maghreb. Ce phénomène est dû principalement à une érosion très active dans les bassins versants algériens et maghrébins. (Achite et al, 2004).

L'estimation du taux de sédimentation des barrages et des transports solides au niveau des bassins versants nécessite une bonne connaissance des apports solides. Ces derniers dépendent aussi bien des contraintes topographiques et granulométriques imposées au fond des vallées que de la nature et du volume des apports liquides et solides fournis au réseau d'écoulement. En plus de cette complexité, le manque de données constitue un handicap majeur dans l'évaluation et la prévision des charges solides. Cet état de fait a conduit de nombreux chercheurs à proposer des modèles de prévision générale (pour un ensemble de bassins) et des modèles particuliers (propres à un bassin donné). (Meddi H., 1993).

La nécessité de la quantification des apports solides sont accentuées par la contrainte liée au manque de données, ce qui a poussé plusieurs chercheurs à proposer des modèles de prévision spécifiques à leurs régions d'études. Suite à l'acuité du phénomène, beaucoup de chercheurs algériens (Bouanani, 2004 ; Bouanani et al, 2003). ont essayé d'exploiter les données disponibles en vue d'étudier le phénomène du transport solide en suspension dans les bassins versant méditerranéens algériens afin d'obtenir des modèles qui aident à l'estimation de la charge en suspension.

Ce domaine présente une multitude de formules empiriques dont le domaine d'application et les conditions de validité sont souvent restreintes. Il a été admis que la meilleure méthode de quantification des apports solides, et donc de l'érosion d'un bassin versant donné, passe par la mesure de l'alluvionnement des retenues des

barrages ou par la mesure de la matière en suspension dans une station hydrométrique. (Tourki, M., 2010).

A cet effet une contribution à la quantification de l'érosion et du transport solide à l'échelle du bassin versant de Sikkak a été proposée dans le cadre de ce travail

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre : aborde une présentation générale du bassin versant d'oued Sikkak (situation géographique, étude des caractéristiques physiques et morphométriques, et contexte géologique).

Dans le deuxième chapitre : On s'intéresse à décrire les paramètres hydrologiques du bassin versant en utilisant les données des précipitations, des débits, ainsi qu'une étude statistique afin de déterminer la loi d'ajustement de la distribution des précipitations et des débits.

Le troisième chapitre : porte sur l'Etude du transport solide, il comprend des généralités sur le Transport Solide, et une estimation de Transport Solide en suspension à oued Sikkak a été présentée.

Dans le quatrième chapitre : cette partie comporte l'évaluation de quantité d'érosion à l'aide d'un modèle empirique de perte en terre de Wischmeier et Smith (USLE)

Enfin une conclusion générale sera donnée à la fin du travail.

CHAPITRE I

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK

I - ETUDE MORPHOMETRIQUE

I.1 - INTRODUCTION

Les indices morphométriques classiques ont été les toutes premières mesures créées par les géomorphologues afin de quantifier l'influence théorique de la morphologie des bassins versants sur leur réponse hydrologique de surface. (Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., 2007).

La plupart des méthodes se trouvent encore aujourd'hui dans les ouvrages d'hydrologie de référence (Lambert, 1996 ; Cosandey et Robinson, 2000). Les apports de ces indices sont considérables puisqu'ils ont constitué les premières formes de réflexion menées sur le transfert d'échelle en géomorphologie (Hauchard, 2001). Ils ont aussi posé les bases théoriques de tout un courant de pensée en hydrologie, notamment à la suite des travaux d'Horton (1945) qui montrent la tendance naturelle à la concentration de l'écoulement (Cosandey, 2003). Les indices morphométriques peuvent donc être un important sujet d'investigation dans la compréhension du dynamisme d'une rivière, tout comme l'hydrologie l'est pour l'analyse d'un bassin versant. (Veltri et al, 1996).

L'utilisation de la morphométrie l'un des moyens les plus importants pour comprendre l'influence des différents facteurs physico-géographiques avant l'estimation des transports solides dans le bassin versant d'Oued Sikkak.

La disposition du réseau hydrographique est souvent le miroir de certains traits de l'évolution des phénomènes structuraux. Il fournit une première approximation de la sensibilité lithologique vis à vis de l'érosion. Le réseau hydrographique du bassin versant a été réalisé sur la base du modèle numérique de terrain (MNT).

La délimitation du bassin versant a été réalisée à l'aide du logiciel Arc Gis permettant la modélisation du relief et de la surface de la zone d'étude tout en générant un modèle numérique de terrain (MNT).

I.2 - SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE SIKKAK

Le bassin versant de l'oued Sikkak est un sous bassin de la Tafna. Il prend naissance sur le plateau de Terny à la source de Aïn Rhanous, c'est un affluent rive gauche de l'oued Isser avec lequel il conflue au nord de Aïn Youcef (Fig. I-1). Le bassin versant d'Oued Sikkak occupe une surface de 217.52 km², il est limité :

- Au sud par les Djebels Nador et Bouladour.
- A l'est par les Djebels Er Ramlya, Ouakrif et Tabeldaout.
- A l'ouest, par le Djebel Tiffatisset et le plateau de Zenata.
- Au nord par le Djebel Toutlait.

Le bassin versant de l'oued Sikkak, se situe sur les cartes topographiques au 1/50 000 de Tlemcen, de Terny et de Bensekrane. (Fandi.W, 2010).

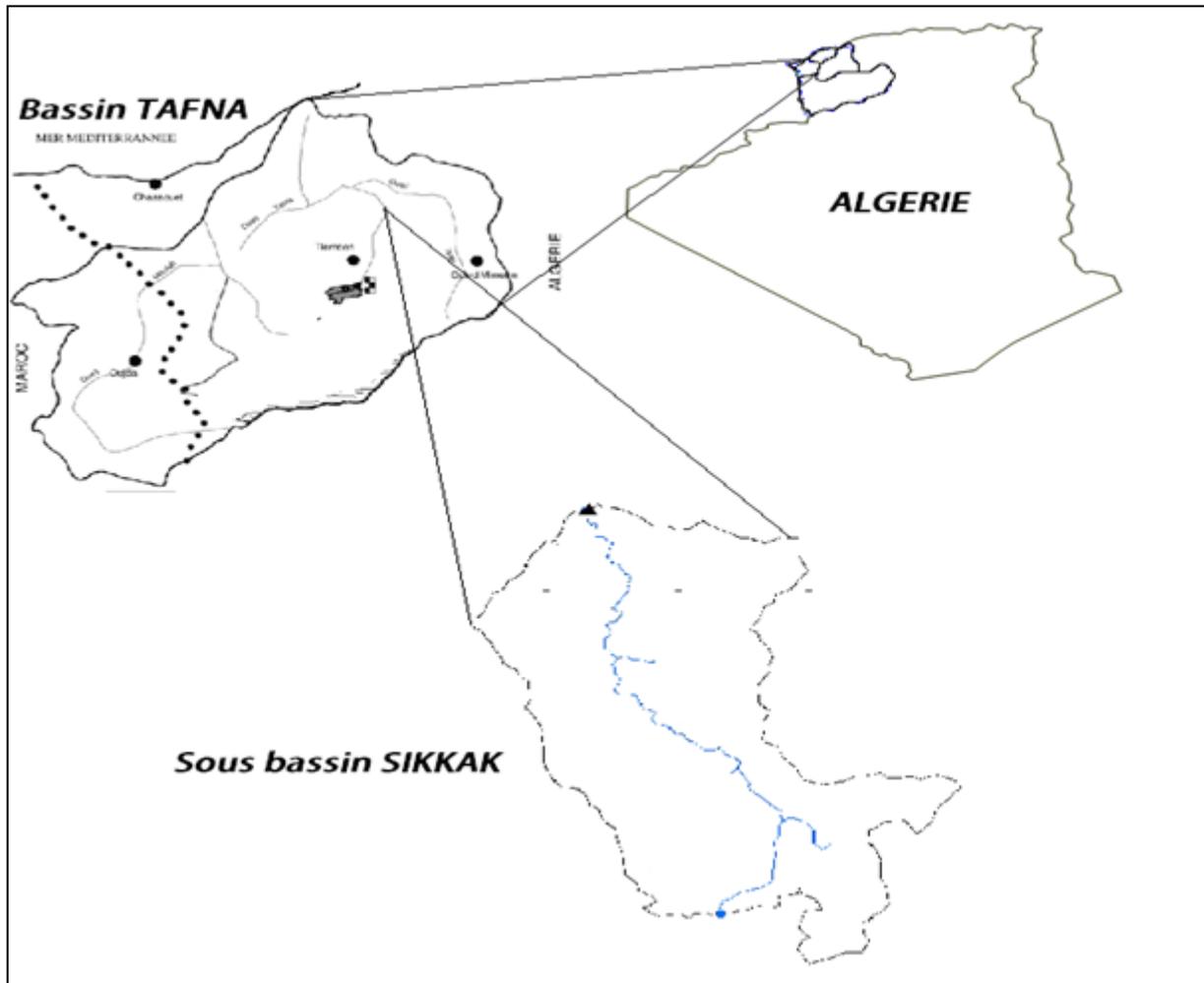


Figure.I.1 : Situation géographique du bassin versant d'Oued Sikkak.

I.3 - CARACTERISTIQUES DE FORME

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration. (Nianga Ntondo.B, 2012).

I.3.1 - Indice de compacité de Gravelius

Ce coefficient, trouvé par Gravelius est le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que le bassin :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Ou : Kc : Indice de compacité de Gravelius.

P : Périmètre du bassin versant (km).

A : Aire du bassin versant (km²).

I.3.2 - Rectangle Equivalent

Afin de pouvoir comparer le comportement hydrologique de deux bassins, on utilise la notion du rectangle équivalent ou le rectangle de Gravelius :

$$L : \text{longueur} = \frac{Kc \sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right] \quad (2)$$

$$l : \text{largeur} = \frac{Kc \sqrt{A}}{1.128} \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right] \quad (3)$$

Tableau.I.1 : Caractéristiques de forme du bassin versant d'Oued Sikkak.

Bassin	Superficie (km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle Equivalent		Forme
				Longueur (km)	Largeur (Km)	
Oued Sikkak	217,52	85,91	1,64	37,48	5,8	Allongé

La valeur de l'indice de compacité indique que le bassin de l'oued Sikkak est Allongé, Favorisant une érosion linéaire et régressive

I.3.3 - Coefficient de Circularité

La circularité d'un Bassin versant, est le rapport entre l'aire du Bassin versant et l'aire d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier :

$$Rci = 4 A \pi / P^2 \quad (4)$$

Rci : Coefficient de Circularité.

A : la surface du bassin versant (km²).

P : le Périmètre du bassin versant (km).

Une valeur de 1 indique un cercle parfait, et une valeur tendant vers 0 caractérise une forme allongée. Dans notre cas, Rci = 0.37, la forme de notre bassin est : Allongé.

I.4 - ETUDE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

L'oued Sikkak, affluent rive gauche de l'oued Isser (lui-même affluent rive droite de la Tafna) avec lequel il conflue au Nord d'Ain Youcef, prend naissance sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen à la source d'Ain Rhannous.

L'oued Sikkak comporte lui-même deux branches principales :

- L'oued Sikkak proprement dit,
- L'oued Amyer, affluent rive droite, dont la confluence avec l'oued Sikkak se situe à l'Est d'Ain Youcef.

D'une longueur de 31.42 Km, il présente des variations de pente assez importantes. (Fig.I-2). (Fandi.W, 2010).

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (D_d), le rapport de confluence (R_c) et le rapport des longueurs (R_L).

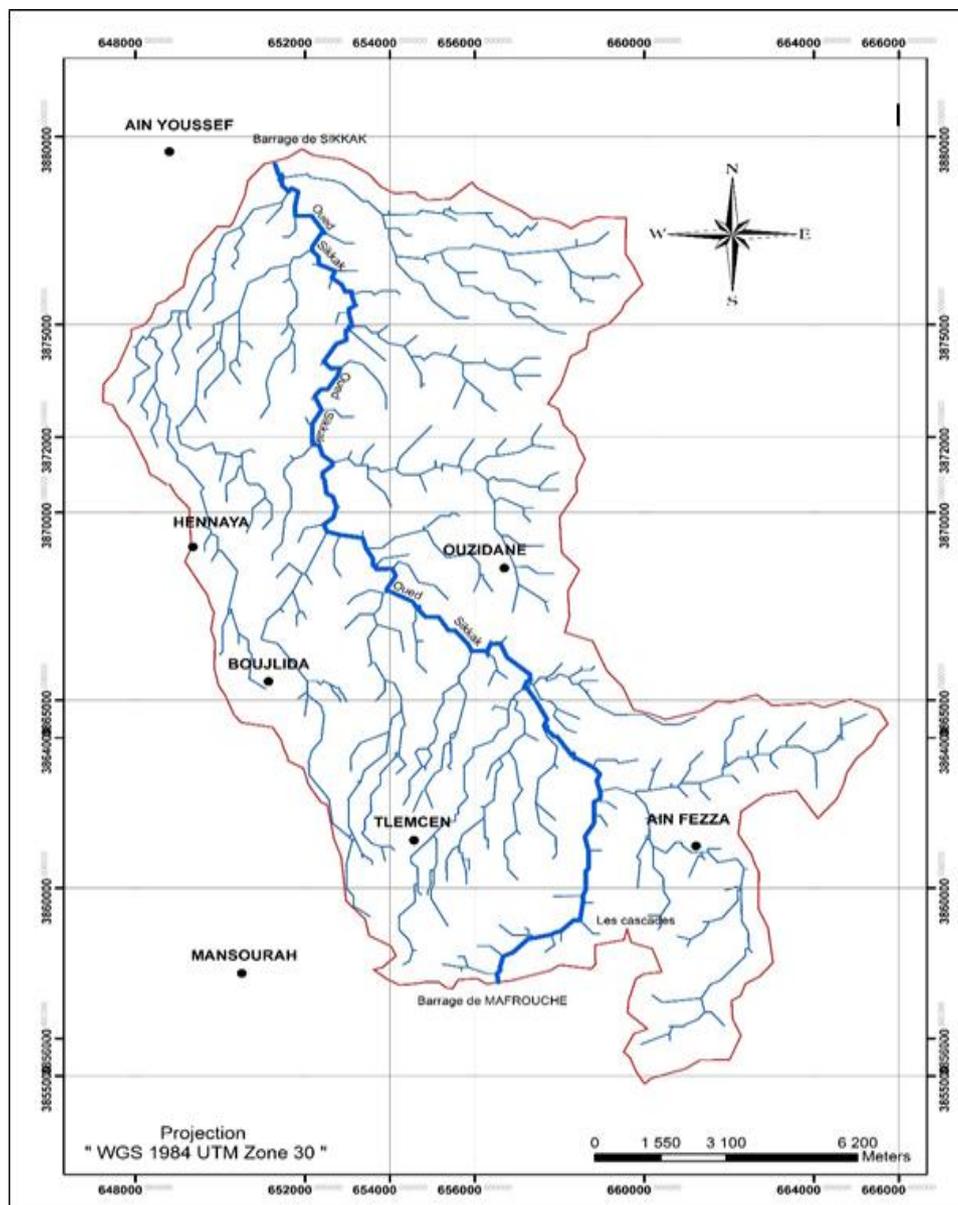


Figure.I.2 : Réseaux Hydrographique du Bassin Versant d'Oued Sikkak.

I.4.1 - Densité de drainage

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur des canaux d'écoulement et la superficie de bassin, elle est exprimé par :

$$D_d = \Sigma L / A \quad (5)$$

D_d : densité de drainage en (Km/Km²).

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en (Km).

A : aire du bassin en (Km²).

$$D_d = 1.48 \text{ km/km}^2$$

La valeur de densité de drainage obtenue est de 1.48 (Km/Km²). Ce résultat indique que notre bassin est moyennement drainé.

La caractéristique du drainage est due principalement à la nature des formations qui forment le bassin ainsi qu'aux pentes assez fortes des versants d'une part et d'autre part au régime climatique, caractérisé par son aridité et ses pluies irrégulières et violentes (Bouanani. A, 2004).

I.4.2 - Rapport de confluence

Il s'agit d'une adaptation de la méthode du nombre puisque le rapport de confluence R_c est obtenu en divisant le nombre N de cours d'eau de rang n par le nombre de cours d'eau de rang $n+1$ de telle sorte que : (Bravard.J & Petit.F, 2002).

$$R_c = N_n / N_{(n+1)} \quad (6)$$

$$R_c = 3.76 \text{ (Bouanani, 2004)}$$

Où : R_c : Rapport de confluence.

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n .

I.4.3 - Rapport de longueur

Le rapport de longueur (R_L) est défini par la relation suivante :

$$R_L = L_{(N+1)} / L_N \quad (7)$$

$$R_L = 2.63 \text{ (Bouanani, 2004)}$$

Où : L_N : Longueur de cours d'eau d'ordre N.

Tableau.I.2 : Paramètres morphométriques du Réseau hydrographique d'oued Sikkak.

Bassin	D_d	R_c	R_L moyen
Oued Sikkak	1.48	3.76	2.63

Si l'on admet que, pour un bassin parfaitement organisé $RC = 2$; donc le bassin de Sikkak est mal hiérarchisé avec une valeur de $RC > 2$.

I.4.4 - Fréquence des cours d'eau

Elle correspond au nombre de cours d'eau par unité de surface, elle est donnée par la relation suivante :

$$F_s = \frac{n}{A} \quad (8)$$

$$F_s = 4.95 \sim 5 \quad (\text{Fandi.2011})$$

Avec n : Nombre des cours d'eaux.

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

Avec la valeur de 5, la fréquence des cours d'eaux de Sikkak est jugée bonne.

I.5 - ETUDE DU RELIEF

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes du bassin, on présente la courbe hypsométrique et le diagramme de fréquence altimétrique.

I.5.1 - Hypsométrie

La répartition altimétrique par tranches (tableau I-3) à partir de la carte (figure I.4) permet d'établir La courbe hypsométrique et le diagramme des fréquences altimétriques (fig. I-3)

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique sur la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

La courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Sikkak (fig.I-3) présente des pentes fortes vers les hautes altitudes ceci implique que notre bassin commence par une falaise, et des pentes faibles vers les basses altitudes ça veut dire on a une vallée encaissée.

Donc la concavité vers le bas de la courbe hypsométrique indique que le bassin va vers l'état de vieillesse.

L'altitude la plus fréquente est de 300 – 400 m, comme le montre la Figure (fig. I-3).

Tableau.I.3 : Répartition hypsométrique du bassin d'oued Sikkak.

Altitudes	Ai (Km)	Ai cumulés (Km)	Ai (%)	Ai (%) cumulées	Hi _{moy}
1400 - 1458	0,64	217,52	0,29	100,00	1429,00
1300 - 1400	0,28	216,88	0,13	99,70	1350,00
1200 - 1300	15,04	216,60	6,91	99,57	1250,00
1100 - 1200	14,64	201,56	6,73	92,66	1150,00
1000 - 1100	3,35	186,92	1,54	85,93	1050,00
900 - 1000	11,80	183,57	5,43	84,39	950,00
800 - 900	9,33	171,77	4,29	78,96	850,00
700 - 800	23,53	162,44	10,82	74,67	750,00
600 - 700	7,53	138,91	3,46	63,86	650,00
500 - 600	23,52	131,38	10,82	60,40	550,00
400 - 500	29,29	107,86	13,47	49,58	450,00
300 - 400	53,71	78,56	24,69	36,11	350,00
182 - 300	24,85	24,85	11,42	11,42	241,00

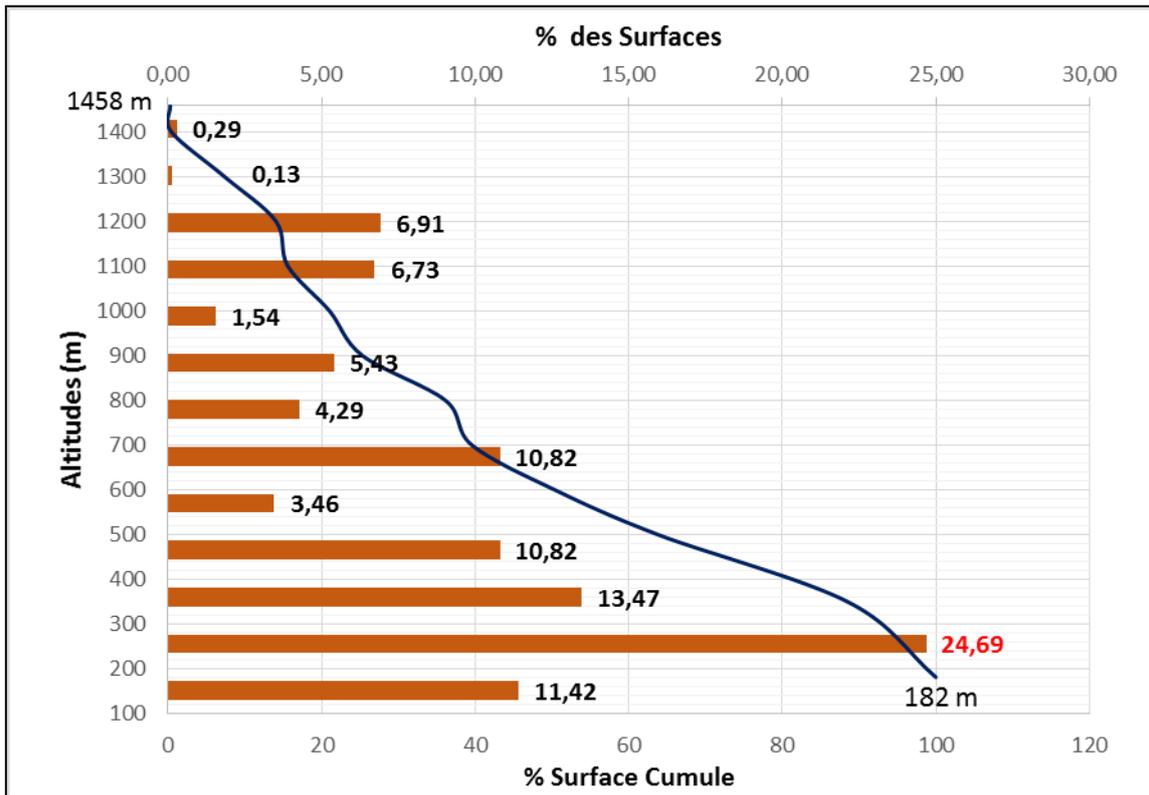


Figure.I.3 : Courbes Hypsométriques et histogramme des fréquences altimétriques du bassin versant de l'oued Sikkak.

I.5.2 - Altitudes caractéristiques

Certaines altitudes sont notées pour caractériser les bassins versants (Tableau.I-4). Elles nous donnent des indications supplémentaires sur le potentiel érosif du bassin. Ces altitudes sont :

- Altitude la plus fréquente : le maximum de la courbe des fréquences altimétriques,
- Altitude correspondant à 5% : au-dessus de laquelle se trouve 5% de la superficie totale du bassin versant,
- Altitude de fréquence à 95% : c'est l'altitude dépassée par 95% de la surface totale du bassin versant,
- Altitude moyenne : l'altitude qui correspond à la moyenne de la courbe hypsométrique.

Donc :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum (A_i H_i)}{A} \quad (9)$$

$$H_{\text{moy}} = 611.6 \text{ m}$$

Avec : H_{moy} : Altitude moyenne du bassin [m.]
 A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau [Km^2].
 H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m].
 A : Superficie totale du bassin versant [km^2].

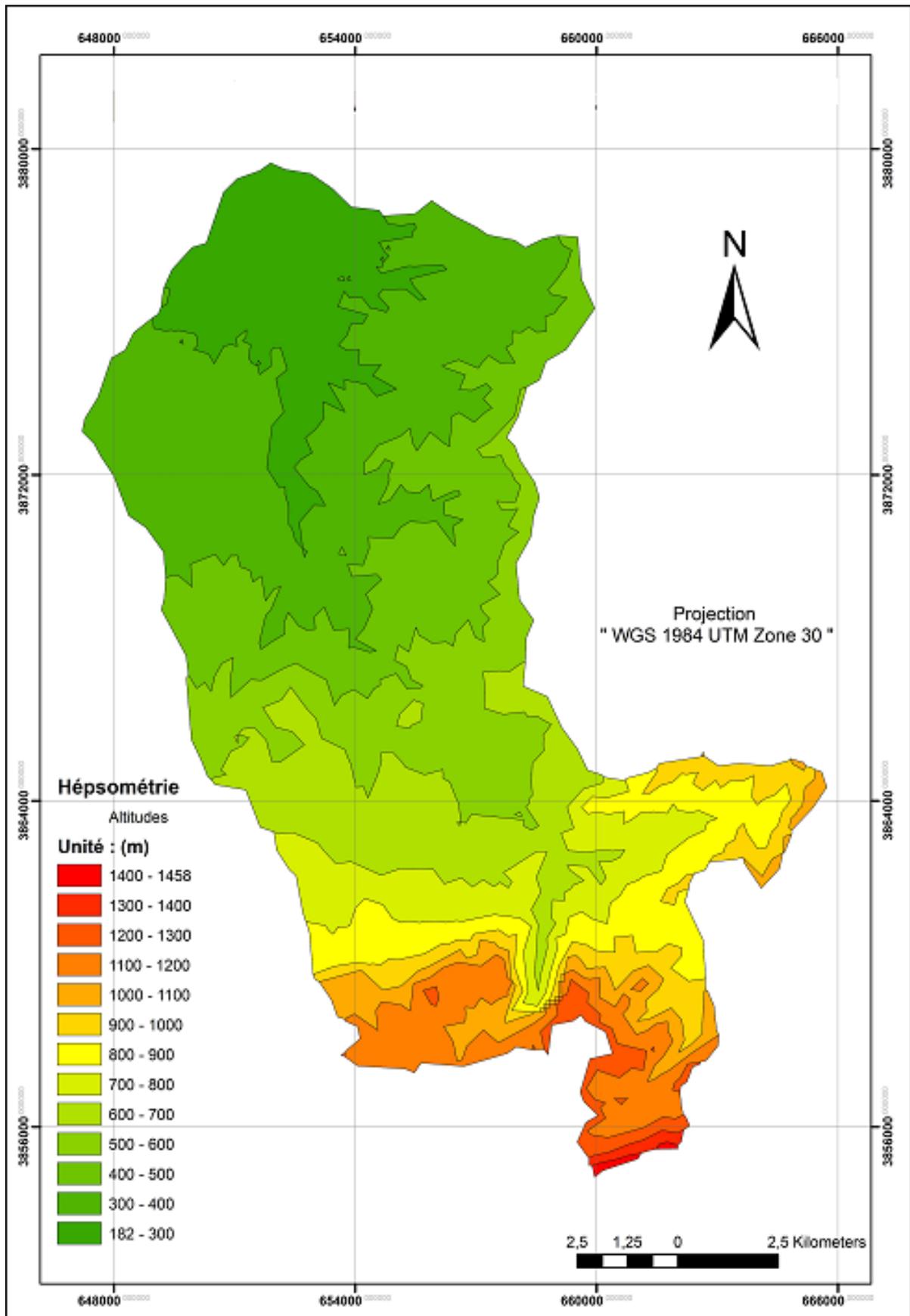


Figure.I.4 : Carte Hypsométrique du Bassin Versant d'Oued Sikkak.

Tableau.I.4 : Les Altitudes Caractéristiques du Bassin Versant d'Oued Sikkak.

Bassin versant	H _{Max} (m)	H _{Min} (m)	H _{Moy} (m)	H _{5%} (m)	H _{95%} (m)	Altitude la plus fréquente (m)	Observation
Sikkak	1458	182	611.6	1330	350	300 - 400	Vers vieillesse

I.6 - LES INDICES DE PENTE ET RELIEF

d- Indice de pente de Roche I_p

L'indice de pente I_p également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égal :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum_1^n [X_i \cdot \beta_i \cdot (a_i - a_{i-1})] \quad (10)$$

$$I_p = 0.43$$

Avec β_i : fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} ;
fonction

Donnée par le tableau hypsométrique.

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

L : longueur du rectangle équivalent.

$$X_i = A_i / l \quad \beta_i = A_i / A$$

A_i : surface partielle entre deux courbes de niveau. (km²).

a_i : courbe de niveau de rang « i » compté à partir du sommet.

l : largeur du rectangle équivalent. (km).

A : surface totale du bassin versant. (km²).

e- Indice de pente globale I_g :

Il se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (11)$$

$$I_g = 0.026 \text{ m/km.}$$

Avec :

I_g : Indice de pente globale. (m/km).

D : la dénivelée H_{5%} - H_{95%}.(m)

L : la longueur du rectangle équivalent.(km).

Selon la classification de l'ORSTOM (tableau 1-5), le bassin du Sikkak présente un relief assez fort.

Tableau.1.5 : Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM.

Relief	I_g (m/km)
Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 < I_g$

Pour atténuer l'influence de la surface sur l'indice de pente I_g , les chercheurs de l'ORSTOM ont introduit la dénivelée spécifique D_s

f- Dénivelée spécifique D_s

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (12)$$

$$D_s = 385.67 \text{ m}$$

Avec : I_g : Indice de pente global (m/km).
 A : aire du bassin (km^2).

En se rapportant à la classification de l'ORSTOM du relief selon D_s (tableau 1-6), le bassin du Sikkak présente un relief fort.

Tableau.1.6 : Classification du relief selon D_s par l'ORSTOM.

Relief	D_s (m)
Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$500 < D_s$

Tableau.1.7 : Indice de pente et Relief du Bassin versant de Sikkak.

Bassin	I_p	I_g (m/km)	Relief selon « I_g »	D_s (m)	Relief selon « D_s »
Sikkak	0.43	0.026	Assez Fort	385.67	Fort

I.6.1 - Coefficient de torrentialité

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

$$C_T = D_d \cdot F_1 \quad (13)$$

$$C_T = 1.98$$

Avec : D_d : densité de drainage (km/km^2).

F1 : fréquence des thalwegs élémentaires $F_1 = N_1 / A$ avec N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1.

I.6.2 - Temps de concentration

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti suivante :

$$T_c = \frac{(4\sqrt{A+1.5L})}{0.8\sqrt{H}} \quad (14)$$

$$T_c = 3 \text{ h } 8 \text{ min.}$$

Où ; T_c : temps de concentration (heures).

A : superficie du bassin (km^2).

L : longueur du thalweg principal (km).

H : Dénivelée $H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}$. (m).

Tableau.1.8 : Valeurs de coefficient de torrentialité et du temps de concentration des eaux du Bassin Versant d'Oued Sikkak.

Bassin	C_T	T_c
Sikkak	1.98	3 h 8 min

I.6.3 - Etude du profil en long

La longueur du cours d'eau principal est de 31.42 km, l'oued Sikkak présente de variations de pente assez importantes.

Tableau.1.9 : calcul des pentes de chaque Tronçon. (Berrezoug. T et Kissi.S, 2002).

Altitudes (m)	Distance (km)	Pente (%)
1100	0	-
770	1,75	18,85
651	2,5	15,86
520	10	1,74
400	14	3
300	18	2,5
260	23,8	0,68
200	33	0,65

Le profil en long (fig. I-5), indique que :

- ✓ Forte pente de Ain El Ourit jusqu'à Dif El Mefflag de l'ordre de 19 %.
- ✓ Forte pente de Dif El Mefflag jusqu'à Ain Safra de l'ordre de 16 %.
- ✓ Faible pente de Ain Safra jusqu'à Oued Boughrara de l'ordre de 3 %.
- ✓ Pente très faible d'Oued Boughrara jusqu'à Barrage Sikkak de l'ordre de 0.025 %.

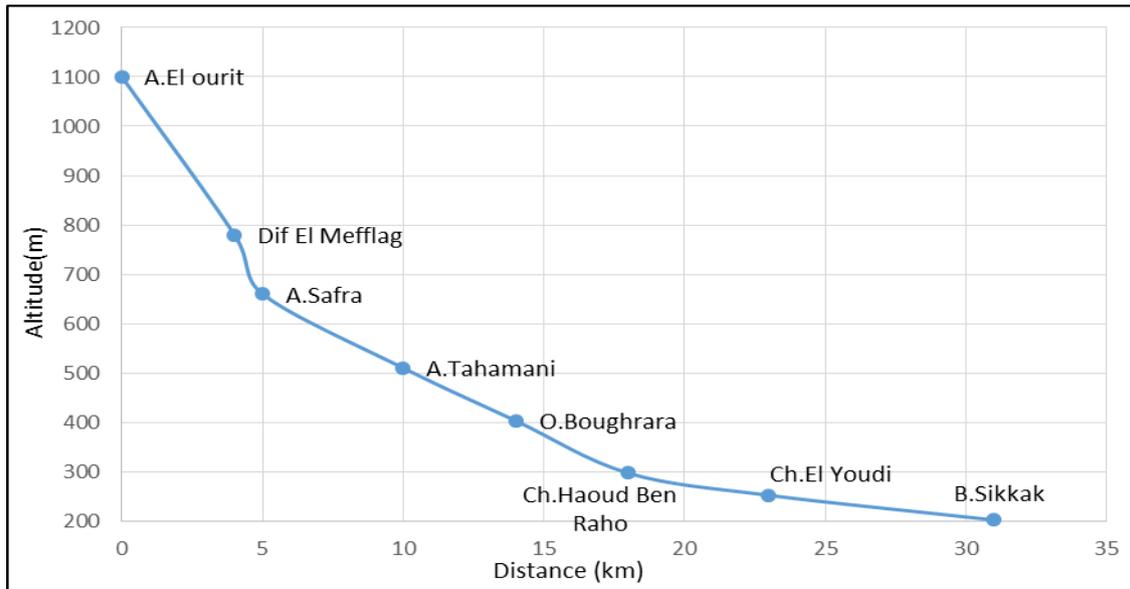


Figure.I.5 : Profil en long d'Oued Sikkak. (Berrezoug. T et Kissi.S, 2002)

I.7 - SOL ET VEGETATION

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de la végétation va jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement. (Fandi.W, 2010).

Les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une maigre couverture forestière. Les grès de Boumediene sont caractérisés par la présence des forêts d'Hafir et Zarifet. Les marnes kimméridgiennes et miocènes et les alluvions quaternaires sont occupées par les céréales et les prairies naturelles. Les broussailles occupent une petite surface dans notre bassin, concentrées dans la région de la commune d'Ain Fezza et au djebel Ain El Hout.

Une plantation d'oliviers couvre une partie de la plaine qui s'étend de Tlemcen à Hennaya, de Saf Saf à Mansourah. A son abri s'étagent en gradins les jardins irrigués qui produisent des légumes et des fruits à côte de l'oued Sikkak (fig. I-6).

Selon (Bouanani, 2004), la carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Sikkak (fig. I-6) présente les limites des différents communes avec la diversité

de cultures et d'occupations du sol, elle montre que les cultures extensives occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant, suivie par l'arboriculture qui occupe 12 % de la superficie totale (tableau 1-10).

Dans le détail, les céréales occupent (58.16 %) de la surface du bassin versant ; les vignes (3.11 %), (10.47%) de culture maraîchère et le reste est occupé par les arboricultures (9.63 %), les broussailles (5.50 %) et les forêts (4.57 %). (Bouanani, 2004)

Tableau.1.10 : Distribution du couvert végétal dans le bassin d'Oued Sikkak.

Occupation des sols	Surfaces en km ²	% des surfaces
Agriculture	141,97	65,27
Arboriculture	1,62	0,74
Forêt	7,39	3,40
Maquis	12,73	5,85
Maquis Arbor	9,67	4,45
Parcours	27,61	12,69
Plan d'eau	0,12	0,06
Urbain	16,41	7,54

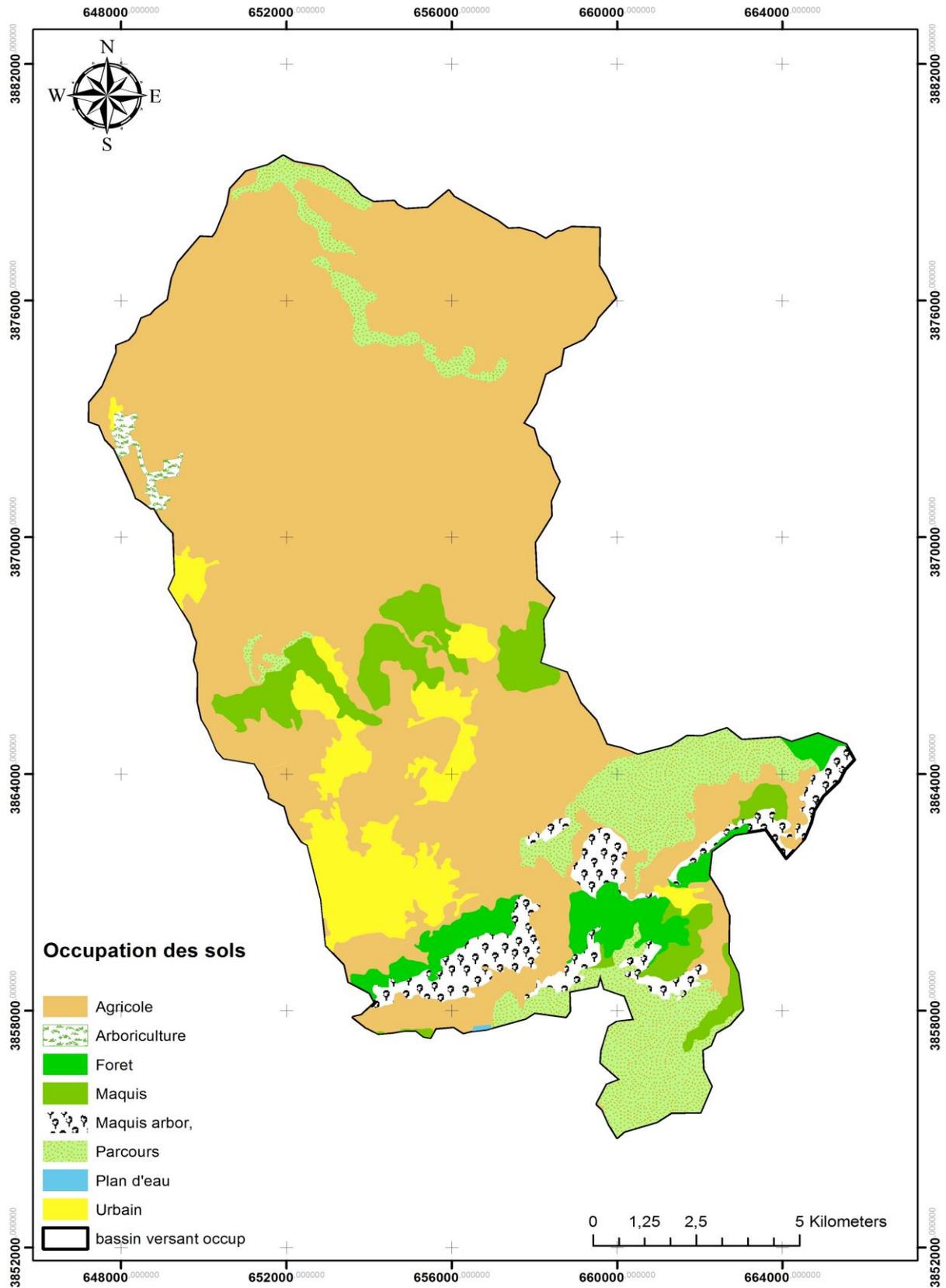


Figure.1.6 : Carte d'occupation de sol du bassin versant d'oued Sikkak.

II- CONTEXTE GEOLOGIQUE

II.1 - INTRODUCTION

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est due aux mouvements hercyniens et alpins qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines. En Oranie, nous avons du Nord au Sud : le domaine Tellien, le domaine Tlemcenien, les hautes plaines oranaises, le domaine Atlassique, le domaine Saharien.

Les Monts de Tlemcen dessinent la bordure sud du bassin et s'interposent entre deux domaines bien définie :

- Le domaine des nappes du Tell au Nord.
- Le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud.

En 1983, Hayane ajoute d'autres précisions par sa contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak. Cette étude est basée sur la synthèse des travaux de Hayane M. 1983

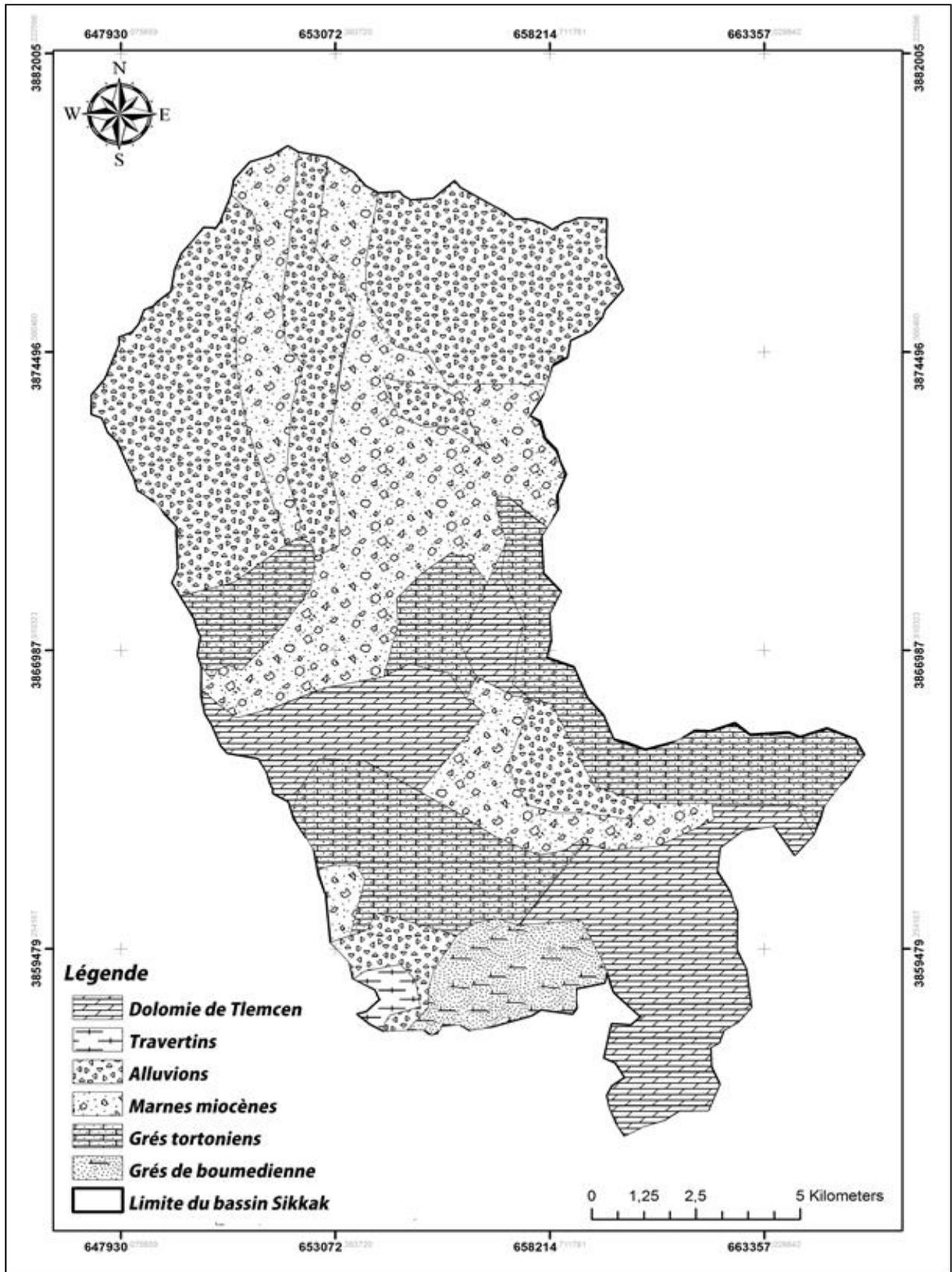


Figure.I.7 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sikkak

II.2 - LES FORMATIONS SECONDAIRES. (Figure.1.7)

a) - Les grés de Boumediene (Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur)

Ce sont des grés à éléments fins sous forme de gros bancs séparés par des inters lits argileux, le ciment presque toujours calcaire. Les alternances sont souvent rouges ou verte et de grés à stratification oblique. Il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse qui affleure aux environs de Tlemcen en particulier près du sanctuaire de Sidi Boumediene. L'épaisseur de cette formation est de 200 à 400m en moyenne.

b) - Les calcaires de Zarifet (Kimméridgien supérieur)

Cette formation tire son nom du col de Zarifet situé à 5Km au Sud-ouest de Tlemcen. Elle est peut être réduite ou partiellement dolomitique (épaisseur de 100m environ au col de Zarifet).

c) - Les Dolomies de Tlemcen (Kimméridgien terminal)

Cette formation correspond au grand escarpement dolomitique qui domine Tlemcen et couronne le cirque des cascades. Les Dolomies qui la composent, en grande partie, sont parfois grossièrement cristallines en raison d'une dolomitisation tardive. Dans la partie sommitale se différencient localement les calcaires de Stah. Elles sont assez répandues dans le groupement puisqu'elle affleure au djebel Tefatisset, Ain El-Houtz et Oudjlida. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 200m dans la région de Tlemcen.

d) - Les marno-calcaires de Raourai (Ticthonien basal)

Il s'agit d'alternance de marnes gris verdâtre ou blanchâtre et de calcaires marneux durs. C'est une formation plutôt calcaire que marneuse avec une épaisseur de 75 à 150m en moyenne, et près de 400m au djebel Raourai. Cette formation est particulièrement bien développée sur djebel Tefatisset à la limite Ouest du groupement au niveau de la zone champ de tir, djebel Ain El-Houtz et El-Hadid au Nord de Chetouane.

e) - Les calcaires de Lato

Ce sont des calcaires massifs en bancs épais terminés par des laminites sombres calcaire-argileuses. Leur épaisseur est d'environ 50m au djebel Lato.

f) - Les Dolomies de Terni (Ticthonien inférieur)

Il s'agit de dolomies massives (50m en moyenne) bien imposée sur le plateau de Terni ou elles débutent par des niveaux à silex stratiformes. Cette formation qui peut être partiellement calcaire, montre souvent des stratifications obliques et entrecroisées ainsi que des passées de laminites stromatolitiques.

g) - Les marno-calcaires de Hariga (Ticthonien supérieur)

C'est une alternance de calcaire avec quelques passées de laminites et de marnes plus ou moins tendres avec une épaisseur de 165m à djebel Hariga d'El Gor.

h) - Les marno-calcaires d'Ouled Mimoune (Ticthonien supérieur à Berriasien basal)

Cette unité lithologique proche de précédente, débute dans les monts de Tlemcen, par les grés de Merchiche. Ces derniers sont composés d'une alternance d'argiles rouge, de grés fins et de calcaires. L'épaisseur de cette formation est de 250m à 300m.

i) - Les argiles de Lamoricière (Berriasien moyen à Valanginien)

Cette formation transgressive d'épaisseur 150m située à 10Km au Sud-Est d'Ouled Mimoun, est essentiellement marno-gréseuse.

j) - Les grés de Berthelot (Hauterivien à Berriasien inférieur)

Cette formation se compose d'une alternance de grés (à stratification obliques) et d'argiles surmontée d'une succession où dominant les bancs carbonatés de cette formation. Elle atteint 150m.

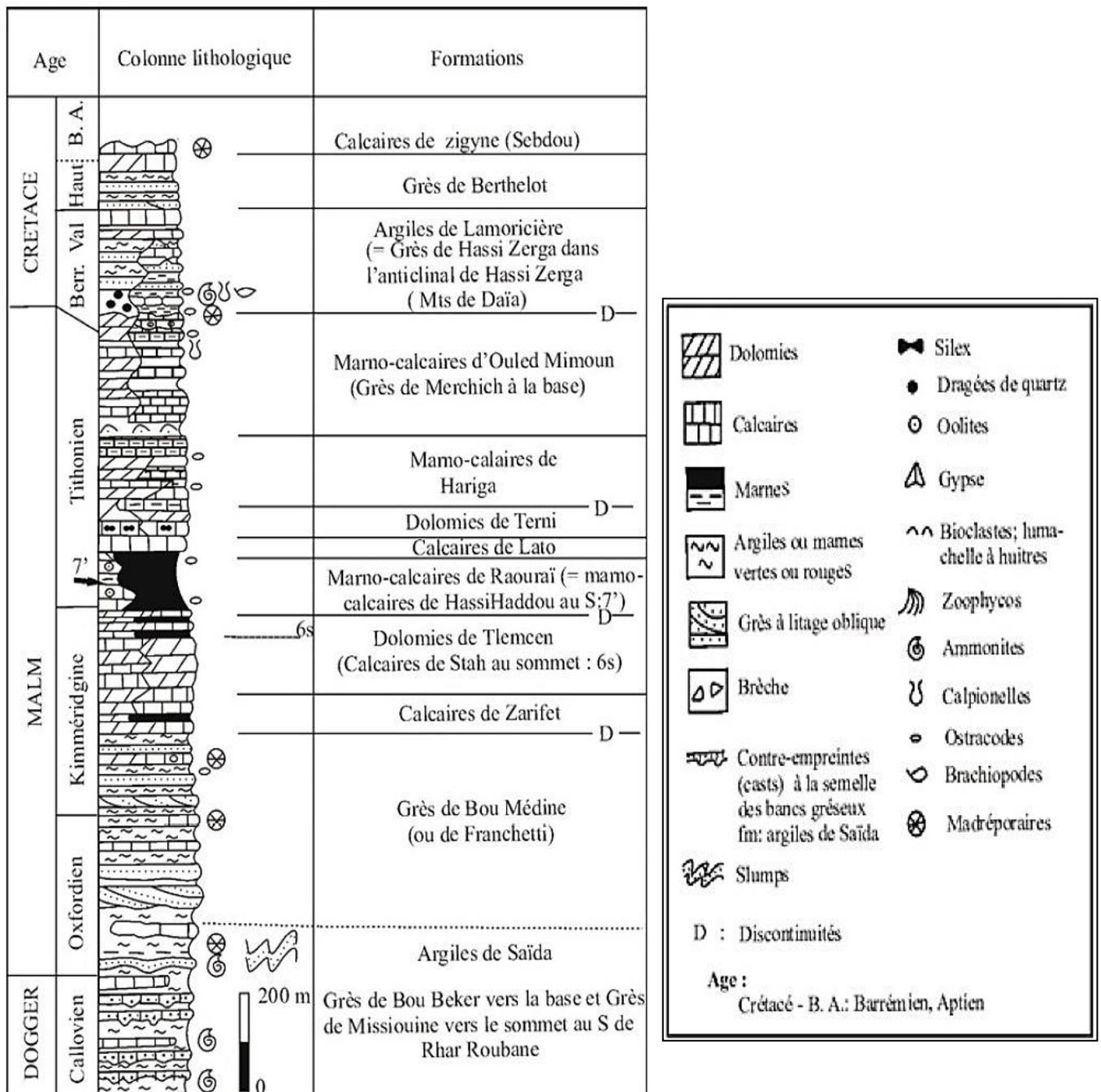


Figure. 1.8 : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest M., Bensalah M.1999).

III.3 - LES FORMATIONS TERTIAIRES

Elles sont représentées de bas en haut : (Figure.1.7)

a) - L'Eocène

Ce sont des grès fissurés à ciment argileux alternant avec des marnes verdâtre ; leur épaisseur est de 150m. Elles affleurent dans la vallée d'Oued Sikkak.

b) - Le Miocène marin

Le Miocène marin se développe presque uniquement sur le versant Nord des monts de Tlemcen. Il est discordant sur les niveaux carbonatés du Jurassique supérieur. Il s'agit de dépôt argilo-gréseux, autochtones. Ce Miocène ne dépasse pas la zone de Terni.

c) - Le Pliocène

Il est marqué par des conglomérats de base, à éléments bien roulés de l'Oxfordien et du Fimméridgien peu développé en surface.

III.3.1 - Les formations quaternaires

a) - les alluvions anciennes

- **Le complexe de piémont**

Ce complexe est représenté par des éboulis de piémonts plus ou moins en croûtes, d'épaisseur assez faible.

- **Les travertins**

Les dépôts des travertins proviennent de la dissolution interne des massifs calcaire-dolomitiques, grâce à la quantité de carbonate de calcium déposée par les eaux des émergences. Ils constituent de puissants dépôts pouvant atteindre 60m (Lalla-Setti au Sud de Tlemcen), et Ain Fezza) (Hayan,1983).

- **La croûte calcaire**

Cette croûte est formée par un encroûtement particulièrement bien marqué dans la plaine d'Henaya où il masque partiellement les grès Tortonien. Cette croûte de teinte claire et des croûtes lamellaires, est caractérisée par une petite épaisseur ne dépassant pas 1m.

- **Le glaciaire de pente Soltanienne**

Il s'agit de formation soltanienne, le plus souvent limono argileuse. La partie de marne non atteinte par les érosions récentes forme de grands glacis de sol rouges.

b) - Les alluvions récentes

Ce sont des dépôts limoneux occupant les parties basses des plaines et des vallées aux abords des cours d'eau.

III – Conclusion

L'examen du tableau (Tableau.I.11) indique que :

- La valeur de l'indice de compacité permet que la forme du bassin versant d'oued Sikkak soit Allongée.
- Les valeurs de I_p et I_g indique que le bassin versant d'oued Sikkak, présente un relief Assez Fort.
- La valeur de la densité de drainage indique que notre bassin est moyennement drainé.
-

Tableau.I.11 : Principaux Paramètres du bassin versant d'oued Sikkak.

<i>Paramètre</i>	<i>Bassin Sikkak</i>
<i>Superficie (km²)</i>	217.52
<i>Périmètre (km)</i>	85.91
<i>Indice de compacité (K_c)</i>	1.64
<i>Longueur du Rectangle équivalent (km)</i>	37.48
<i>Largeur du rectangle équivalent (km)</i>	5.8
<i>Densité de drainage (km/km²)</i>	1.48
<i>Rapport de confluence (R_c)</i>	3.76
<i>Rapport des longueurs (R_L)</i>	2.63
<i>Altitude maximale (m)</i>	1458
<i>Altitude minimale (m)</i>	182
<i>Altitude moyenne (m)</i>	611.6
<i>Indice de pente de Roche (I_p)</i>	0.43
<i>Indice de pente globale I_g (m/km)</i>	0.026
<i>Dénivelée spécifique D_s (m)</i>	385.67
<i>Coefficient de torrentialité (CT)</i>	1.98
<i>Temps de concentration T_C (heurs)</i>	3 h 8 min

L'analyse lithostratigraphique des différentes formations nous permet de mettre en évidence leurs diversités ; ce sont surtout des marnes, des calcaires, des grés-calcaires et des dolomies.

CHAPITRE II

HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT D'OUED SIKKAK

I - LES PRECIPITATIONS

I.1 - Introduction

L'étude des caractéristiques climatiques d'un bassin versant est nécessaire pour la connaissance du comportement hydrologique de ses cours d'eau. En effet l'abondance, la durée et les variations des quantités de pluies qui tombent au cours des périodes de l'année pendant lesquelles les sols ne sont pas protégés par la végétation ont une incidence dramatique sur le milieu physique et peuvent provoquer une action érosive. (Tourki.M, 2010)

Il s'agit de l'intensité, du volume, de la fréquence des pluies et de leur répartition au cours de l'année. Ces caractères conditionnent notamment l'importance du couvert végétal qui s'oppose au ruissellement en absorbant l'eau. L'eau ruisselle lorsque la vitesse d'arrivée de l'eau sur le sol est supérieure à la vitesse d'infiltration. Le volume d'eau en excès à la surface dépend de l'intensité (hauteur d'eau par rapport à une durée) de la pluie et du volume total précipité. (Tourki.M, 2010)

C'est pourquoi, nous avons consacré ce chapitre à étudier le climat du bassin versant d'oued Sikkak, et notamment les précipitations. Le travail a été réalisé malgré l'insuffisance de certaines données pluviométriques.

Plus que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche, 1963). Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale ;
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques ;
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Ces différents aspects des précipitations sont plus ou moins modifiés selon l'effet combiné des autres paramètres physiques et climatiques (températures et évapotranspiration). Mais, contrairement aux paramètres proprement physiques permettent une interprétation seulement qualitative du comportement hydrologique des bassins, les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large. (Belagoune.F, 2012)

I.2 - APERÇUE SUR LE CLIMAT DE L'ALGERIE

Selon *Bouanani. A, 2004*, un aperçu sur le climat de l'Algérie fait ressortir qu'il se caractérise par des contrastes importants avec une étendue de types de climats très différents et ce en relation avec les particularités géographiques et écologiques du pays en l'occurrence l'influence conjuguée de la mer, du relief et de l'altitude. De type méditerranéen, ce climat est caractérisé par des pluies torrentielles, irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ces pluies sont nettement fréquentes en automne lorsque le couvert végétal est absent et le sol ameubli par les labours, le transport solide atteint ces valeurs maximales (*Touibia, 2002 ; Achite et al, 2005 ; Arabi et al, 1989*). Ces précipitations accusent une grande variabilité mensuelle et surtout annuelle. Des températures moyennes annuelles élevées, dépassant les 20°C dans le sud et plus douces le long du littoral. Ceci est lié au niveau élevé du rayonnement solaire parvenant à la région, et aux advections fréquentes de masses d'air chaudes. Ces éléments entraînent une forte évapotranspiration.

Selon *Seltzer (1946)*, le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé. L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles.

Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques. (*Seltzer.P, 1946*).

I.3 - APERÇUE SUR LE CLIMAT DE LA TAFNA

Très affecté par les modifications du climat que subit plusieurs régions à travers le monde depuis un quart de siècle (*Bello, 1998 ; Bargaoui et Alouini, 2001 ; Carbonnel et Hubert*) in (*Bouanani. A, 2004*), le bassin versant de la Tafna à l'instar de l'ensemble des bassins versants de la région, connaît une tendance à la baisse dans les apports pluviométrique et les apports liquides dans les cours d'eau (*Tardy et Probst, 1992*). Les précipitations qui deviennent de plus en plus rares sont inégalement réparties dans le temps et dans l'espace (*FAO, 1990*).elles ne sont dues qu'aux averses violentes, intenses et localisées (*Estienne et Godard, 1970*).parallèlement au déficit pluviométrique observé, les différents sous-bassins de la Tafna souffrent d'une baisse sans cesse croissante de leurs ressources en eau superficielles et souterraines. (*Ghenim A, 2008*).

Ces dernières années le retour des précipitations dans la région ainsi que le recours au dessalement de l'eau de mer ont fait en sorte que les ressources en eau superficielles et souterraines sont moins convoitées. Ceci a permis aux nappes de se

restituer doucement et aux barrages de pouvoir régulariser chaque année un volume appréciable et même de se voir remplis à 100% pour certaines années (2000/01, 2003/04 et 2008/09).

Le climat du bassin de la Tafna s'apparente à celui de toute la région méditerranéenne de l'Afrique du Nord, il est doux et humide. La température moyenne annuelle est d'environ 15.5 °C. Les deux mois les plus chauds sont juillet et août, et ont une température moyenne de 26 °C (*Dekiche ; 1993*).

Le régime général des pluies est celui des zones semi-arides méditerranéennes de l'Afrique du Nord. Il est caractérisé par des précipitations d'hiver avec des maximas en décembre, janvier et février, et une longue période de sécheresse, pratiquement sans pluie de juin à septembre. L'évaporation sur nappe d'eau libre atteint la valeur moyenne annuelle de 1200 mm. Les vents sont modérés à prédominance Nord et Nord-Ouest (*Khaldi ,2005*).

I.4 - ETUDE DE LA PLUVIOMETRIE

Selon (Bouanani. A, 2004), la Pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P.Seltzer, 1913-1938, H.Gaussen, 1918-1947, G.Medinger, 1913-1953, M.Chaumont et C.Paquin, 1913-1963). La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle.

Bien que la notion de la moyenne pluviométrique estompe la réalité des faits climatiques, notamment en domaine méditerranéen, sa connaissance demeure nécessaire pour aborder l'étude de l'abondance des cours d'eau et surtout la détermination du bilan moyen annuel de l'écoulement. Elle permet également de cerner la variabilité des pluies sur de longues périodes d'observation, néanmoins, cette variabilité doit être précisée par des moyens statistiques qui permettent de lier les hauteurs précipitées à leur durée de récurrence. (Baba Hamed. K , 2001)

I.4.1- Répartitions des stations pluviométriques dans la zone d'étude

Le bassin versant de L'Oued Sikkak englobe, dans sa partie amont, trois stations pluviométriques : Mefrouche ; Tlemcen et Lala Setti. Afin de bien caractériser le climat du bassin versant de l'Oued Sikkak, nous avons pris en considération une quatrième station très proche de la limite géographique de la zone d'étude, celle de Hennaya. Les quatre stations sont plus au moins proches l'une de l'autre et possèdent les coordonnées Lambert suivantes (Tableau.II.1).

Tableau. II.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques «ANRH»

Stations	Coordonnées Lambert		Z (m)
	X (km)	Y (km)	
Mefrouche	135.55	180.2	1110
Lala Setti	133.95	181.85	1020
Tlemcen	132.35	182.65	830
Hennaya	126,7	188,2	510

La figure (II.1) donne la disposition des quatre stations au bassin versant d'oued Sikkak. Ces stations sont bien représentatives du bassin.

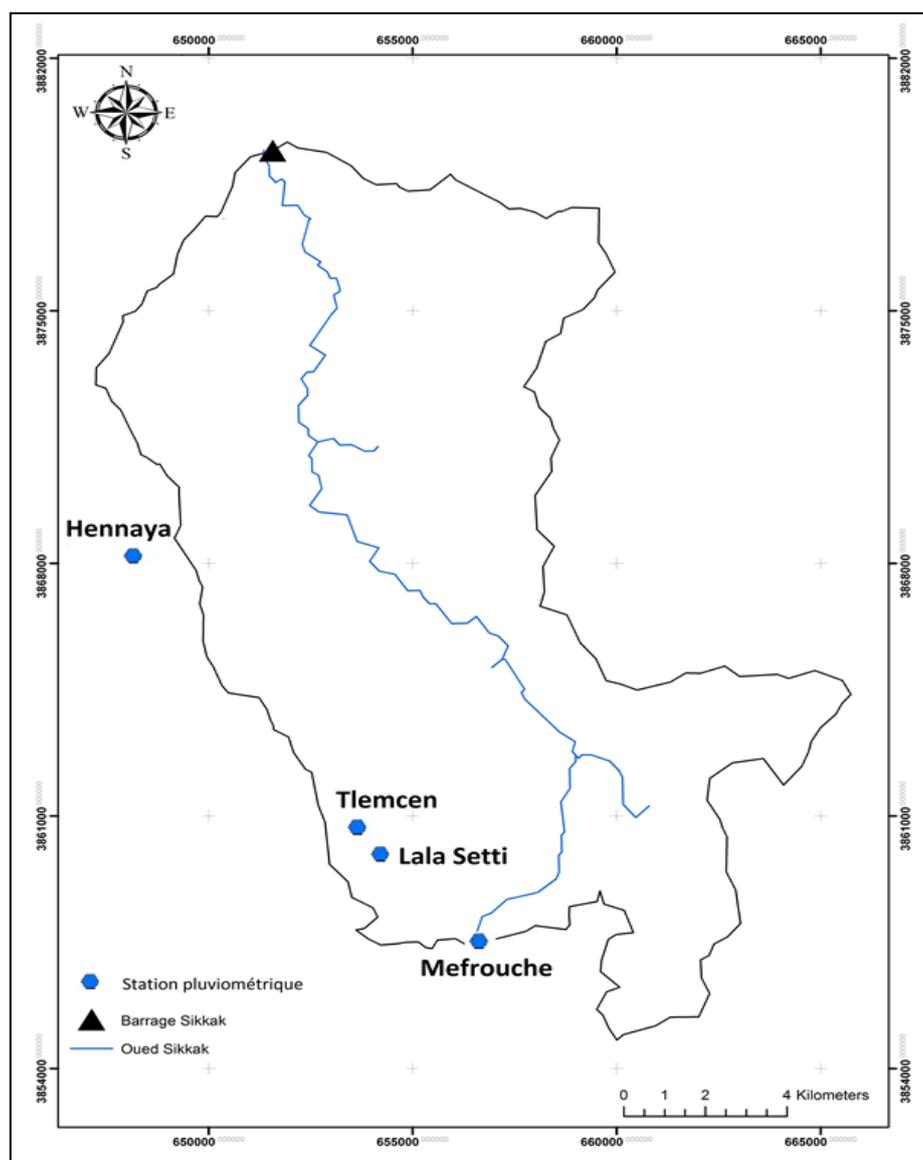


Figure.II.1 : Répartition des stations pluviométriques au niveau du bassin versant de l'Oued Sikkak.

I.4.2 - Variation annuelle des précipitations

La pluviométrie d'une année est définie par la somme de la hauteur des précipitations mensuelles. La mesure de la variabilité de la pluviométrie sur une période donnée peut être réalisée grâce à la moyenne interannuelle.

Tableau.II.2 : Caractéristique des précipitations annuelles aux différentes stations

Stations	Période	Moyenne (mm)	Max (mm)	Min (mm)	PM /Pm	Nombre d'années P > moy
Hennaya	(1974-2010)	391,17	602,2 (74/75)	119,41 (81/82)	5,04	20
Mefrouche	(1974-2010)	560,78	875,7 (07/08)	211,8 (80/81)	4,13	17
Lala Setti	(1974-2010)	504,89	784,1 (73/74)	325,6 (98/99)	2,41	17
Tlemcen	(1974-2010)	509,15	817,3 (07/08)	310,7 (82/83)	2,63	17

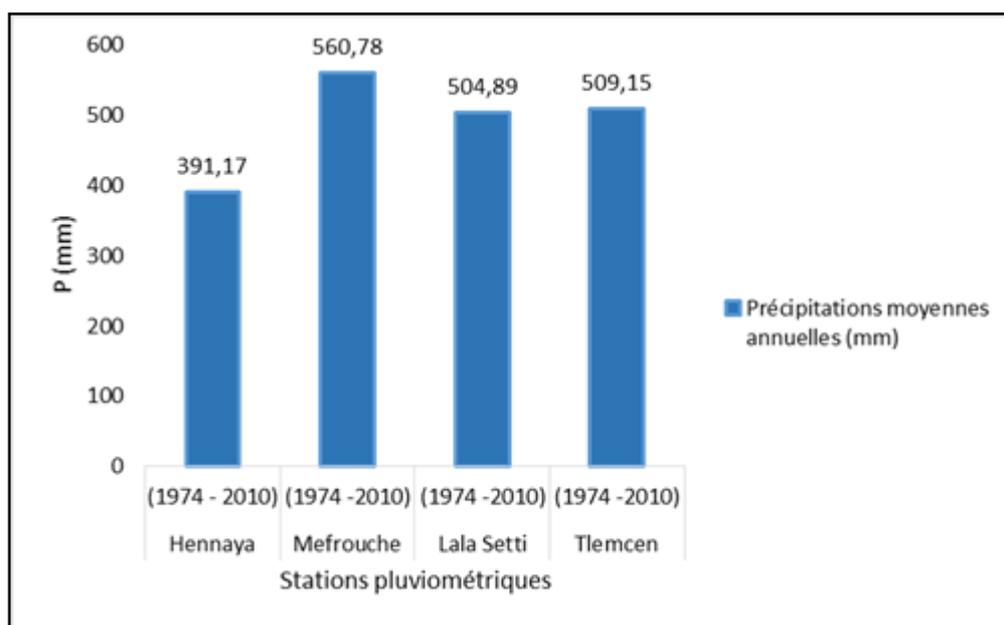


Figure.II.2 : Précipitations moyennes annuelles aux stations étudiées

La carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin versant de Sikkak (figure.II.3) représente un échantillon caractéristique au niveau du grand bassin de la Tafna. On note une sensible augmentation pluviométrique de l'Ouest à l'Est, et une forte augmentation enregistrée du Nord vers le Sud à cause de l'altitude importante des stations de Lala Setti et Mefrouche, avec respectivement une hauteur de pluie de 504,89 mm et 509,15 mm.

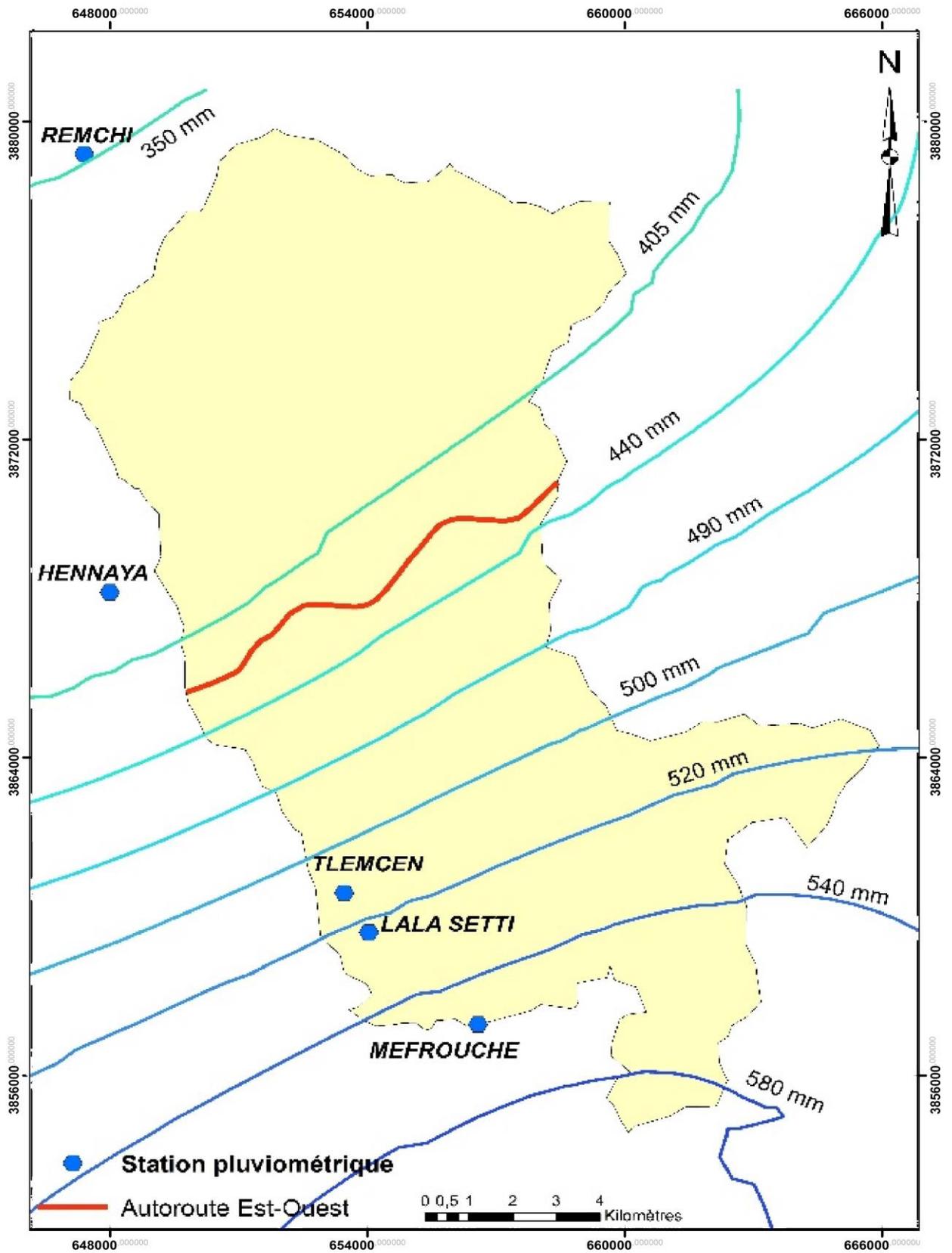


Figure.II.3 : Carte en isohyètes de bassin Sikkak (1974-2010)

Les graphiques (Fig.II.4) montrent que les valeurs des précipitations annuelles au niveau des stations étudiées oscillent avec des amplitudes très proches, tandis que celles de Hennaya présentent, plus au moins, un léger déphasage par rapport aux autres stations.

L'analyse de la Fig.II.5 met en évidence une période plus ou moins sèche avec quelques années humides. Les valeurs annuelles se traduisent en 18 années humides dont la moyenne est supérieure à la moyenne annuelle.

En général, on peut dire que les quatre stations reflètent un caractère pluvieux de notre zone d'étude qui est soumis à des pluies caractérisées par d'importantes irrégularités annuelles spatiales et temporelles.

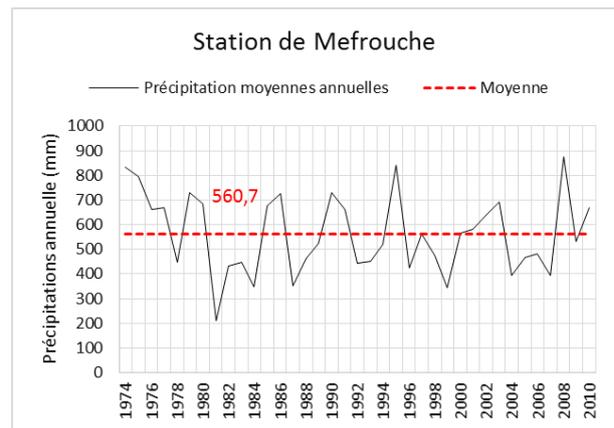
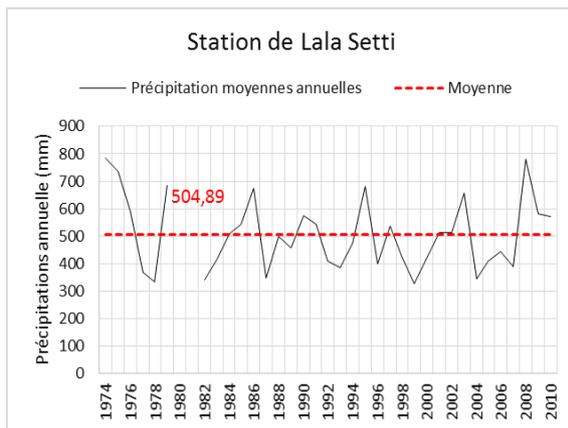
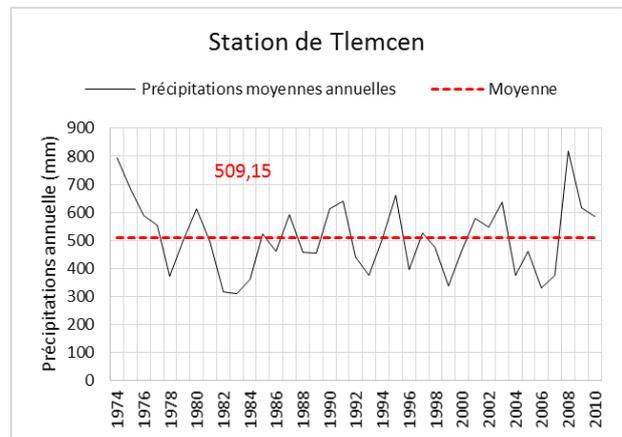
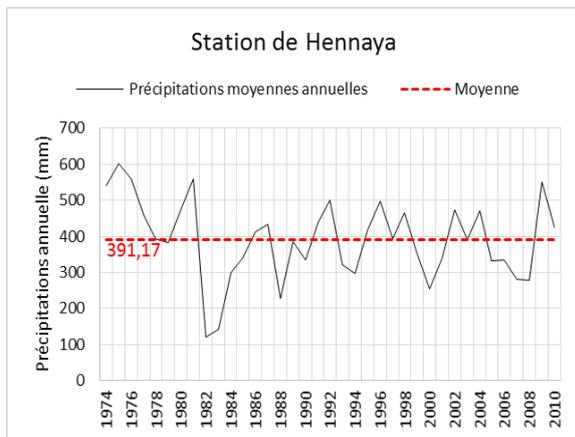


Figure.II.4 : Variation annuelles des précipitations aux différentes stations (1974-2010)

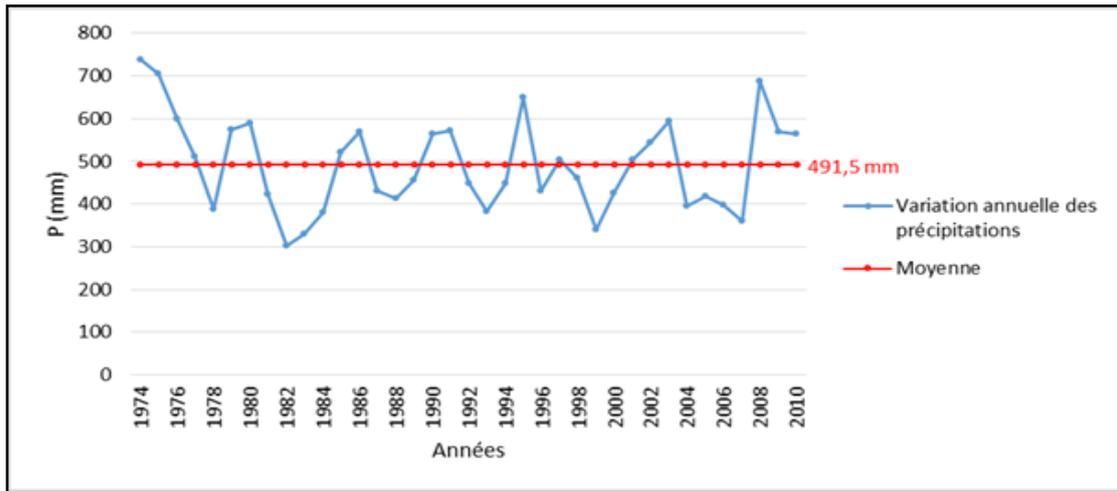


Figure.II.5 : Variation annuelle des précipitations moyennes aux stations étudiées (1974-2010)

I.4.2.1 - Coefficient pluviométrique

Afin de distinguer les années sèches des années humides, on définit le coefficient pluviométrique qui est exprimé par le rapport de la précipitation annuelle sur la précipitation moyenne annuelle. Ce coefficient est défini par :

$$C_p = P_i / \bar{P}$$

Où : (15)

P_i : La précipitation annuelle (mm) ;

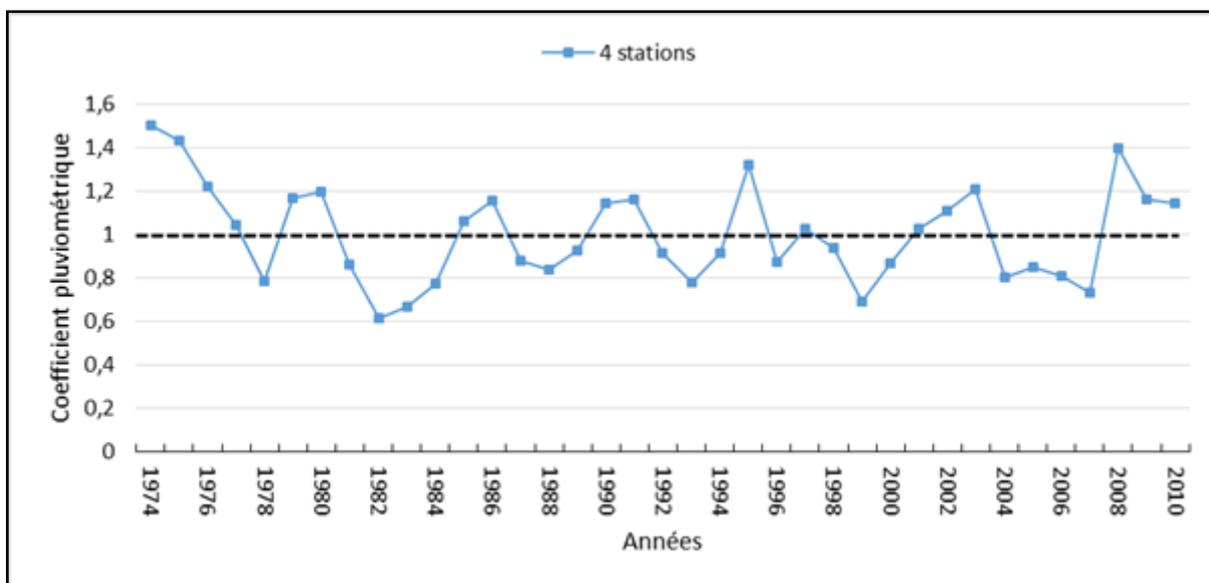
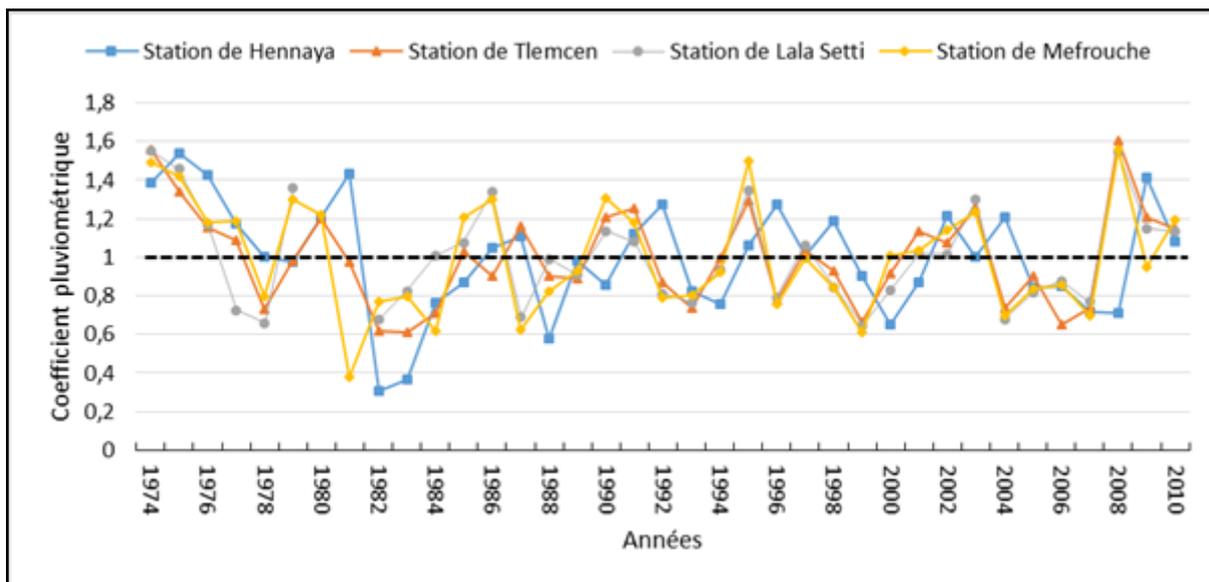
P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

Pour les valeurs du coefficient pluviométrique supérieures ou égales à l'unité (C_P>1), on considère que l'année est humide et les valeurs inférieures à l'unité (C_P<1) correspondent aux années sèches.

Ainsi, on déduit pour chaque station le nombre d'années humides et celui des années sèches (Tableau.II.3).

Tableau.II.3 : Représentation du nombre d'années humides et sèches au niveau des quatre stations.

	Nombre d'années humides	Nombre d'années sèches
Station de Hennaya	20	17
Station de Tlemcen	17	20
Station de Lala Setti	17	20
Station de Mefrouche	17	20



Figures.II.6 : Variation du coefficient pluviométrique au niveau des stations pluviométriques étudiées (1974-2010).

D'après l'allure des courbes de Mefrouche, Tlemcen et Lala Setti (Fig.II.6), on remarque que les années extrêmes humides et sèches sont marquées respectivement par quatre pics. Pour ces trois stations, l'année commune de forte humidité est observée en 1973/74 avec des valeurs entre 1,48 et 1,55.

Autrement, on remarque une diminution proportionnelle des valeurs des coefficients pluviométriques jusqu'à l'année hydrologique 1989/90. Après cette année, on remarque des fluctuations dans l'évolution des précipitations annuelles.

Contrairement à la station de Hennaya, le premier pic de l'année extrême humide est en retard par rapport à celui de des autres stations, ce retard est remarqué jusqu'à la fin de la série.

Pour les quatre stations, le début de la série commence par des valeurs de coefficient favorisant des années humides, après l'année extrême humide (1973/74). Ces valeurs du Cp commencent à décroître progressivement et entrent dans une grande fluctuation caractérisée par une alternance entre les années sèches et humides jusqu'au pic de l'année (2008/09) où nous avons noté le retour des précipitations importantes, où on a même été contraint de faire des lâchers importantes à partir du barrage Mefrouche pour éviter la submersion.

I.4.2.2 - Etude statistique des précipitations annuelles

Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui a un rôle essentiel et décisif sur l'écoulement fluvial et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer des variables réduites.

L'analyse statistique des précipitations permet de préciser les conditions du régime pluviométrique dans notre secteur d'étude, elle nous conduira également à estimer les précipitations pour des périodes de récurrence données.

Elle nous permettra de déterminer la loi d'ajustement des précipitations des stations concernées. Nous avons porté en annexes, les valeurs des précipitations observées par ordre croissant pour les stations considérées.

La fréquence de chaque valeur sera calculée par la relation suivante :

$$f_i = \frac{i - 0,5}{N} \quad (16)$$

Avec : i : rang

N : effectif de l'échantillon.

Les séries obtenues sur les différentes stations, nous permettent de calculer les paramètres statistiques et de juger la distribution des précipitations annuelles.

Tableau.II.4 : paramètres de position des précipitations

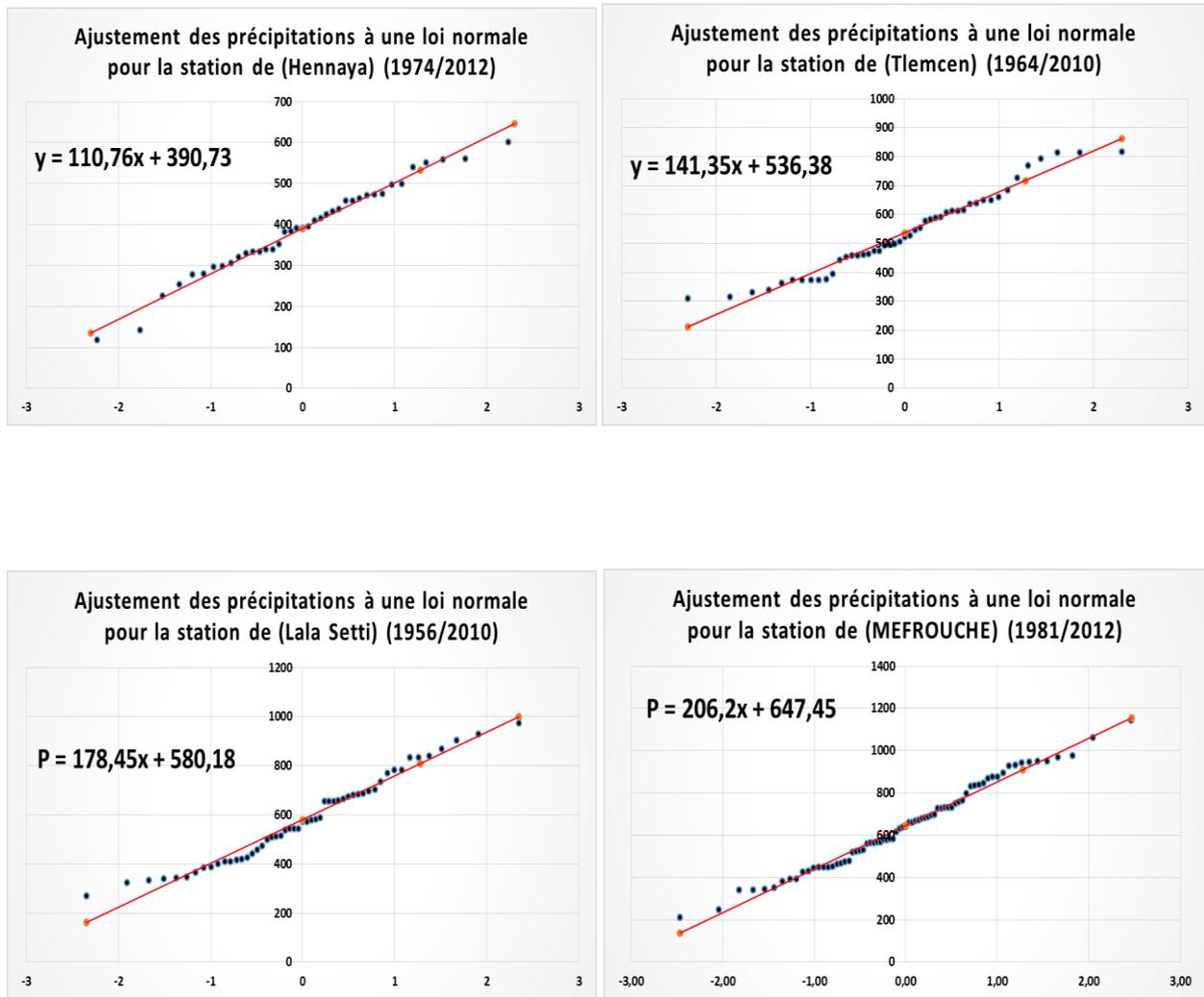
Paramètres	Formules
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_1^N P_i$
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (P_i - \bar{P})^2$
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$
Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$

Tableau.II.5 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques Aux différentes stations

Station	Moyenne (P)	Ecart-type	C_v
Mefrouche	391,17	112,38	0,29
Lala Setti	509,15	127,52	0,25
Tlemcen	504,89	132,04	0,26
Hennaya	560,78	160,63	0,29

Le coefficient de variation $C_v < 0,3$ pour toutes les stations considérées, ce qui nous laisse penser que l'ajustement suit une loi normale, le test graphique permettra de vérifier cette adéquation.

L'ajustement graphique des séries pluviométriques des différentes stations étudiées pour la période (1974/2010), (Figures.II.7) montre que la pluie s'ajuste en général suivant une loi normale de Gauss. En outre nous avons calculé pour quelques stations situées dans notre bassin d'étude, les précipitations relatives à des récurrences données (Tableau.II.6).



Figures.II.7 : Ajustement des précipitations à une loi normale pour les stations de Hennaya (1974-2012), Tlemcen (1964-2010), Lala Setti (1956-2010) et de Mefrouche (1943-2015)

L'étude statistique nous donne les résultats portés dans le Tableau.II.6 :

Tableau.II.6 : Ajustement des précipitations annuelles des stations étudiées

Stations	Périodes	L'équation
Hennaya	1974-2012	$P = 110,76x + 390,73$
Tlemcen	1964-2010	$P = 141,35x + 536,38$
Lala Setti	1956-2010	$P = 178,45x + 580,18$
Mefrouche	1943--2015	$P = 206,2x + 647,45$

Tableau.II.7 : Valeurs des précipitations estimées pour les fréquences décennales, centennales et millénaires pour les années humides.

Stations	Pluie moyenne (mm)	Pluie décennale (mm)	Pluie centennale (mm)	Pluie millénaire (mm)
Hennaya (1974-2012)	390,73	532,51	647,70	755,15
Tlemcen (1964 -2010)	536,38	717,31	864,31	1001,42
Lala Setti (1956 -2010)	580,18	808,60	994,19	1167,29
Mefrouche (1943 -2010)	647,44	911,37	1125,82	1325,83

I.4.3 - Variation mensuelle des précipitations

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionnent, en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et par là même le régime des cours d'eau et des nappes aquifères.

L'étude de la variabilité mensuelle des précipitations est importante puisque l'écoulement fluvial saisonnier est conditionné par ces dernières (Tourki.M, 2010).

Les valeurs moyennes mensuelles pluviométriques relatives à la période (1974/2010) (Tableau.II.8), traduisent clairement les variations mensuelles et saisonnières de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle. Ainsi, on peut distinguer deux périodes distinctes :

- *Une période sèche* qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué.
- *Une période humide* qui correspond au reste de l'année ; cependant, il faut souligner que cette période pluvieuse est elle aussi marquée par une succession de mois humides et de mois relativement secs.

Tableau.II.8 : Les valeurs des pluies moyennes mensuelles (1974 -2010)

Stations	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Hennaya	18,7	28,8	49,4	45,5	46,4	53,1	55,7	47,3	33,7	6,2	2,2	4,2
Lala Setti	23,9	42,3	59,0	56,0	62,7	58,6	68,1	57,4	52,4	8,5	3,4	5,0
Tlemcen	16,5	22,7	44,6	41,6	42,2	43,3	43,4	32,4	26,0	5,4	1,1	3,8
Mefrouche	19,5	43,1	73,9	66,7	75,8	75,8	81,7	63,6	52,1	10,2	3,6	5,5
Moyenne (mm)	19,6	34,2	56,7	52,4	56,7	57,7	62,2	50,1	41,0	7,5	2,5	4,6

D'après le tableau.II.8, on remarque que le gradient des pluies mensuelles s'accroît progressivement à partir du mois de Septembre jusqu'aux mois les plus humides de l'année où elles atteignent leur maximum (Fig.II.8).

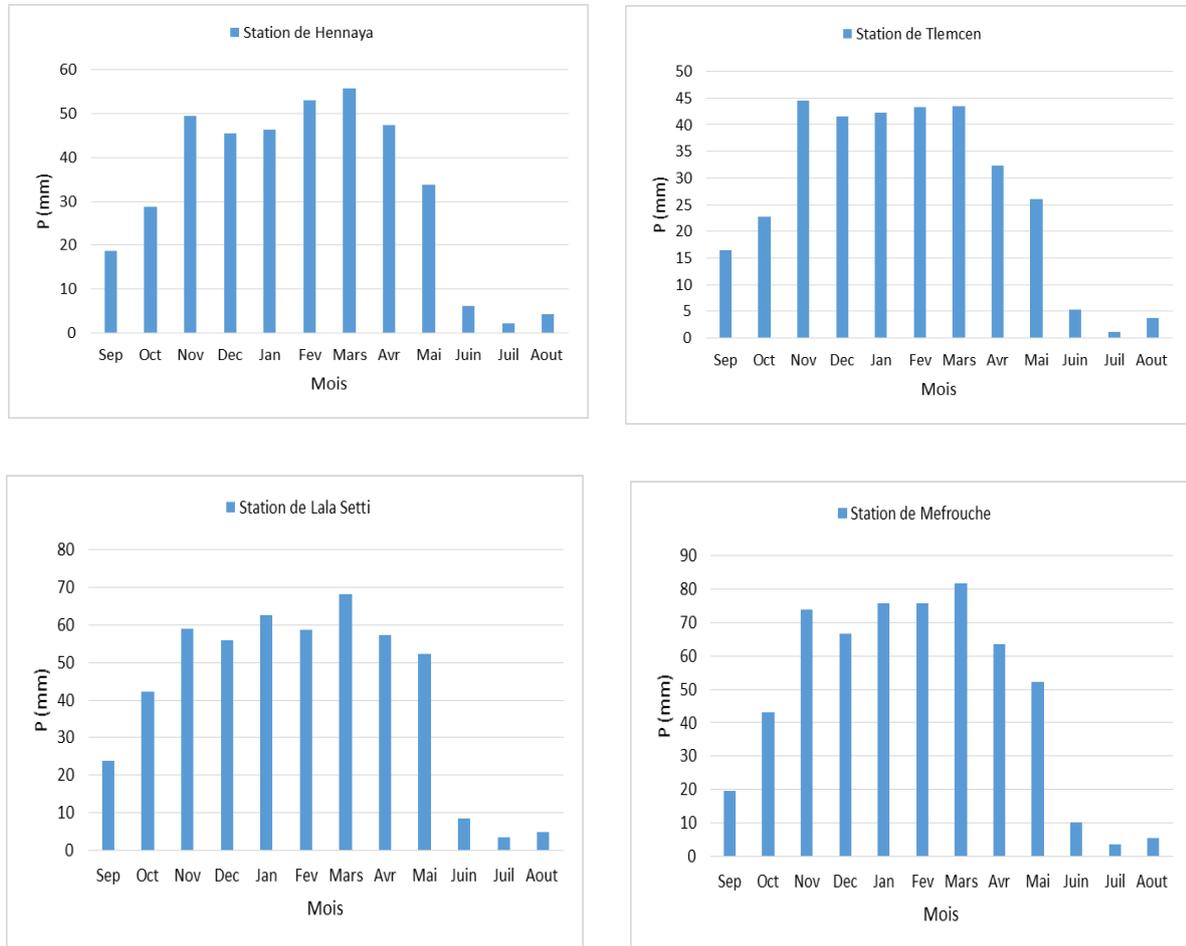


Figure.II.8 : Variabilité mensuelle des précipitations dans les quatre stations pluviométriques (1974 -2010)

L'association des quatre stations (Fig.II.8) donne deux valeurs maximales des précipitations de 56,7 et 62,2 mm, enregistrées respectivement aux mois de février et mars. Après le mois de mars, le gradient mensuel des précipitations commence à chuter et affleure des valeurs très faibles qui coïncident avec les mois de Juillet et Août. Pour le mois de Juillet est considéré comme le plus sec avec une moyenne de 2,5 mm.

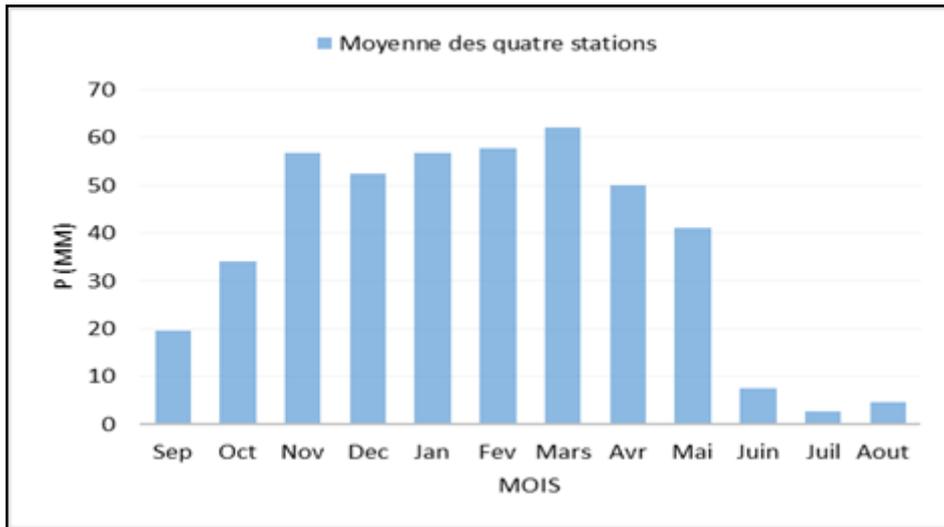


Figure.II.9 : Répartition des moyennes mensuelles dans le bassin versant d'oued Sikkak (1974 -2010)

I.4.3.1 - Coefficient de variation

A partir des valeurs du coefficient de variation calculées pour les quatre stations, on distingue une grande fluctuation pendant les mois de la saison d'été.

Les valeurs maximales sont surtout observées au mois de Juillet, avec 15,04 ; 11.39, 35.21 ,10.76 respectivement pour les stations de Hennaya, Lalla Setti, Tlemcen et Mefrouche (Fig.II.10).

En revanche, la variabilité mensuelle hivernale est légèrement faible si on la compare à celle des saisons automnale et printanière.

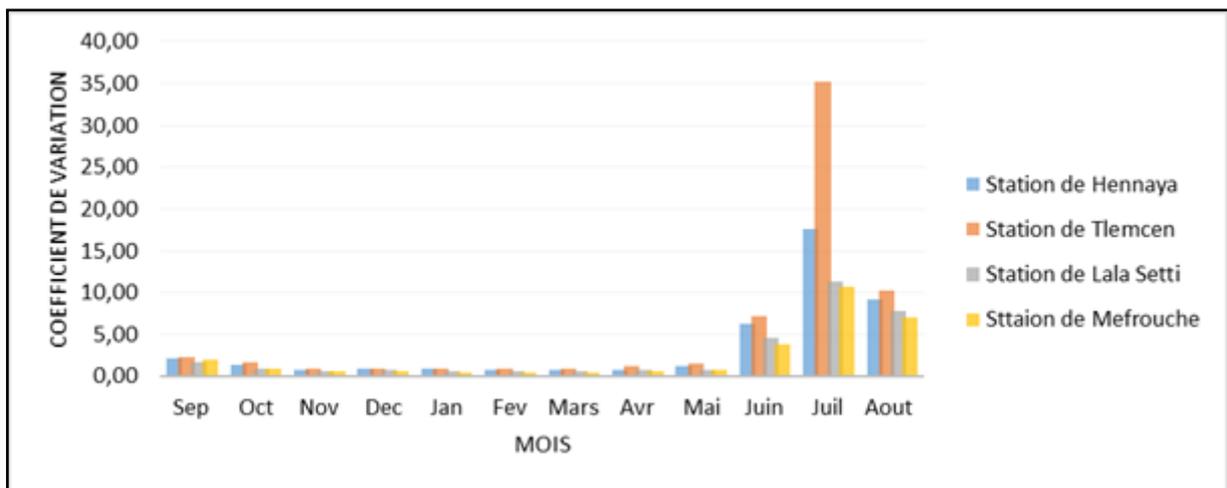


Figure.II.10 : Répartition mensuelle des coefficients de variation aux différentes stations (1974 -2010)

La forte variabilité inter mensuelle des précipitations, apparaît à travers les valeurs élevées du coefficient de variation mensuelle. Les plus fortes valeurs concernent les mois d'été où elles sont comprises entre 3,80 et 35,21.

Une variabilité aussi marquée en été s'explique par une indigence pluviométrique des mois secs d'été qui sont parfois parsemées par de vifs orages pouvant être assez important par leurs actions érosives violentes.(Bouanani, 2004).

I.4.4 - Variation saisonnière des précipitations

Une représentation graphique des précipitations saisonnières est illustrée au (Fig.II.11 ; Fig.II.12).

Il est clair que la saison d'été est la plus sèche, avec des valeurs qui varient entre 10,3 mm et 19,3 mm. La saison hivernale est la plus humide au niveau de la station de Hennaya, Lala Setti et Mefrouche dont les précipitations moyennes varient entre 127,1 mm (Hennaya) et 218,3 mm (Mefrouche). On remarque que la station de Tlemcen caractérisée par une égalité entre l'hiver et le printemps dont les précipitations moyenne sont respectivement 177,3 mm et 177,9 mm .

En se basant sur le graphique, nous constatons que la saison de printemps présente une période de pluviosité plus importante que celle de la saison d'Automne pour les quatre stations.

Généralement, pour toute la zone étudiée, (Tab.II.9), en moyenne, le maximum saisonnier se situe en hiver (218,3 mm) suivi par un maximum secondaire (197,4 mm) au printemps, l'été (10,3 mm) étant la saison la plus sèche. En outre l'automne est lui aussi relativement pluvieux avec 110,6 mm en moyenne.

La distribution des précipitations saisonnières (Fig.II.12) montre que l'Hiver et le Printemps sont les saisons les plus Humides et l'Été correspond à la saison la plus sèche.

Tableau.II.9 : Précipitations saisonnières aux différentes stations (1974 -2010)

Station	Automne		Hiver		Printemps		Été	
	P(mm)	(%)	P(mm)	(%)	P(mm)	(%)	P(mm)	(%)
Hennaya	96,9	24,77	145	37,07	136,7	34,95	12,5	3,19
Lala Setti	125,2	25,17	177,3	35,65	177,9	35,77	16,9	3,39
Tlemcen	83,8	25,95	127,1	39,36	101,7	31,49	10,3	3,18
Mefrouche	136,5	23,88	218,3	38,19	197,4	34,54	19,3	3,37

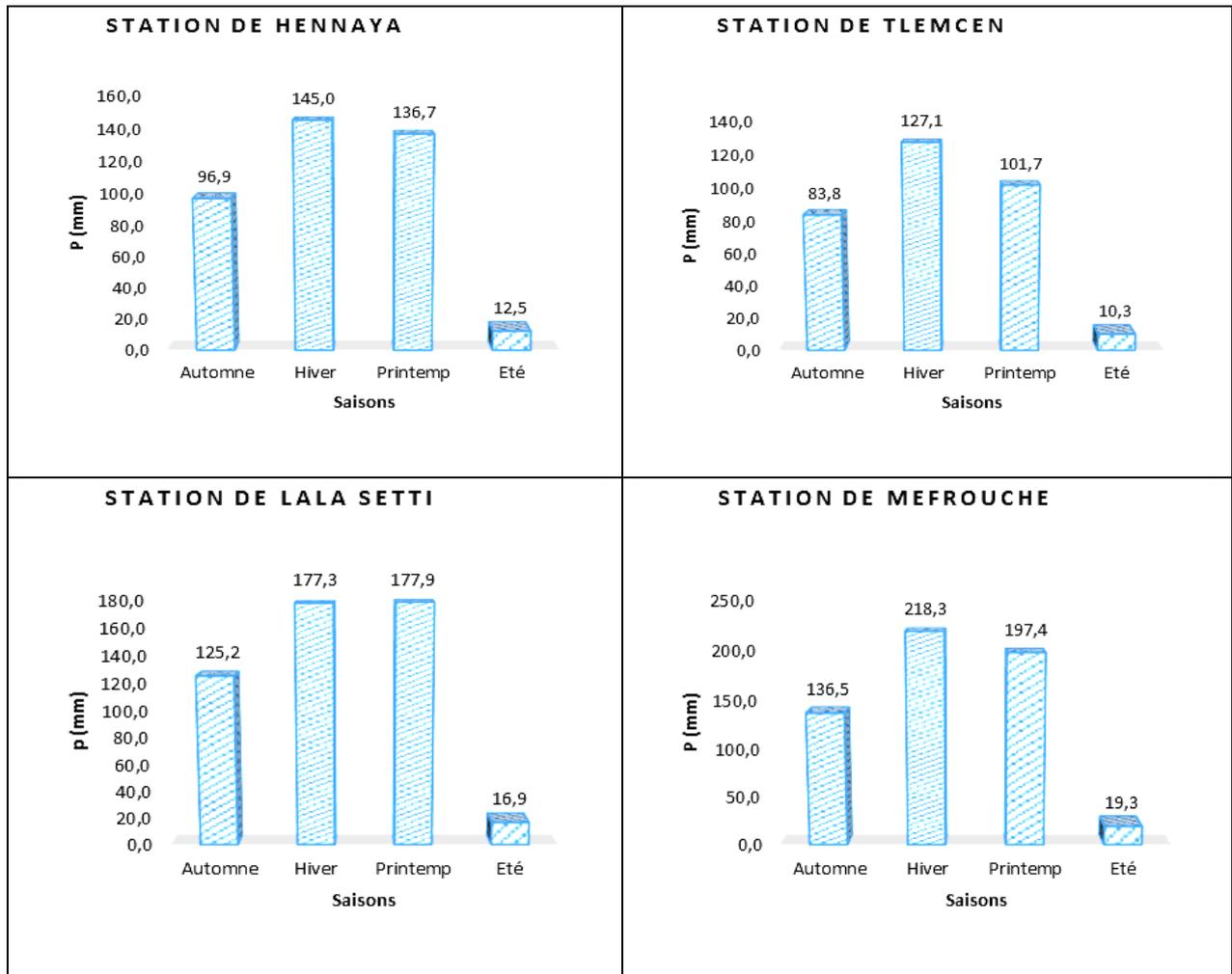


Figure.II.11 : Distribution des précipitations saisonnières au bassin d'oued Sikkak (1974 -2010)

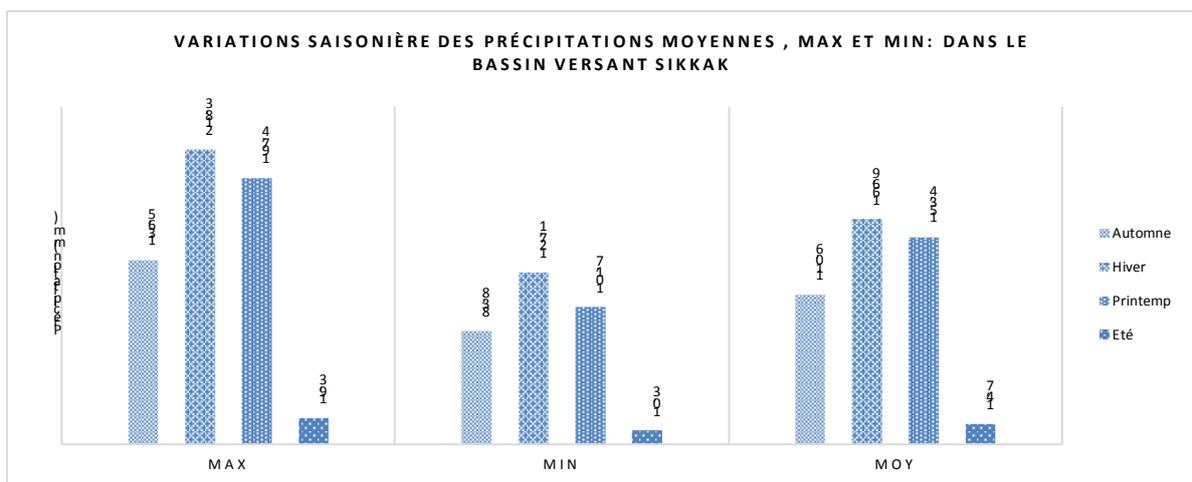


Figure.II.12 : Variation saisonnière des précipitations dans le bassin d'Oued Sikkak

I.5 - ETUDE DES TEMPERATURES

I.5.1 - Introduction

La température est un facteur important qui détermine le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques. Elle permet avec les précipitations le calcul du déficit d'écoulement et des indices climatiques. Les températures moyennes annuelles et mensuelles régissent directement en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, vitesse et turbulence du vent, précipitation) et biogéographiques, le phénomène d'évapotranspiration et déficit d'écoulement annuel et saisonnier (Bouanani. A, 2004).

I.5.2 - Les températures annuelles

Au niveau de notre zone d'étude, la mesure thermométrique est pratiquement disponible à une seule station celle de Zenata, pour cela nous avons utilisé les données de cette station pour les périodes allant de (1980/81) à (2009/10)

Tableau.II.10 : Températures moyennes, maximale et minimale annuelles à la station de Tlemcen (1981-2010)

Années	T° (C) Moy	T° (C) Min	T° (C) Max
1980-1981	16,1	10,03	22,17
1981-1982	18,07	11,52	24,63
1982-1983	16,1	10,57	23,21
1983-1984	16,89	11,36	23,66
1984-1985	17,51	11,58	23,85
1985-1986	17,71	11,81	23,87
1986-1987	17,84	11,72	23,93
1987-1988	17,82	12,65	24,55
1988-1989	18,6	11,86	24,58
1989-1990	18,22	13,07	24,87
1990-1991	18,97	11,99	23,83
1991-1992	17,91	11,39	23,55
1992-1993	17,47	11,25	23,76
1993-1994	17,5	11,78	24,26
1994-1995	18,02	12,27	24,47
1995-1996	18,37	12,61	24,28
1996-1997	18,45	12,16	24,09
1997-1998	18,13	12,69	24,58
1998-1999	18,63	11,94	24,14
1999-2000	18,04	12,01	24,44
2000-2001	18,22	12,33	24,97
2001-2002	18,65	12,09	24,53
2002-2003	18,31	12,72	24,59
2003-2004	18,65	12,22	24,3
2004-2005	18,26	11,44	24,14
2005-2006	17,79	12,23	24,49
2006-2007	18,36	12,32	24,61

2007-2008	18,46	12,15	24,5
2008-2009	18,33	12,16	23,85
2009-2010	18	13,24	25,03
Moyenne	17,98 C°	11,97 C°	24,19 C°

La température moyenne annuelle à la station de Zenata (fig.II.13) pendant la période (1981-2010), montre une faible variation (Tableau.II.11). La température moyenne annuelle est d'environ 17.98C°.

Tableau.II.11 : Paramètres statistiques des températures annuelles (1980-2010)

	Températures Moyenne (1980-2010)
Moyenne	17,98
Ecart type	0,67
Max	18,97
Min	16,1
CV	0,04

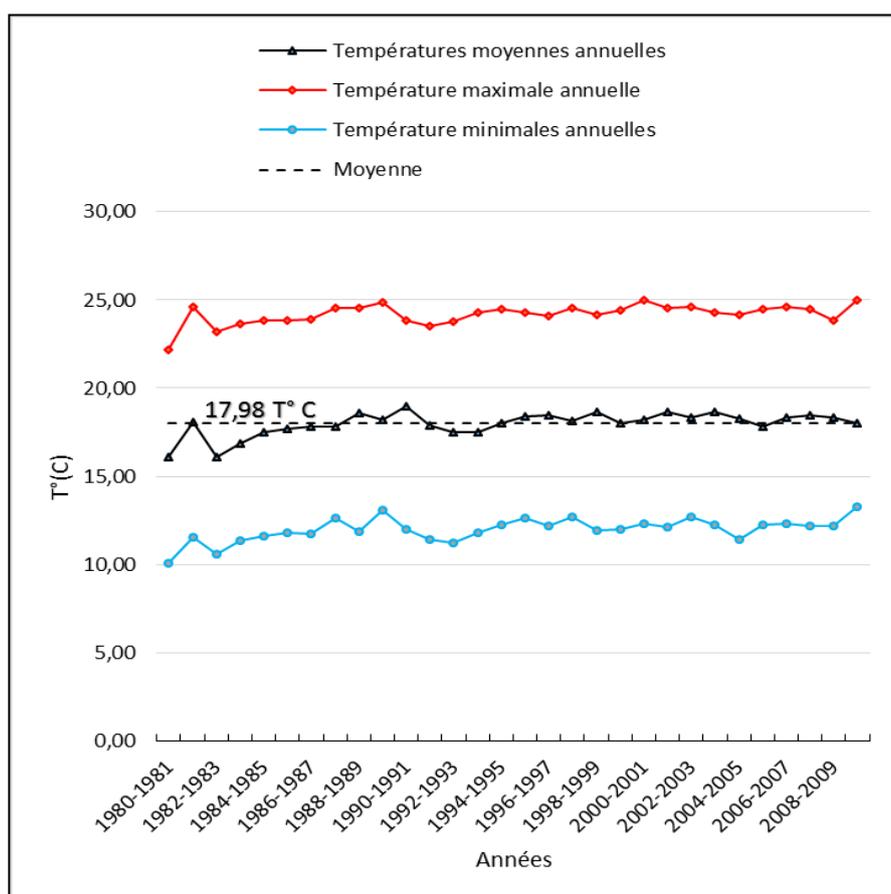


Figure.II.13 : Variation annuelle des températures moyennes, maximales et minimale au niveau de la station de Zenata (1980-2010)

I.5.3 - Les températures mensuelles

La température moyenne mensuelle à la station de Zenata pendant la période (1981-2010) (Tableau.II.12) montre que les mois d'Août est le mois le plus chaud 25,96°C et Janvier le plus froid 10,42°C.

Tableau.II.12 : Moyennes mensuelles des températures à la station de Zenata – Tlemcen (1981-2010)

T°(C)	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT
MOY	23,22	19,46	15,12	11,98	10,42	11,55	13,52	15,31	18,27	22,18	25,36	25,96
MIN	17,48	13,62	9,63	6,63	5,12	6,21	7,69	9,41	12,56	16,34	19,28	19,95
MAX	29,95	25,98	20,93	17,49	16,49	17,60	19,97	21,99	24,94	29,15	32,80	33,27

Contrairement aux précipitations, les saisons thermiques semblent bien tranchées (fig.II.13). La saison chaude s'étend de Mai à Octobre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle, alors que la saison froide correspond à Novembre-Avril.

Le maximum de température est atteint en juillet et Août avec une moyenne de 25,96°C, alors que le minimum d'environ 5,12°C se situe en janvier. Cette division de l'année en deux saisons thermiques, n'est pas sans conséquence sur le comportement hydrologique et hydrogéologique du bassin.

I.5.4 - Diagrammes pluvio-thermiques

Ces diagrammes représentent, sur un même système d'axes, la variation des températures et celle des précipitations moyennes mensuelles. Nous avons porté les valeurs des températures moyennes à l'échelle double des précipitations moyennes mensuelles sur l'axe des ordonnées, les différents mois de l'année figureront sur l'axe des abscisses (Fig.II.14). L'utilisation de la méthode pluvio-thermique va nous permettre, avec plus de précision, de déterminer les périodes humides et sèches.

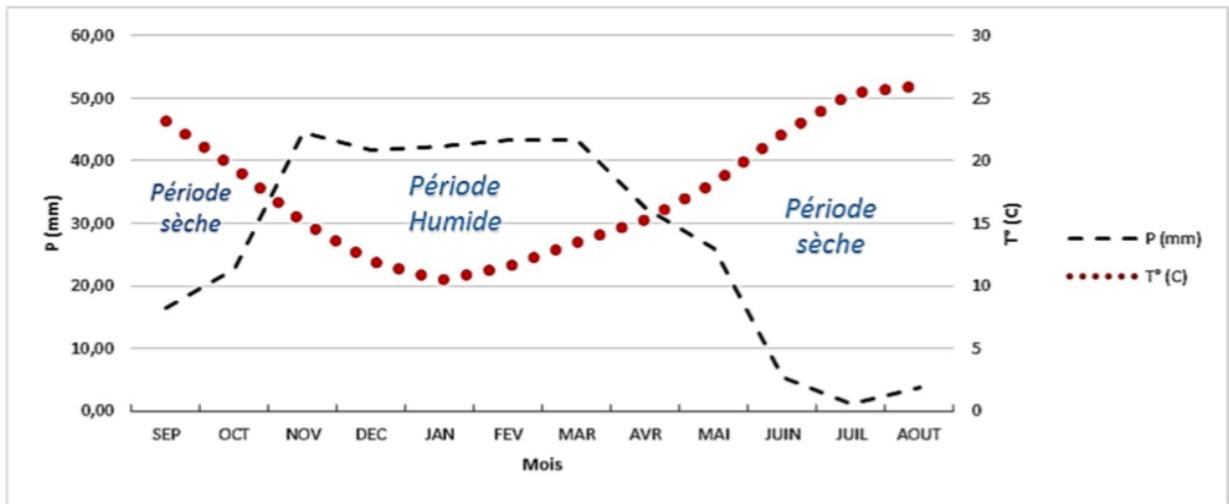


Figure. II.14 : Diagrammes pluvio-thermiques.

Les allures des courbes de variation des précipitations sont en opposition avec celles des variations des températures moyennes indiquant la présence, au niveau de la station de Zenata, de deux périodes :

- Une longue période humide constituée de 7 à 8 mois. Pour toutes les stations la période humide oscille entre Octobre et Avril.
- Une période sèche débutant à partir de juin, proprement dite, jusqu'à Septembre.

Les périodes sèches sont caractérisées par la rareté des pluies surtout pour les mois de Juin, Juillet et Août, au cours desquels les températures atteignent leurs maximums.

I.6 - CONCLUSION

L'étude climatique a été élaborée en se basant sur une série de mesures correspondant à une période de 38 années d'observation (1973/74 à 2009/10).

L'étude réalisée dans ce chapitre montre que le bassin versant de l'Oued Sikkak exposé à un arrosage important correspondant à 491,5 mm de précipitation moyenne annuelle et que son climat est caractérisé par d'importantes irrégularités interannuelles.

Il ressort également de cette analyse climatique que le bassin versant étudié jouit de conditions relativement privilégiées, surtout en hiver et au printemps. La période humide est caractérisée par des températures très faibles par rapport à la température moyenne annuelle notamment pour le mois de Janvier, et des hauteurs de précipitations maximales observées surtout aux mois de Novembre et Mars. En

revanche, la période sèche est connue par la rareté des pluies surtout pour les mois de Juin, Juillet et Août, au cours desquels les températures atteignent leurs maximums.

Ce bassin fait l'objet aussi d'une proportion élevée de chutes de pluie torrentielles qui surviennent surtout entre les mois de Septembre et Mai, ce qui conduit à se poser la question suivante : Ce bassin est-il vraiment le plus touché par les agents de l'érosion ? La réponse à cette question devient plus pertinente car il ne faut pas tenir compte uniquement de la pluviométrie, qui est partout plus au moins importante pour déclencher le phénomène, mais aussi des conditions hydrologiques du cours d'eau et notamment les écoulements qui font l'objet de deuxième partie du chapitre.

II - LES ECOULEMENTS

II.1 - INTRODUCTION

Le comportement hydrologique d'un cours d'eau est lié à la diversité des facteurs physico géographiques et climatiques analysés dans les parties précédentes.

L'écoulement ou le ruissellement superficiel se définit comme le phénomène de drainage des eaux pluviales au niveau de la surface du bassin versant. Les écoulements constituent donc le facteur essentiel pour l'alimentation des cours d'eau.

L'analyse des observations hydrométriques au niveau des cours d'eau donne une idée précise sur le comportement hydrologique de ces derniers ainsi que sur le processus d'interférence des facteurs physico-géographiques.

Puisque les écoulements varient en fonction du temps, il serait intéressant d'avoir des relevés instantanés de jaugeage en un point donné et en un temps déterminé pour pouvoir suivre l'évolution des débit durant toute une période bien déterminée .

Une évaluation des ressources en eau et de leur variabilité passe donc par la prise en compte des :

- Débits moyens annuels
- Variations mensuelles saisonnières des débits.

Nous allons baser notre étude de l'écoulement de l'Oued Sikkak, sur les données des débits liquides instantanés relatives à la période de (1972/73 à 1998/99) à la station hydrométrique d'Ain Youssef et la période de (1999/00 à 2009/10) à la station hydrométrique de Sidi Moussa situé à 9 km en amont du barrage Sikkak. (Fig. II.15)

Ces données sont fournies par l'A.N.R.H d'Alger et Tlemcen. Les caractéristiques de ces stations hydrométriques sont consignées au tableau (II.13).

Tableau.II.13 : Caractéristique des stations hydrométriques et périodes de mesure.

Stations	Code	X (km)	Y (km)	Z(m)	Périodes
Ain Youssef	160704	137,700	201,700	210	1972/73-1998/99
Sidi Moussa	160727	133,150	197,250	250	1999/00-2009/10

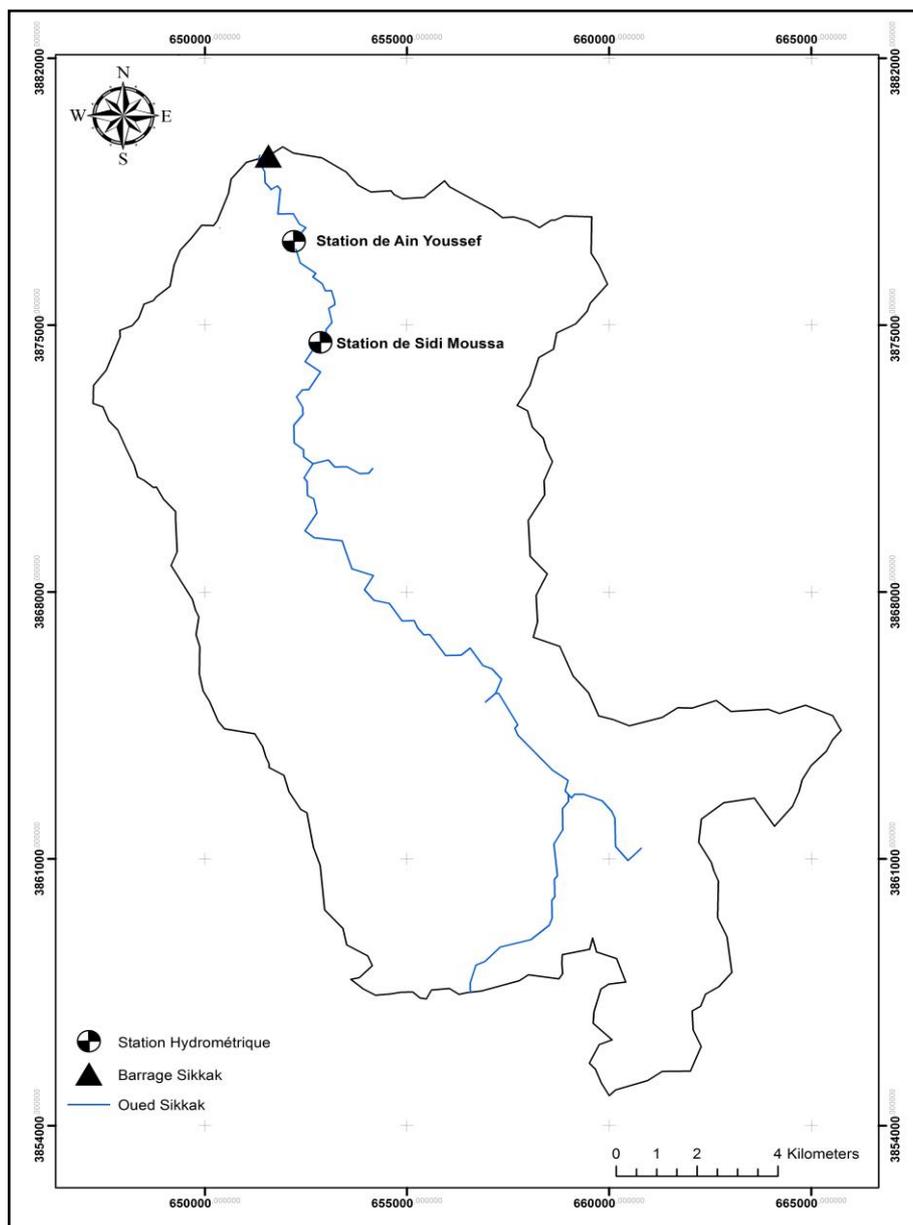


Figure.II.15 : Carte de localisation des deux stations Sidi Moussa et Ain Youssef

II.2 - RÉGIME HYDROLOGIQUE

La réponse aux précipitations, posées à l'échelle d'un bassin versant, passe nécessairement par l'étude du bilan hydrologique menée sur une période d'observation pour analyser le régime hydrologique de l'oued Sikkak et évaluer sa sensibilité aux variations du climat. Cette analyse hydrologique concerne la quantification et la variabilité des apports liquides moyens annuels et mensuels.

II.2.1 - Débits moyens annuels

L'analyse des courbes des variations des débits moyens annuels (fig.II.16) montre la forte irrégularité des débits de l'oued Sikkak. (Tableau.II.14)

Tableau.II.14 : Débits moyens annuels (m^3/s) à la station d'Ain Youssef et Sidi Moussa (1972/1973-1998/1999).

Année hydrologique	Qm (m^3/s) Ain Youssef	Qm (m^3/s) Sidi Moussa
1972-1973	4,63	
1973-1974	2,50	
1974-1975	1,92	
1975-1976	1,12	
1976-1977	0,75	
1977-1978	0,76	
1978-1979	0,44	
1979-1980	0,75	
1980-1981	0,71	
1981-1982	0,35	
1982-1983	0,29	
1983-1984	0,16	
1984-1985	0,18	
1985-1986	0,46	
1986-1987	0,71	
1987-1988	0,33	
1988-1989	0,13	
1989-1990	0,20	
1990-1991	0,18	
1991-1992	0,15	
1992-1993	0,44	
1993-1994	0,25	
1994-1995	0,26	
1995-1996	0,20	
1996-1997	0,43	
1997-1998	0,48	
1998-1999	0,37	
1999/2000		0,13
2000/2001		0,20
2001/2002		0,66
2002/2003		3,58
2003/2004		3,36
2004/2005		0,22
2005/2006		0,41
2006/2007		0,22
2007/2008		0,71
2008/2009		2,54
2009/2010		1,43
Moyenne	0,71	1,20
Ecart type	0,95	1,39
Cv	1,34	1,15

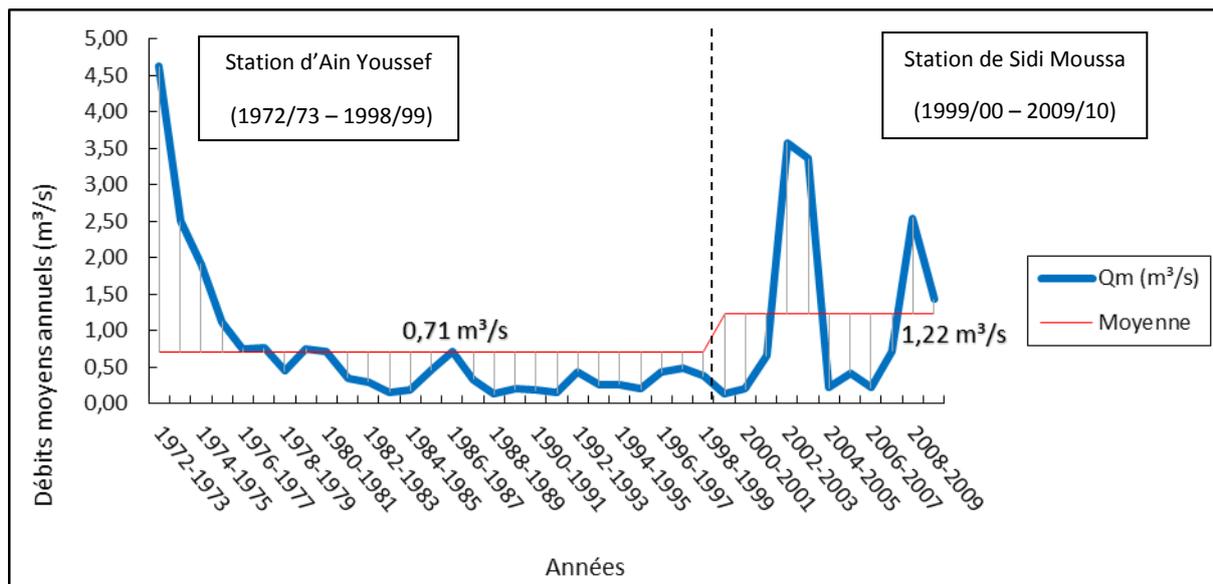


Figure.II.16 : variation interannuelle des débits moyens annuels (m^3/s) au niveau d'oued Sikkak (1999/2000 -2009/2010).

La variation annuelle des modules (Tableau.II.14) au niveau des deux stations est illustrée par les (Fig.II.16). Le tableau.II.14 , montre que l'oued Sikkak débite 0,71 m^3/s en moyenne pour la période de 1972/73 à 1998/99 à Ain Youssef, avec une augmentation de moyenne jusqu'à 1,22 m^3/s à la station de Sidi Moussa pour la période de 1999/00 à 2009/10, cette augmentation dû aux crues signaler au début des années deux mille (2002/03), (2003/04) et (2008/09) avec une aire de réception de 217,5 km^2 , débit relativement faible qui s'explique par la présence du barrage du Mefrouche en aval sur l'oued Nachef ainsi que le caractère karstique prépondérant des formations géologiques en amont.

II.2.1.1 - Etude statistique des débits annuels

Le Tableau.II.15 donne les différentes caractéristiques statistiques des débits annuels de l'oued Sikkak. Le coefficient de variation est de l'ordre de 0,732 et l'écart type de 1,233 m^3/s .

Tableau.II.15 : Caractéristiques statistiques des débits annuels (1925/26-2009/10)

Moyenne	1,684
Ecart Type	1,233
Coefficient de variation	0,732
Coefficient d'asymétrie	0,802
Q Max / Q Min	209,3
Médiane	1,462
Maximum	5,265
Minimum	0,025

II.2.1.1.1 - Ajustement par la loi log normale

Le coefficient de variation $C_v=0,732 > 0.5$, cela laisse supposer que l'ajustement suit une loi symétrique log normale, le test χ^2 permettra de vérifier cette adéquation.

Tableau.II.16 : Caractéristiques statistiques des débits annuels (1925/26-2009/10)

Classe	Effectif (ni)	u (Gauss)	Fréquence de limite sup (pi)	Effectif Théoriques (npi)	Effectifs Théoriques (N/k)	Khi (Deux) Khi ²
]-1,6 ; -0,607]	11	-1,4615	1-0,9279	10,21	17	0,06
[-0,607 ; -0,276]	7	-0,7341	1-0,7673	5,37	17	0,49
[-0,276 ; 0,054]	14	-0,0088	1-0,4960	6,94	17	7,16
[0,054 ; 0,386]	29	0,7209	0,7642	22,16	17	2,10
[0,386 ; 0,717]	24	1,4484	0,9251	22,20	17	0,14

$$Khi^2 = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} = 9,98 \quad (17)$$

Risque=1%=0.01

Dégréés de liberté =5-2-1=2

Tableau.II.17 : Résultats du test du Khi²

Test d'erreurs =1%	Khi2 Calculé	Khi2 tabulé	Ajustement Probable
Sikkak	9,98	9,21	log normale

Le Khi2 tabulé est \approx Khi2 calculé, l'ajustement permet donc d'admettre une distribution log normale des débits.

II.2.1.1.2 - Test graphique

On reporte les données sur papier fonctionnel gaussio-arithmétique permettant de représenter la fonction $\text{Log } Q = f(F_i)$. Le graphe comporte sur l'axe des abscisses les fréquences en échelle gaussienne et sur l'axe des ordonnées en échelle arithmétique la variable statistique (précipitation). On obtient une distribution représentée par une droite (la droite d'Henry) l'équation :

$$\text{Log}Q = \overline{\log Q} + \sigma_{\log} U \quad (18)$$

Avec :

σ : Écart type de Q ;

LogQ : les débits logarithmiques ;

$\overline{\log Q}$: La moyenne de logQ.

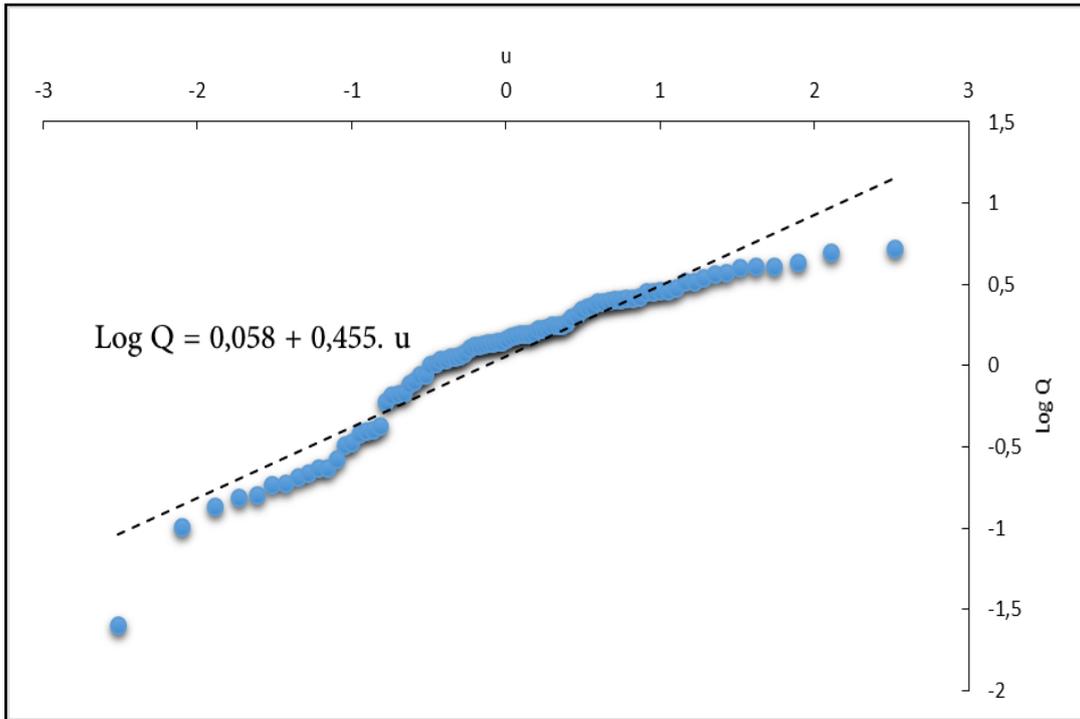


Figure.II.17 : droite d'ajustement des débits à la loi log normale

Remplaçons (u) par sa valeur dans les équations :

$$\log Q = 0,058 + 0,455 \cdot U \quad (19)$$

U : variable réduite, pour

$$\left\{ \begin{array}{ll} F1 = 0,5 & U = 0 \\ F2 = 0,9 & U = 1,28 \end{array} \right.$$

On obtient :

Tableau.II.18 : fréquences pour l'ajustement de la droite d'HENRY

$F1 = 0,5$ ($U = 0$)	Log Q = 0,058
$F2 = 0,9$ ($U = 1,28$)	Log Q = 0,64

Les points de coordonnées : (0,5 ; 0,058) et (0,9 ; 0,64) Nous permettent de tracer la droite représentative d'adéquation « Droite d'Henry ».

Tableau.II.19 : Débits décanale ; centennale et millénaire

Période de retour	10 ans	100 ans	1000 ans
u	1,28	2,33	3,1
Log Q	0,64	1,11	1,46
Q (m ³ /s)	4,36	13,12	29,41

II.2.1.2 - L'irrégularité inter annuelle des débits moyens annuels

L'irrégularité interannuelle 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_{moy}). (Tableau.II.20).

Tableau.II.20 : valeurs caractéristiques des modules au niveau de bassin versant d'Oued Sikkak

Année hydrologique	Qm (m ³ /s) Ain Youssef	Qm (m ³ /s) Sidi Moussa	Coefficient d'hydraulicité
1972-1973	4,63		6,528
1973-1974	2,5		3,525
1974-1975	1,92		2,707
1975-1976	1,12		1,579
1976-1977	0,75		1,057
1977-1978	0,76		1,072
1978-1979	0,44		0,620
1979-1980	0,75		1,057
1980-1981	0,71		1,001
1981-1982	0,35		0,493
1982-1983	0,29		0,409
1983-1984	0,16		0,226
1984-1985	0,18		0,254
1985-1986	0,46		0,649
1986-1987	0,71		1,001
1987-1988	0,33		0,465
1988-1989	0,13		0,183
1989-1990	0,2		0,282
1990-1991	0,18		0,254
1991-1992	0,15		0,211
1992-1993	0,44		0,620
1993-1994	0,25		0,352
1994-1995	0,26		0,367
1995-1996	0,2		0,282
1996-1997	0,43		0,606
1997-1998	0,48		0,677
1998-1999	0,37		0,522
1999/2000		0,13	0,106
2000/2001		0,2	0,163
2001/2002		0,66	0,539
2002/2003		3,58	2,926
2003/2004		3,36	2,746

2004/2005		0,22	0,180
2005/2006		0,41	0,335
2006/2007		0,22	0,180
2007/2008		0,71	0,580
2008/2009		2,54	2,076
2009/2010		1,43	1,169

Les séries hydrométriques permettent de cerner l'évolution des débits sur des années successives. En effet, plus de 60% des années hydrologiques sont déficitaires pour les deux stations. Certaines valeurs des modules annuels sont élevées, conséquence aux fortes crues de saison froide qu'avait connue le bassin du Sikkak.

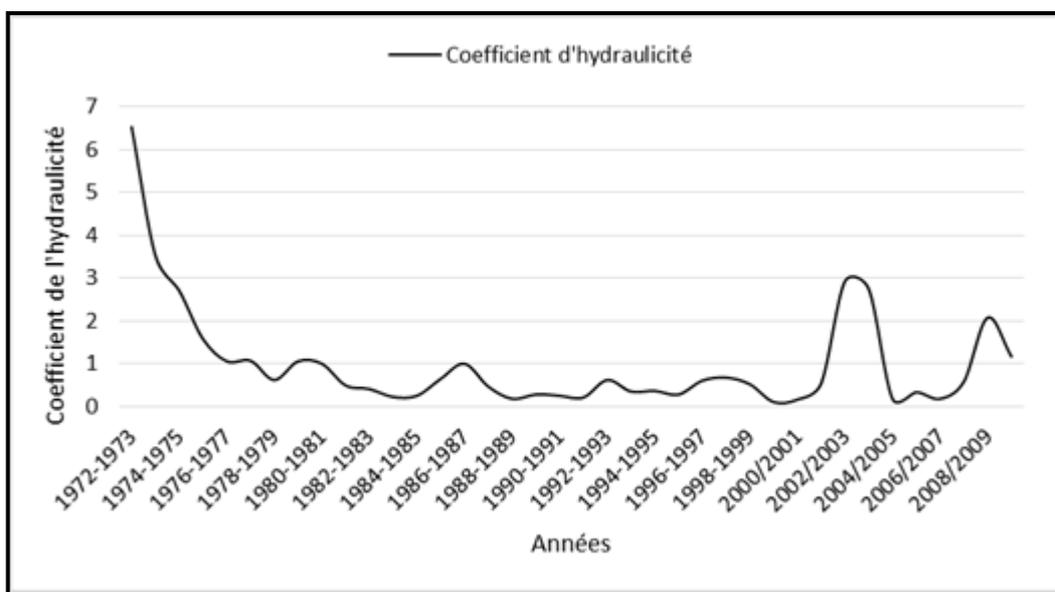


Figure.II.18 : coefficient d'hydraulicité

Tableau.II.21 : valeurs caractéristiques des modules

Station	Moyenne	Nbr	Max	Min	Nombre d'années > Moyenne	Coefficient D'immodération	Cv
Ain Youssef (1972/73 – 1998/99)	0,7	26	4,63	0,13	9	35,61	1,34
Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10)	1,22	11	3,58	0,13	4	27,53	1,07

II.2.1.2.1 - Coefficient d'immodération :

Les coefficients d'immodération (Tableau.II.21) sont eux aussi élevés, ils varient entre 27,53 et 35,61, ces dernières valeurs sont remarquables au niveau des deux séries fournies par la station de Sidi Moussa et Ain Youssef et qui montrent l'irrégularité accentuée des débits inter annuels.

II.2.1.2.2 - Coefficient de variation :

La variation inter annuelle peut être aussi précisée par le coefficient de variation (Cv) (tableau.II.21).

Les valeurs du coefficient de variation sont élevées, nous avons relevé des fortes valeurs au niveau des séries de données fournies par les deux stations 1,07 et 1,34 respectivement à Ain Youssef et Sidi Moussa. Évidemment qu'il s'agit d'une période climatique "sèche" qui est observé à partir de 1981/82 jusqu'à la crue de 2002/03 et 2003/04. Cette variabilité dans l'ensemble est liée à l'alimentation essentiellement pluviale irrégulière des cours d'eau.

II.2.2 - Débits moyens mensuels :

Comparativement à l'analyse annuelle qui étudie la variation sur une longue durée, l'étude de l'écoulement à l'échelle mensuelle peut donner une meilleure explication, notamment sur le régime fluvial et ses fluctuations.

Pour ce faire, nous avons utilisé quelques paramètres intéressants tels que le coefficient de variation et le coefficient mensuel des débits. La valeur du débit la plus élevée correspond au mois de Février avec une valeur de 1,91 m³/s à la station de Sidi Moussa jusqu'à 4,55 m³/s à la station de Ain Youssef (Tableaux II.22, II.23).

Tableau.II.22 : Répartition des Débits moyens mensuels à la station d'Ain Youssef (1972/73 - 1998/99)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
M	0,385	0,324	0,420	0,632	0,725	1,066	2,831	0,986	0,663	0,230	0,219	0,057
Cv	1,842	2,189	1,691	1,123	0,980	0,666	0,251	0,720	1,070	3,081	3,240	12,527
CMD	0,543	0,457	0,591	0,891	1,021	1,502	3,987	1,388	0,934	0,325	0,309	0,080
σ	1,517	0,544	0,313	0,447	0,340	1,054	8,353	1,620	0,908	0,270	0,615	0,110
Max	8,095	2,807	1,051	1,858	1,437	4,686	43,616	7,633	4,227	0,832	3,174	0,453
Min	0,000	0,000	0,000	0,035	0,070	0,006	0,148	0,049	0,023	0,001	0,000	0,000

Tableau.II.23 : Répartition des Débits moyens mensuels à la station de Sidi Moussa (1999/00 - 2009/10)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
M	1,326	1,287	1,466	1,211	2,801	4,210	0,732	0,685	0,833	0,077	0,024	0,029
Cv	0,913	0,940	0,825	0,999	0,432	0,287	1,653	1,767	1,453	15,732	50,727	42,437
CMD	1,096	1,063	1,212	1,001	2,315	3,480	0,605	0,566	0,688	0,064	0,020	0,024
σ	3,225	2,798	2,023	2,031	5,266	8,035	0,855	1,148	1,277	0,065	0,026	0,048
Max	10,653	9,549	6,939	5,410	17,390	23,289	2,915	3,886	4,291	0,175	0,082	0,140
Min	0,000	0,044	0,184	0,011	0,136	0,024	0,023	0,022	0,016	0,000	0,000	0,000

M : débit moyen (m^3/s) ;
 CMD : coefficient mensuel de débit ;
 Max : débit maximum du mois ;
 Min : débit minimum du mois ;
 σ : écart type ;
 Cv : coefficient de variation.

Les mois de Février et Mars présentent des valeurs les plus élevées des débits à Ain Youssef, avec respectivement $1,06 m^3/s$ et $2,83 m^3/s$. Pour Sidi Moussa on remarque que les mois qui présentent des valeurs élevées sont Janvier et Février avec des débits moyens mensuels respectivement $2,80 m^3/s$ et $4,21 m^3/s$. Les valeurs les plus faibles sont observées à partir de Juin jusqu'à Septembre, mois où elles varient entre $0,057 m^3/s$ et $0,385 m^3/s$ à Ain Youssef et entre $0,024 m^3/s$ et $1,32 m^3/s$ à Sidi Moussa. (Fig.II.19), (Fig.II.20).

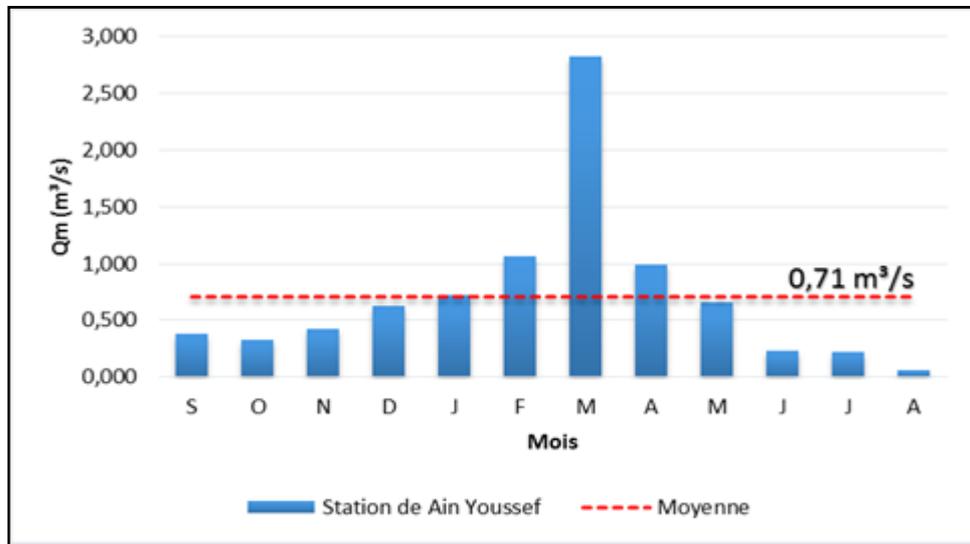


Figure.II.19 : Répartition des débits mensuels à la station d'Ain Youssef (1972-1999)

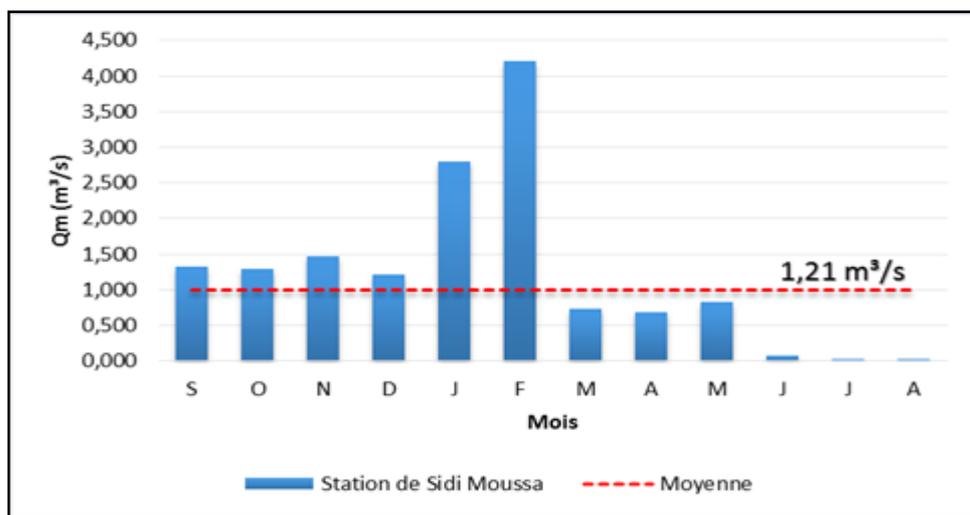


Figure.II.20 : Répartition des débits mensuels à la station de Sidi Moussa (1999-2010)

II.2.2.1 - Coefficient de variation

A partir des moyennes arithmétiques et des écarts types de la série des débits mensuels, nous avons calculé les coefficients de variations pour chaque mois, ces valeurs variant entre 0,20 et 50,72 pour la station de Sidi Moussa (1972/73-1998/99) et entre 0,25 et 12,52 au niveau de la station d'Ain Youssef, ce qui montre une forte fluctuation (Fig.II.21).

Tableau.II.24 : Répartition des coefficients de variation des débits mensuels aux stations de Ain Youssef et Sidi Moussa

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Ain Youssef (1972-1999)	1,842	2,189	1,691	1,123	0,980	0,666	0,251	0,720	1,070	3,081	3,240	12,527
Sidi Moussa (1999-2010)	0,913	0,940	0,825	0,999	0,432	0,287	1,653	1,767	1,453	15,732	50,727	42,437

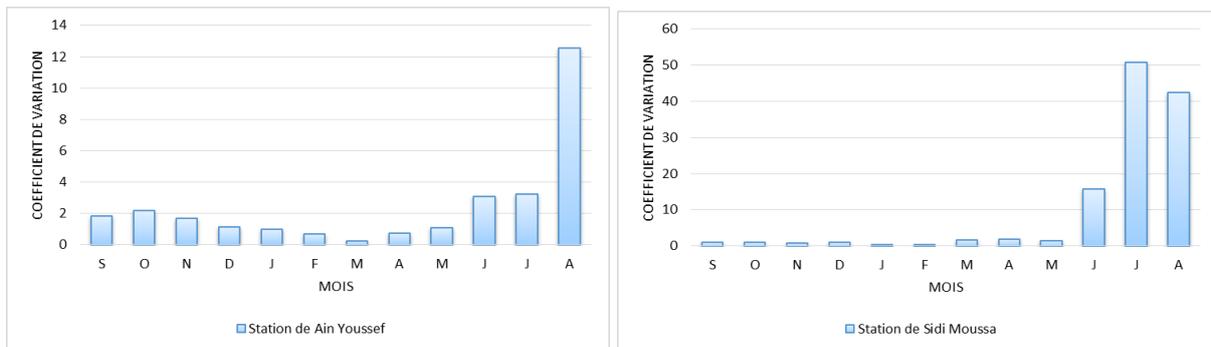


Figure.II.21 : Valeurs du coefficient de variation à l'échelle mensuelle

Les dispersions les plus importantes sont observées en Juin, Juillet, Août et Septembre où les coefficients de variation dépassent 6 à Ain Youssef et dépassent 40 pour la station de Sidi Moussa. Avec la diminution de la dispersion en hiver et pendant le mois de Mars, la courbe de la variabilité prend la forme d'une cuvette.

II.3 - EVOLUTION DES DEBITS LIQUIDE EN FONCTION DES PRECIPITATIONS

II.3.1 - Variation interannuelle

La figure (II.22) permet de voir la réaction interannuelle du cours d'eau aux précipitations.

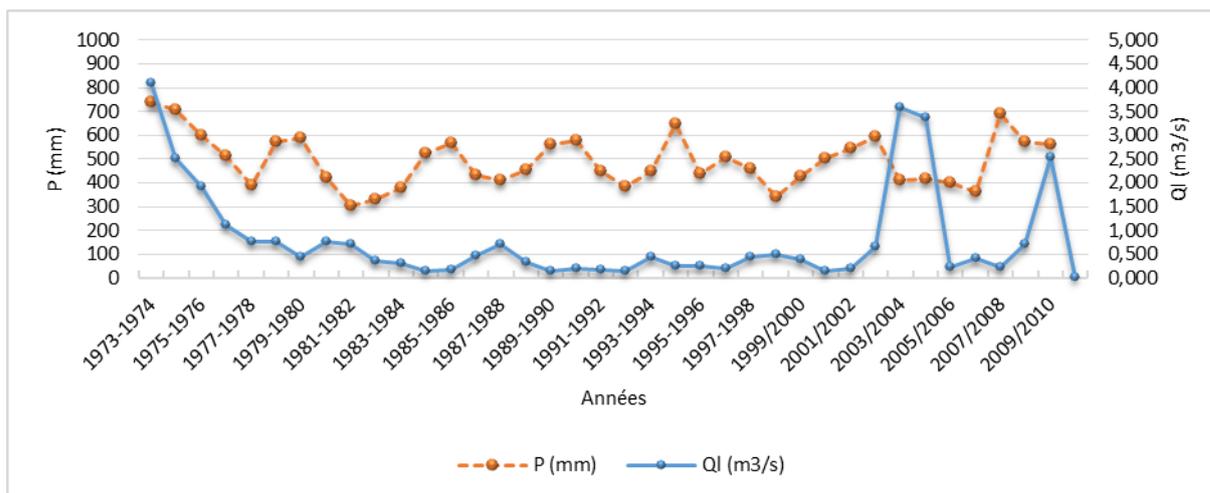


Figure.II.22 : Variation interannuelles des précipitations (Tlemcen 1974-2010) et débit de l'oued Sikkak (Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10))

Les deux courbes ainsi tracées (celle des débits et précipitations) pour la même période (1972-2010) à Sikkak, n'évoluent pas parfaitement dans le même sens et de la même façon.

II.3.2 - Variations mensuelles

Le débit d'un cours d'eau n'est pas toujours en relation directe avec les précipitations tombant sur son bassin versant. "Il faut toujours garder à l'esprit que le plus souvent le débit d'une rivière est en quelque sorte un résidu aléatoire des précipitations et non un pourcentage quasi-constant de celles-ci" (Pardé M., 1963).

Par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'un cours d'eau ne draine pas forcément toutes les eaux précipitées sur son bassin et ceci est particulièrement net dans le cas d'un bassin Karstique. (Fandi.W, 2011)

Dans l'objectif de rechercher des relations entre les débits liquides et les précipitations ; on a soumis à régression les valeurs annuelles et mensuelles des deux paramètres (débits liquides, précipitations).

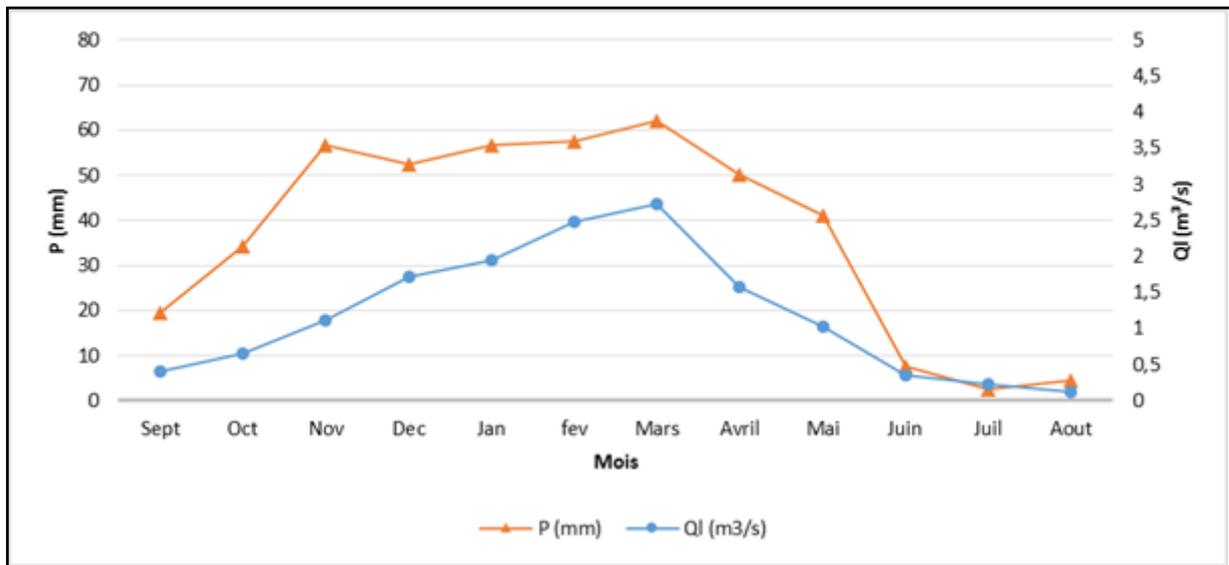


Figure.II.23 : Variation des précipitations et débit mensuels (Ain Youssef (1973/74 à 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)) de l'oued Sikkak

Ces deux séries correspondent aux données pluviométriques la station de Tlemcen (1974-2010), et aux débits de la station Ain Youcef (1973/74-1998/99) et la station de Sidi moussa (1999/00-200910).

Par leurs valeurs extrêmes très dispersées et leurs intensités variables, les précipitations mensuelles engendrent une irrégularité interannuelle des écoulements, et par conséquent leur relation aux précipitations annuelles P (figure.II.24), semble difficile à établir.

Toutefois, on peut noter une tendance suivant un modèle polynomiale dont la courbe moyenne est : $Ql = 0,00005 P^2 - 0,03 P + 7,2972$ où le coefficient de corrélation $R = 0,56$.

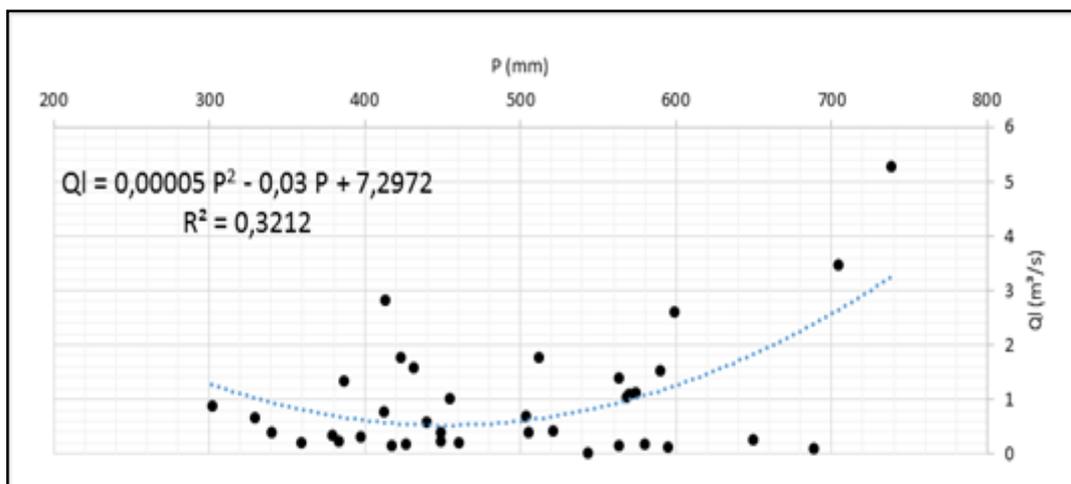


Figure.II.24 : Relation liant les débits liquides aux précipitations annuelles de l'oued Sikkak (1973/74 – 2009/10)

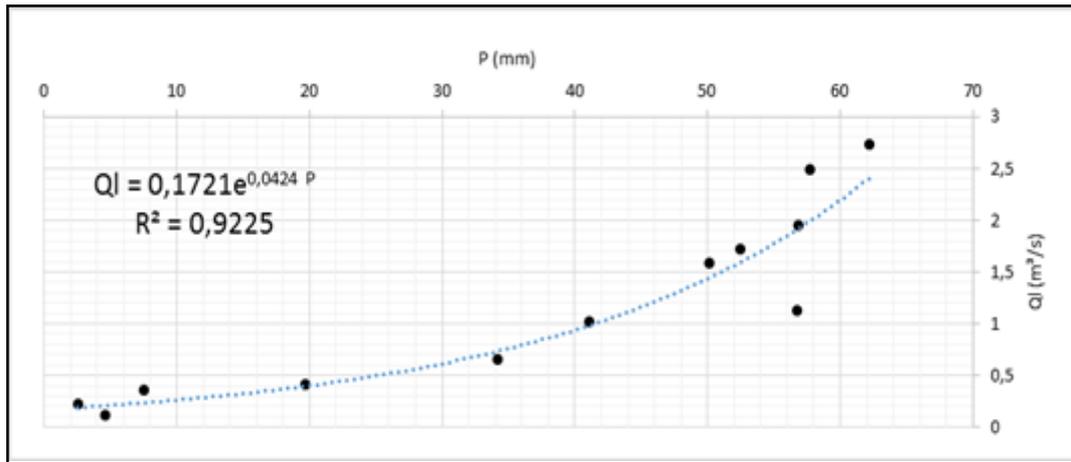


Figure.II.25 : Relation liant les débits liquides aux précipitations mensuelles de l’oued Sikkak (1973/74 – 2009/10)

Il n’en est pas de même pour les valeurs mensuelles représentées par un modèle exponentielle : $Ql = 0,1721 e^{0,0424 P}$ où le coefficient de corrélation : $R = 0,96$ exprime que le modèle est bon.

II.4 - CONCLUSION

L’étude des écoulement superficielles, dans ce chapitre est basée sur une série de mesures de 38 années d’observation de la période allant de 1972/1973 à 1998/1999 à la station de Ain Youssef et la période de 1999/2000 à 2009/2010 à la station de Sidi Moussa.

Cette analyse a montré que le bassin versant de l’Oued Sikkak présente un débit moyen annuel de 0,71 m³/s à Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) et 1.21 m³/s pour la station de Sidi Moussa (1999/00 - 2009/10). Ces débits correspondent à une lame moyenne annuelle d’écoulement estimée respectivement à 102,99 mm et 175,52 mm.

Les années hydrologiques de 1972/1973, 2002/2003 ,2003/2004 et 2008/2009 représentent de fortes abondances en écoulement. Elles coïncident parfaitement avec les années extrême humide au regard des précipitations annuelles, ce qui explique que le régime hydrologique, à l’échelle annuelle, est fortement lié aux conditions climatiques qui alimentent ce dernier.

En revanche, Le régime hydrologique mensuel se résume à deux grandes périodes : Une période des hautes eaux qui se remarque surtout en hiver et persiste jusqu’au milieu de la saison printanière et une période des basses eaux qui débute a partir du mois de Mai et s’étale pendant toute la saison estivale.

Pour pouvoir généraliser et obtenir une bonne compréhension des processus d’érosion au niveau du bassin versant de l’Oued Sikkak, nous avons ajouté à la connaissance des facteurs physico géographique et hydro-climatiques, d’autres faits

démonstratifs et surtout explicatifs de l'accélération de l'érosion et de sa propagation en ayant recours à l'estimation du transport solide qui sera traité dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE III

ÉTUDE DU TRANSPORT SOLIDE

I - INTRODUCTION

En Algérie septentrionale, les conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et socioéconomiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène du transport solide. (*Meguenni.K, Remini.B, 2008*).

L'envasement et le transport solide constituent, par leurs importances, un problème majeur dans les pays du Maghreb. L'érosion, le transport solide et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, l'alluvionnement des retenues et de nombreux dégâts dont les coûts sont considérables. En Algérie, par exemple, les études d'aménagement hydromécaniques butent sur le problème de manque de données sur le transport solide afin d'évaluer son importance. (*Meddi M., Khaldi A. et Meddi H.,1998*)

L'ampleur de l'alluvionnement et l'exhaussement du fond des barrages par dépôts successifs des sédiments ramenés, par les cours d'eau maghrébins, ont suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs qui ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes du transport solide et de quantifier les volumes des sédiments transportés. Dans ce contexte, selon *Bouanani.A, 2004* on notera les travaux de *Tixeront, (1960), Heusch(1982), Milliman et Meade (1983), Sogreah (1983), Walling (1984), Lahlou(1990)* et plus récemment *Probst et Suchet (1992)* qui ont tenté d'expliquer l'érosion mécanique et de déterminer les dégradations spécifiques des bassins versants de ces régions.

D'autre part, *Ghorbel et Claude (1977), Rais et Abidi (1989), Albergel et al (1998), Snoussi et al. (1990), Merzouki (1992), Moukhchane et al. (1998), Demmak (1982), Bourouba (1997,1998), Terfous et al. (2001, 2003), Ghenim (2001), Megnounif et al. 2003, Bouanani et al (2013) et Achit M., Touaibia B. (2000)* ont présenté en conclusion de leurs travaux des informations significatives sur le flux des matières transportées par les cours d'eau de quelques bassins versants Tunisiens, Marocains et Algériens.

L'estimation du taux de sédimentation dans les bassins versants nécessite une bonne connaissance des apports solides. Ces derniers dépendent aussi bien des contraintes physiques au niveau des versants que de la nature et du volume des apports liquides et solides fournis au réseau d'écoulement. En plus de cette complexité, le manque de données constitue un handicap majeur dans l'évaluation et la prévision des flux hydro-sédimentaires dans le bassin versant ou de l'envasement des barrages. Cet état de fait a conduit de nombreux chercheurs à proposer des modèles de prévision afin de quantifier la charge solide transportée dans le but de réduire l'érosion hydrique et augmenter la durée de vie des barrages.

Les flux des matières en suspension mesurés résultent d'un ensemble de phénomènes de mise en mouvement, de dépôt et de reprise des sédiments qui

affectent les versants et les berges des cours d'eau. La quantification des flux de matière en suspension nécessite d'effectuer des mesures de concentrations en continu, événementielles ou ponctuelles dans le temps. (Tourki, M., 2010)

Dans cette partie, nous allons présenter une étude du phénomène de transport solide en suspension dans l'oued Sikkak.

II - GENERALITES :

Le transport des sédiments par un écoulement à surface libre joue un grand rôle dans de nombreux domaines. Dans la nature, il affecte la morphologie des cours d'eau, des estuaires et du littoral. Il agit également par les matières en suspension sur tout l'écosystème aquatique (atténuation de l'énergie lumineuse en particulier). Son impact sur les ouvrages hydrauliques est de première importance. Il est responsable du comblement des retenues, du déchaussement d'ouvrages dû à l'abaissement du lit. (FREY.P, 1991)

Le transport solide est le phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composée des éléments granulaires (sédiments fins, sable, galets ...) sous l'action de l'écoulement de l'eau.

Ce transport a lieu sur les versants (érosion des sols) et dans le réseau hydrographique (talwegs, rivière et fleuves ...). Il s'effectue sous trois modes différents, fonction de la taille des particules :

- Suspension (transport de la longue distance dans la masse de l'écoulement).
- Saltation (mode intermédiaire, sauts sur de courtes distances).
- Charriage (Déplacement des particules en contact avec le fond).

Dans la pratique, on ne retient généralement que les transports par suspension et par charriage, il est en effet difficile de déterminer une limite objective, dans le cas des écoulements réels et en présence d'un contexte granulométrique naturel (souvent hétérogène), à la distance du saut d'une particule au-delà de laquelle le charriage du fond ferait place à la saltation. (BRGM, 1996).

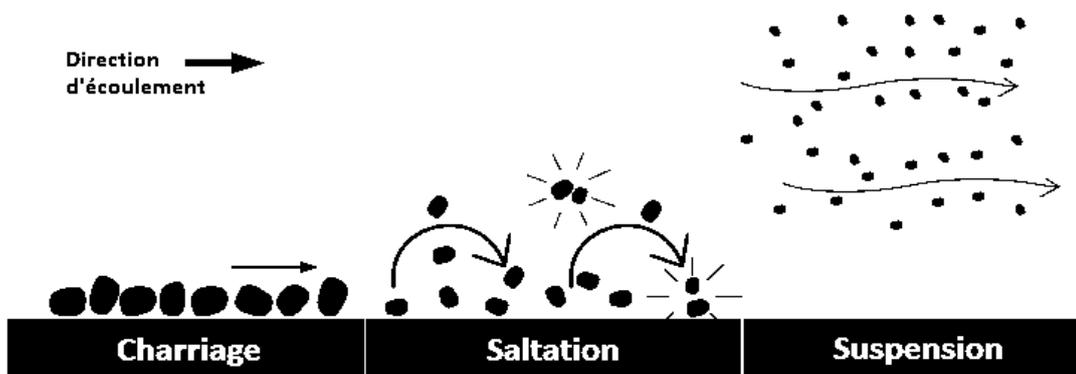


Figure.III.1 : Modes du transport solide.

II.1- Le transport solide en suspension

Le transport en suspension concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques.

Le transport solide en suspension est un phénomène assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances, à la vitesse du courant. Mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion. (*OMM, 2006*).

II.2- Le transport solide par charriage

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau. Les grains charriés se déplacent par à-coups à une vitesse moyenne très nettement inférieure à celle de l'eau (moins d'un mètre par heure).

Le transport par charriage est très discontinu à la fois dans le temps et dans l'espace. C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules. (*Granier.J, 1993*).

II.3- La saltation

C'est un mode intermédiaire entre le charriage « vrai » et la suspension. Les particules se propagent par grands bonds dans un espace de quelques dizaines de centimètres au-dessus du fond du lit mineur où se déroule le charriage. (*Malavoi J.R., 2011*)

III- PRESENTATION DES DONNEES :

L'étude est basée sur les mesures instantanées des débits liquides (Q_L) et des concentrations (C) réalisées par les services de l'ANRH. Ces mesures sont relatives à la station de Ain Youssef ($X = 131700$ m, $Y = 201700$ m, $Z = 210$ m) qui était située presque au niveau de l'emplacement du barrage Sikkak et la station de Sidi Moussa ($X = 133150$ m, $Y = 197250$ m, $Z = 250$ m) située à 9 km à l'amont et qui a pris la relève des mesures. Elles couvrent une période de 38 ans (1972/73 à

1998/99 pour Ain Youssef et de 1999/00 à 2009/10 pour Sidi Moussa). Les données sont fournies par les services hydrologiques (ANRH) d'Alger et celle de Tlemcen (Tableau.III.1).

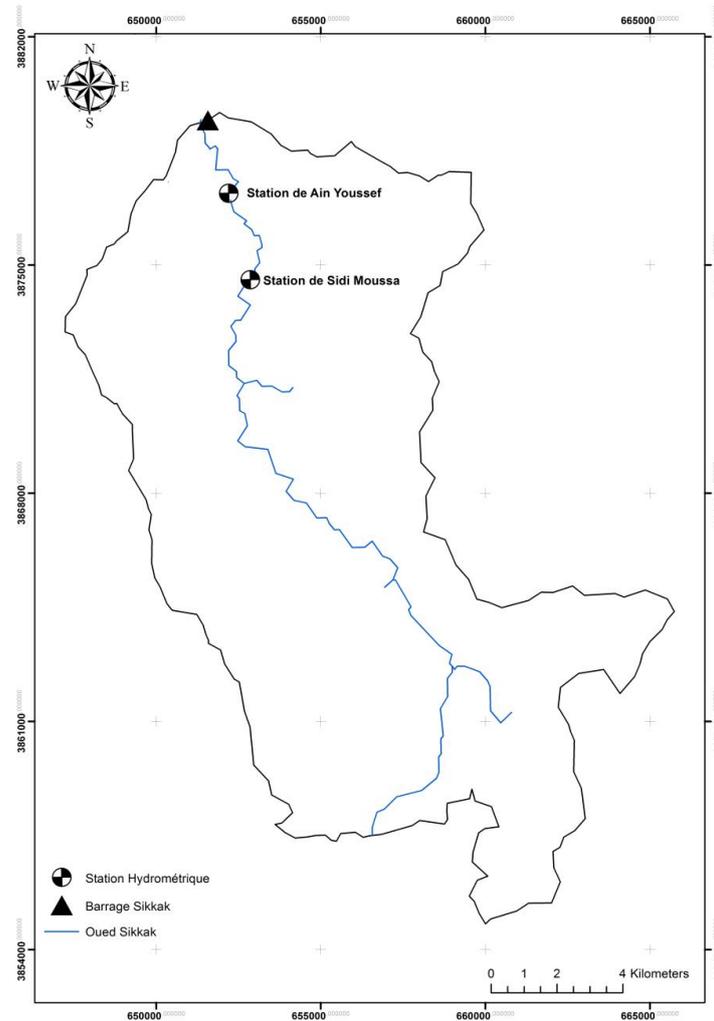


Figure.III.2 : Localisation des deux stations hydrométriques (Ain Youssef et Sidi Moussa).

Tableau.III.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques et périodes de mesure.

Stations	Code	X (km)	Y (km)	Z (m)	Période
Ain Youssef	160704	131,700	201,700	210	1972/73 à 1998/99
Sidi Moussa	160727	133,150	197,250	250	1999/00 à 2009/10

Les tableaux de données comprennent 6380 enregistrements instantanés de débits liquides et concentrations des sédiments en suspension sur une période de 38 ans (1972/73 - 2009/10).

L'étude est basée sur les valeurs instantanées des débits liquides (Q_L), donnés en m^3/s , mesurés aux deux stations. A chaque mesure effectuée, a été évaluée la charge de la matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés.

Le calcul du débit solide en suspension est basé sur la mesure du débit liquide de l'écoulement puisque :

$$Q_{SS} = C \cdot Q_L$$

Avec :

Q_{SS} : Débit solide en suspension (kg/s) ;

Q_L : Débit liquide (m^3/s) ;

C : Concentration ou turbidité (g/l).

IV- CALCUL DES APPORTS :

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, A_s (10^6 t ou MT) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, Ass (t/km²/an) sont données par :

$$A_s = Q_s \cdot N \cdot 10^9$$

$$Ass = (A_s \cdot 10^6) / S$$

Avec :

A_s : Apports solide annuel, mensuel ou saisonnier (MT) ;

Q_s : Débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (Kg/s) ;

N : temps en secondes. (s) ;

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

S : superficie du bassin versant (km²).

IV.1- Apports annuels :

Le flux annuel des matières solide en suspension exporté par l'Oued Sikkak est calculé par la formule :

$$A_s = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j C_j \quad \text{où}$$

C_j : est la concentration mesurée à l'instant t_j ;

Q_j : est le débit liquide à l'instant t_j ;

N : est le nombre de prélèvements effectués sur l'année considérée ;

$T_{j+1} - t_j$: est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Au moment des crues les prélèvements sont intensifiées, et donc par suite, le pas de temps est réduit

De même, Al , l'apport liquide annuel engendrant le flux des apports solides As , est calculé par la formule.

$$Al = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j \quad \text{où}$$

Le tableau (III.2) présente les apports liquides (A_l), solide (A_s) et les dégradations (A_{ss}) spécifiques au niveau du bassin pour la période (1972/73–2009/10).

L'oued Sikkak est affecté par une dégradation spécifique moyenne annuelle de 182,32 t/km²/an variant de 1,5 t/km²/an à 1271,2 t/km²/an. La lame d'eau écoulée moyenne est de 112,4 mm/an, apportant en moyenne 35143,7 tonnes de sédiments par an avec un débit solide moyen annuel de 2,84 kg/s.

Tableau.III.2 : Valeurs des apports liquides, solides et des dégradations spécifiques au niveau d'oued Sikkak au niveau de la station d'Ain Youssef et celle de Sidi Moussa.

Station d'Ain Youssef (1972/73 – 1998/99)						
Années	Qm A (m ³ /s)	Al (Hm ³)	Le (mm)	As (Tonnes)	As (MT)	Ass (t/km ² /an)
1972-1973	4,63	145,97	671,44	162496,71	0,16250	747,45
1973-1974	2,50	78,82	362,58	100465,11	0,10047	462,12
1974-1975	1,92	60,39	277,80	72136,85	0,07214	331,82
1975-1976	1,12	35,40	162,85	7950,10	0,00795	36,57
1976-1977	0,75	23,65	108,79	3473,42	0,00347	15,98
1977-1978	0,77	24,11	110,92	858,12	0,00086	3,95
1978-1979	0,45	14,02	64,51	7701,82	0,00770	35,43
1979-1980	0,75	23,60	108,55	107680,95	0,10768	495,31
1980-1981	0,71	22,27	102,44	19668,52	0,01967	90,47
1981-1982	0,35	10,96	50,42	4827,36	0,00483	22,20

1982-1983	0,29	9,20	42,32	1880,73	0,00188	8,65
1983-1984	0,16	4,89	22,49	2894,63	0,00289	13,31
1984-1985	0,18	5,59	25,71	2428,58	0,00243	11,17
1985-1986	0,46	14,54	66,89	41449,74	0,04145	190,66
1986-1987	0,71	22,43	103,15	48166,43	0,04817	221,56
1987-1988	0,33	10,49	48,26	4819,82	0,00482	22,17
1988-1989	0,13	4,16	19,14	39867,32	0,03987	183,38
1989-1990	0,20	5,60	25,74	34651,39	0,03465	159,39
1990-1991	0,18	2,71	12,48	5382,46	0,00538	24,76
1991-1992	0,15	13,89	63,89	16712,45	0,01671	76,87
1992-1993	0,44	7,80	35,87	12339,31	0,01234	56,76
1993-1994	0,25	8,11	37,29	8718,14	0,00872	40,10
1994-1995	0,26	6,34	29,14	42662,95	0,04266	196,24
1995-1996	0,20	13,61	62,60	12998,51	0,01300	59,79
1996-1997	0,43	15,26	70,21	7095,55	0,00710	32,64
1997-1998	0,48	11,71	53,87	6284,86	0,00628	28,91
1998-1999	0,37	8,58	39,45	6355,32	0,00636	29,23
Moyenne						133,2 t/km ² /an
Station de Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10)						
Années	Qm A (m ³ /s)	Al (Hm ³)	Le (mm)	As (Tonnes)	As (MT)	Ass (t/km ² /an)
1999-2000	0,19	4,13	18,98	24560,89	0,02456	112,98
2000-2001	0,69	6,19	28,46	40131,04	0,04013	184,60
2001-2002	0,03	0,79	3,65	2247,09	0,00225	10,34
2002-2003	3,46	108,87	19,81	327,89	0,00033	1,51
2003-2004	2,83	104,38	480,15	276380,54	0,27638	1271,30
2004-2005	0,16	6,91	31,78	4421,36	0,00442	20,34
2005-2006	0,33	4,76	21,90	2291,89	0,00229	10,54
2006-2007	0,21	6,75	31,04	1955,80	0,00196	9,00
2007-2008	0,10	3,25	14,93	3665,84	0,00367	16,86
2008-2009	1,09	34,28	157,66	94820,91	0,09482	436,16
2009-2010	1,41	44,32	203,88	102690,36	0,10269	472,36
Moyenne						231,4 t/km ² /an

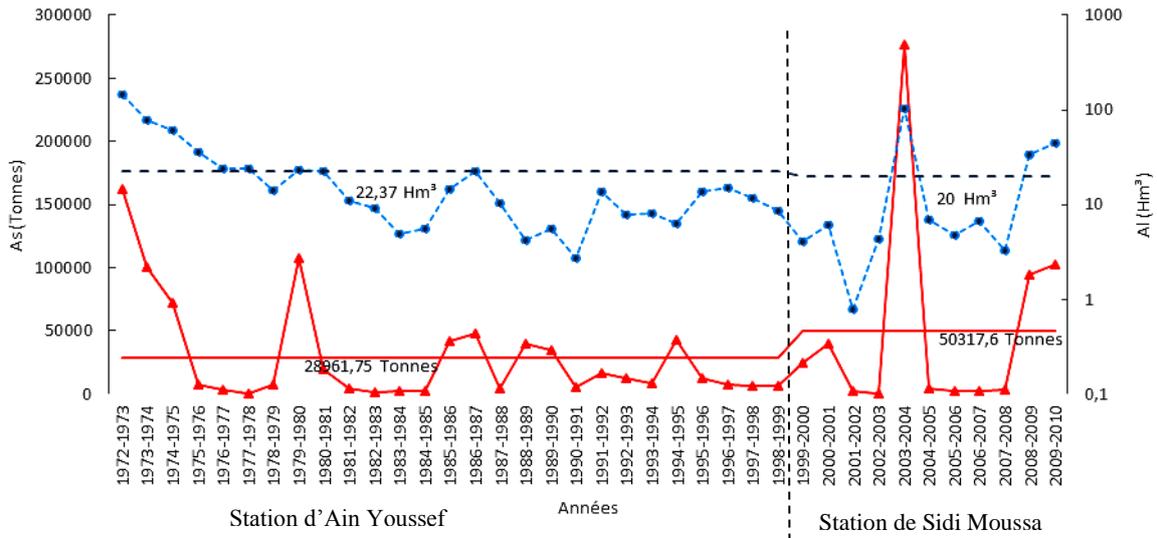


Figure.III.3 : Apports liquides et solides annuels dans l'oued Sikkak

Les variations interannuelles des apports solides montrent une grande irrégularité pour le bassin, liée à l'irrégularité des précipitations et donc des apports liquides.

Sur une plus longue période de mesures, le bassin de l'oued Sikkak montre une meilleure résistance à l'érosion et donc de plus faibles valeurs en transport solide. Néanmoins l'irrégularité interannuelle est bien marquée. (Bouanani A., 2004)

En effet, on peut voir (Figure.III.3), que de 1972/73 à 1974/75, les apports aussi bien liquides que solides sont plus importants par rapport au reste de la période puisque la région a connu une sécheresse depuis 1975. Toutefois, l'année 1972/73 est assez remarquable par son apport liquide et sa dégradation spécifique de 745,4 t/km²/an, quatre fois plus grande que la moyenne annuelle. La crue de mars 1973 avec un débit de 176 m³/s a drainé 70% de l'apport liquide total annuel. Pendant la période de sécheresse, l'année 1979/80 a enregistré quelques crues qui ont permis un apport solide appréciable et une dégradation de 495,31 t/km²/an, trois fois supérieure à la moyenne interannuelle. On remarque un retour des apports solides en 1994/95 qui sont assez remarquables par leur dégradation spécifique de 196,24 t/km²/an. Les crues survenues en 1999/00 et 2000/01, ont ramené respectivement des apports solide de 24560 tonnes et 40131 tonnes qui soit, des dégradations spécifiques de 112,97 t/km²/an et 184,59 t/km²/an. En 2003/04 on a pu relever un chiffre assez important de 276380,54 tonnes soit 1271,29 t/km²/an, six fois plus grand que la moyenne, un taux imputé essentiellement aux crues importantes enregistrées pendant cette année. Le taux de transport des sédiments a repris une croissance à partir de l'année 2008/09 à 2009/10 où nous avons enregistré des apports solides appréciables respectivement de 436,15 t/km²/an et 472,35 t/km²/an soit 197511 tonnes en deux ans.

Si on regarde la variabilité interannuelle de ce phénomène, on constate que la dégradation spécifique varie considérablement. Ainsi on passe de 1,5 t/km²/an à 1271,29 t/km²/an pour l'oued Sikkak.

Probst J.L. et Suchet P., ont estimé que la dégradation spécifique moyenne est respectivement de 400 à 610 t/km²/an pour les oueds qui se jettent dans la mer Méditerranée et l'océan Atlantique. Dans le bassin de la Tafna, *Sogreah (1967)* a estimé la dégradation spécifique à 150 t/km²/an, valeur proche de celle d'oued Sikkak.

IV.2 - Apports mensuels :

Le flux mensuel des matières solide en suspension exporté par l'oued Sikkak est calculé de la même manière que le flux annuel, pour chaque mois considéré.

Tableau.III.3 : Apports liquides et solide moyens mensuels à oued Sikkak (Station Ain Youssef (1972-1999), Station de Sidi Moussa, 1999 /2010).

Station d'Ain Youssef (1972/73 – 1998/99)							
Mois	As (Tonne)	As (tonnes/mois/an) (%)		Qm M (m ³ /s)	Al (Hm ³)	Le (mm)	Ass (t/km ² /mois/an)
SEP	17575,49	650,94	1,88	0,39	27,37	125,88	2,99
OCT	10787,45	399,54	1,15	0,32	24,56	112,99	1,84
NOV	25236,71	934,69	2,70	0,42	31,47	144,74	4,30
DEC	59392,28	2199,71	6,35	0,63	46,86	215,56	10,12
JAN	56638,12	2097,71	6,06	0,73	54,90	252,52	9,65
FEV	92015,87	3408,00	9,85	1,07	73,39	337,56	15,68
MAR	397816,33	14733,94	42,56	2,83	192,87	887,18	67,77
AVR	93363,06	3457,89	9,99	0,99	70,75	325,43	15,91
MAI	25947,76	961,03	2,78	0,66	47,94	220,52	4,42
JUIN	1966,82	72,85	0,21	0,23	16,02	73,67	0,34
JUIL	1007,83	37,33	0,11	0,22	14,24	65,48	0,17
AOUT	159,99	5,93	0,02	0,06	3,66	16,83	0,03
Somme							133,21
Station de Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10)							
Mois	As (Tonne)	As (tonnes/mois/an) (%)		Qm M (m ³ /s)	Al (Hm ³)	Le (mm)	Ass (t/km ² /mois/an)
SEP	58653,14	5332,10	9,63	0,11	1,38	6,37	24,53
OCT	30510,97	2773,72	5,01	0,43	7,35	33,82	12,76
NOV	28582,96	2598,45	4,69	0,94	31,87	146,59	11,95
DEC	93143,03	8467,55	15,30	1,48	25,90	119,14	38,95
JAN	39866,73	3624,25	6,55	1,79	85,99	395,55	16,67
FEV	212242,78	19294,80	34,86	1,91	126,17	580,34	88,75
MAR	60309,77	5482,71	9,91	0,90	17,24	79,29	25,22
AVR	4358,69	396,24	0,72	0,34	17,60	80,94	1,82
MAI	25598,73	2327,16	4,20	0,27	7,57	34,84	10,70

JUIN	172,02	15,64	0,03	0,08	2,01	9,27	0,07
JUIL	48,99	4,45	0,01	0,04	0,72	3,30	0,02
AOUT	5,27	0,48	0,00	0,01	0,75	3,47	0,00
Somme							231,45

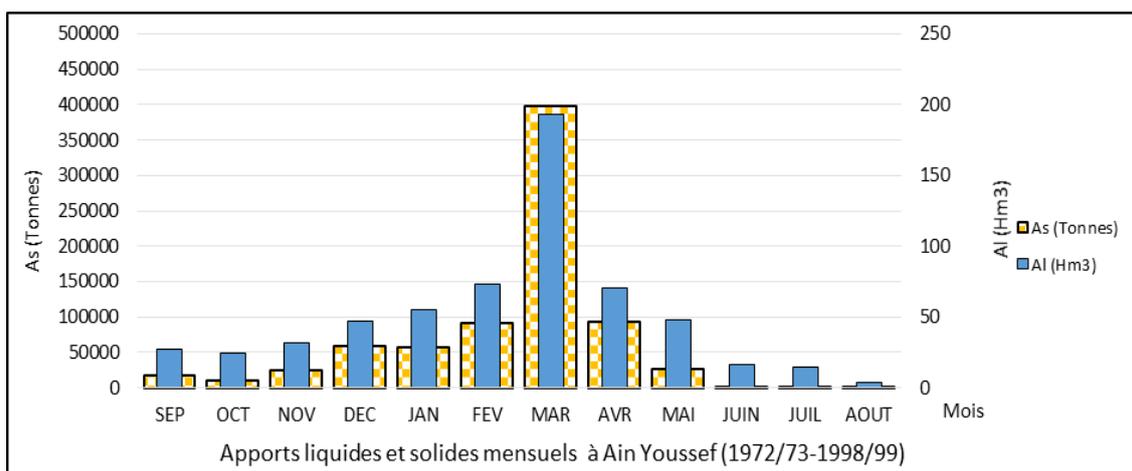


Figure.III.4: Apports liquides et solides mensuels de oued Sikkak à Ain Youssef (1972/73 – 1998/99).

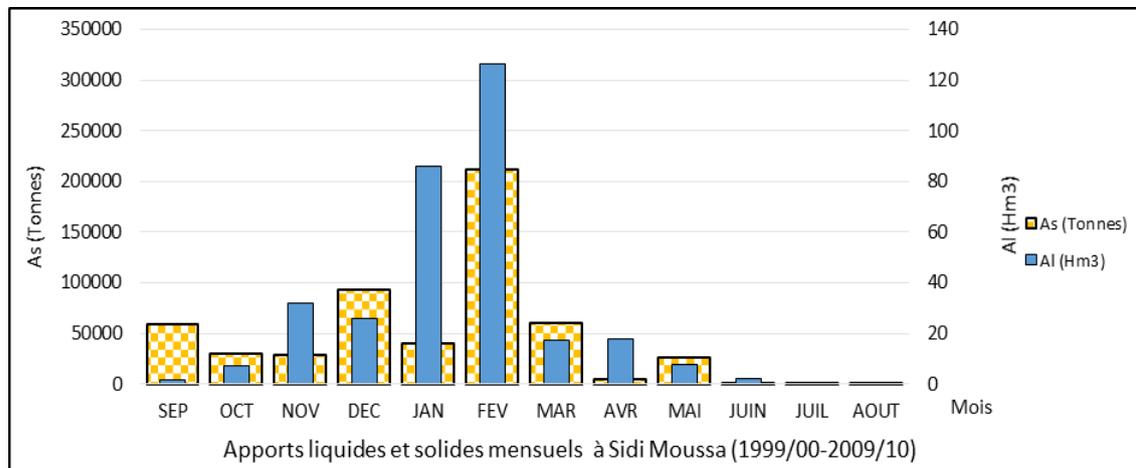


Figure.III.5: Apports liquides et solides mensuels de Sikkak à Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10)

Station d'Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) :

Le mois de mars assure près 31,92 % des apports liquides annuels et 51 % des apports solides. On peut dire que les crues violentes sont responsables de la plus grande partie des transports solides et des dégradations des bassins versants. La plus importante crue enregistrée sur les 28 ans de mesures sur oued Sikkak est celle du 26 mars au 3 avril 1973. Avec un débit de pointe de 176 m³/s et une concentration de

pointe de 10 g/l, elle a généré un apport solide de 156847 tonnes (soit 91%) de l'apport annuel.

Station de Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10) :

Le mois qui relève une importance des apports liquide est le mois de Février près de 39 % de l'apport totale, qui assure près de 38 % des apports solides. La plus importante crue enregistrée sur les 10 ans de mesures à Sidi Moussa est celle du 27, 28 et le 1 mars 2004. Avec des débits de pointe de 65,6 m³/s et une concentration de pointe de 17,48 g/l, elle a généré un apport solide de 146312 tonnes.

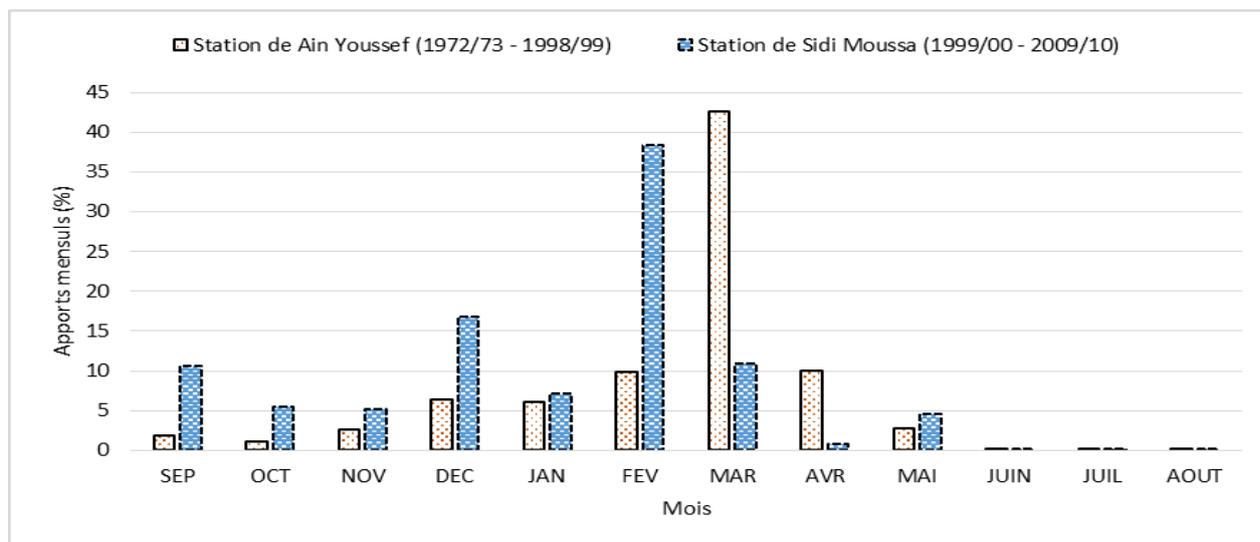


Figure.III.6 : Apports solides mensuels en pourcentage de l'apport annuel à Ain Youssef (1972/73-1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10).

Tableau.III.4 : Charges liquides et solides mesurées lors de quelques crues. à oued Sikkak de la période (1998/99 – 2009/10)

Date	C MAx (g/l)	Qs Max (kg/s)	C Moy (g/l)	AS (tonnes)	Ass (t/km ²)
15 Novembre 2000	26,78	41,9	15,22	466,75	2,14
14 Octobre 2000	131,3	6,85	69,02	382,09	1,75
14 Septembre 2009	77,86	168,9	70,41	7176,03	33,00
2, 3,4 et 5 Janvier 2004	2,12	59,3	0,65	4639,07	21,33
29, 30,31 Janvier et le 1 Février 2004	5,48	46,4	3,46	25793,62	118,64
27,28 Février et le 1 Mars 2004	17,48	65,6	35,48	146312,55	673,01
14, 15,16 et le 17 Mars 2004	4,8	45,8	19,56	8828,85	40,61

IV.3 - Apports saisonniers :

*Tableau.III.5 : Apports liquides et solides moyens saisonniers à l'oued Sikkak
(Station de Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10))*

Station d'Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) :							
Saison	As (Tonne)	As (tonnes/saison/an)	(%)	Qm S (m³/s)	Al (Hm³)	Le (mm)	Ass (t/km²/saison/an)
Automne	53599,65	1985,17	6,85	0,37	83,39	383,60	9,13
Hiver	208046,26	7705,41	26,60	0,80	175,14	805,63	35,44
Printemps	517127,15	19152,85	66,13	1,49	311,56	1433,13	88,09
Eté	3134,64	116,09	0,40	0,50	33,91	155,98	0,53
Somme (MT)	0,782						
Apport Solide Spécifique (Tonnes/km²/année)				133,20			
Station de Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10) :							
Saison	As (Tonne)	As (tonnes/saison/an)	(%)	Qm S (m³/s)	Al (Hm³)	Le (mm)	Ass (t/km²/saison/an)
Automne	117747,07	10704,27	19,33	0,49	40,60	186,77	49,23
Hiver	345252,53	31386,59	56,70	1,72	238,06	1095,03	144,37
Printemps	90267,19	8206,10	14,82	0,50	42,40	195,07	37,74
Eté	226,28	20,57	0,037	0,04	3,48	16,02	0,094
Somme (MT)	0,553						
Apport Solide Spécifique (Tonnes/km²/année)				231,45			

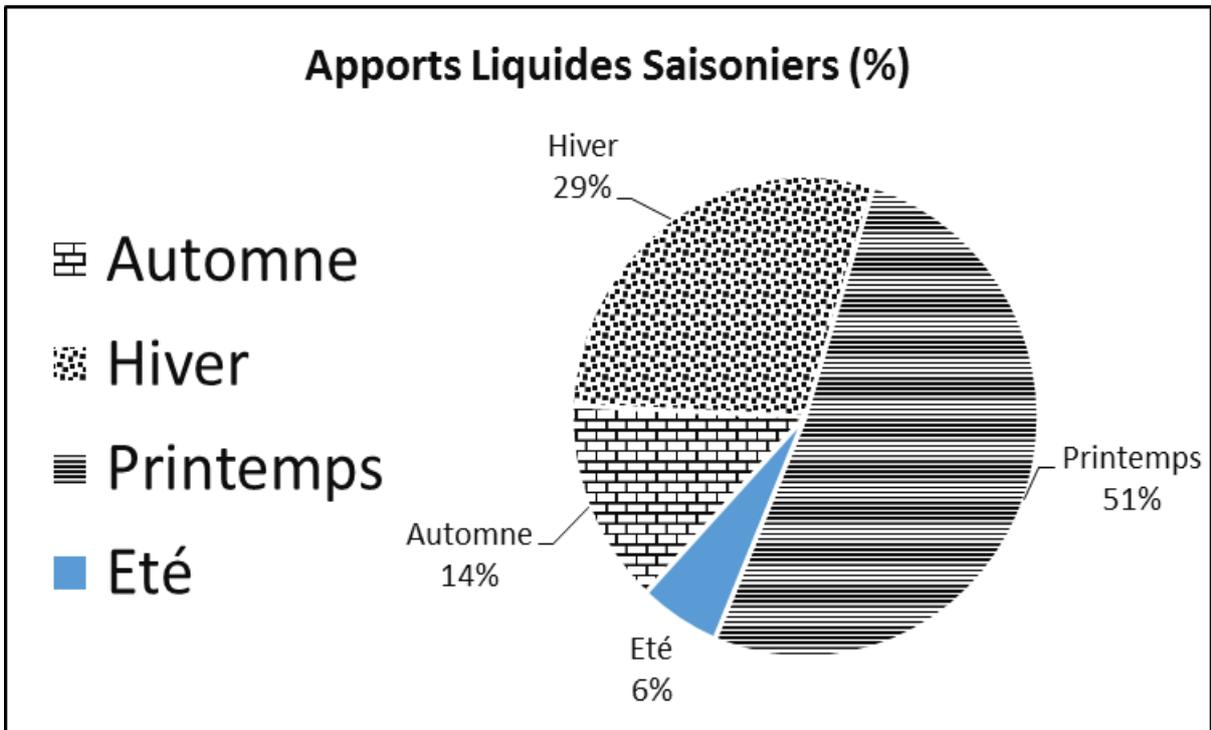
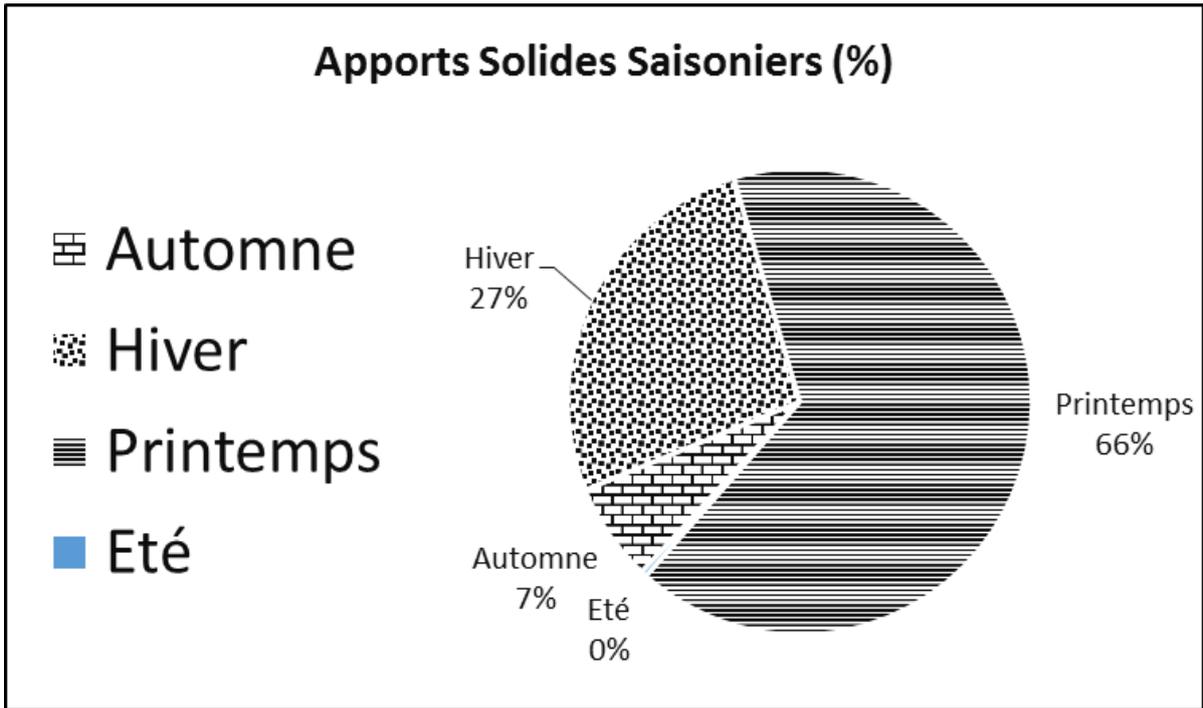


Figure.III.7: Répartition Saisonnière des apports liquides et solides de l'oued Sikkak (Station d'Ain Youssef : de 1972/73 à 1998/99)

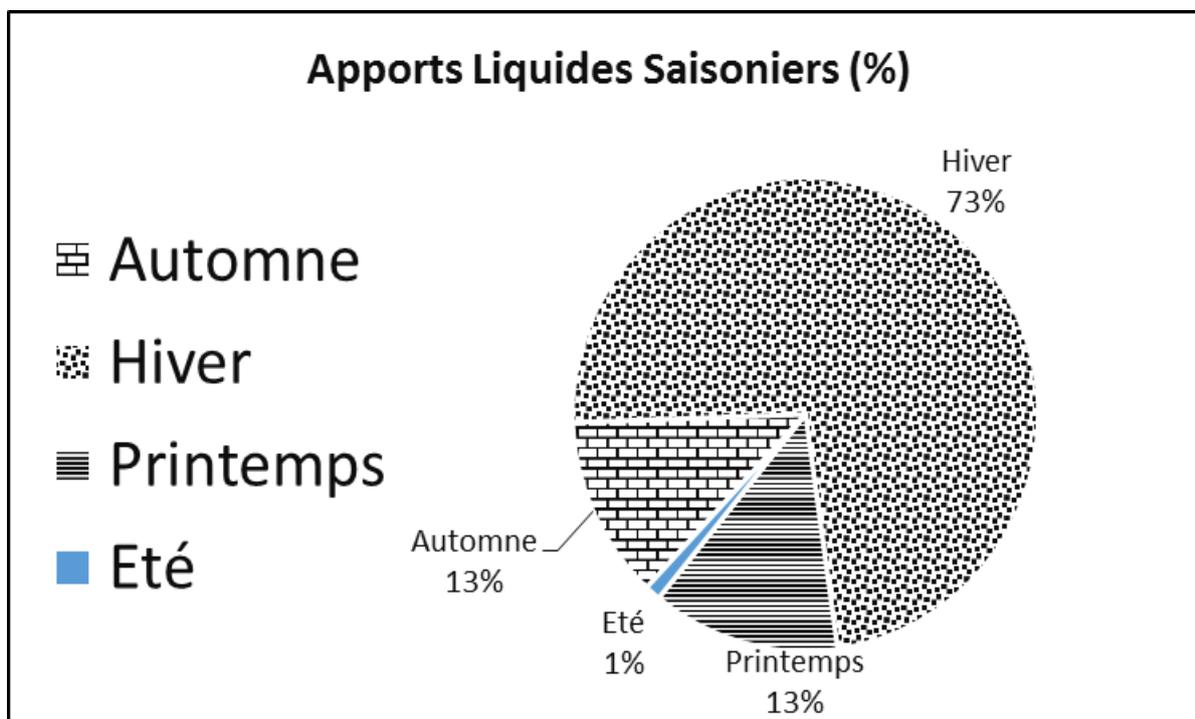
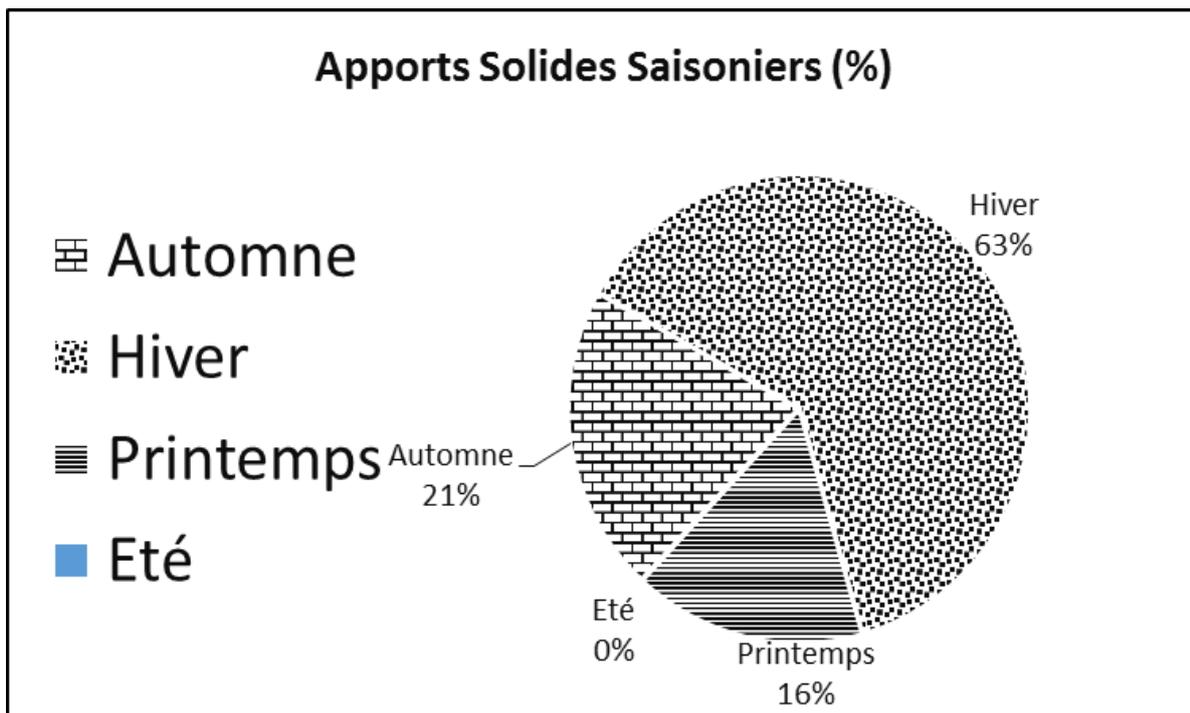


Figure.III.8: Répartition Saisonnière des apports liquides et solides de l'oued Sikkak (Station de Sidi Moussa : de 1999/00 à 2009/10)

Station d'Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) :

- **En automne**, on remarque que 6,85 % de matières solides annuelles sont transportés par l'oued Sikkak soit 1985,17 tonnes.
- **En hiver**, durant les mois de décembre, janvier et février, on enregistre de forts apports liquides 3,08 Hm³ avec un apport solide moyen de 7705,41 tonnes de matières en suspension par an ce qui représente 26,6 % par rapport au total annuel.
- L'analyse de tableau (III.5), pour la station d'Ain Youssef, permet de révéler l'importance des apports solides durant la saison **de printemps** avec un pourcentage de 66 % et un apport spécifique de 88,09 t/km²/an, soit plus la moitié des apports solides annuels.
- **L'été** se distingue des autres saisons par des valeurs très faibles, environ 0,4 % d'apport solide annuel avec une dégradation spécifique de l'ordre de 0,53 t/km²/an. Durant cette période, les précipitations sont quasiment nulles, ce qui réduit considérablement l'érosion (figure.III.7).

Station de Sidi Moussa (1999/00 – 2009/10) :

- En Automne, d'après l'analyse de tableau (III.5), concernant la station de Sidi Moussa, l'apport solide durant cette saison est plus ou moins moyen avec un pourcentage de 19,33 % et une dégradation spécifique de 49,23 t/km²/an.

Ces apports solides de l'automne sont causés généralement par les premières pluies d'octobre et de novembre, capables d'arracher de grandes quantités de matières solides, qui seront transportées dans les cours d'eau (*Bouanani. et al, 2013*).

- **En hiver**, durant les mois de décembre, janvier et février, on enregistre de forts apports solide avec un moyen de 31386,5 tonnes de matières en suspension ce qui représente 56 % par rapport au total annuel. Un chiffre qui permet de conclure l'importance du transport solide pour la période considéré (1999/00 – 2009/10) pour une dégradation spécifique qui dépasse les 144,37 t/km² par la saison d'Hiver par an.
- **Au printemps**, la charge en suspension n'augmente pas proportionnellement aux apports pluviométriques par rapport à la saison d'automne : sur les 3,85 Hm³ d'apport annuel en eau, on remarque que seulement 8206,1 tonnes de matières solides seront transportés.

- **L'été**, les valeurs sont très faible, environ 0,037 % d'apport solide annuel avec une dégradation spécifique de l'ordre de 0,1 t/km²/an. Pendant l'été la pluviométrie est presque nulle, les sources les plus importantes au niveau du bassin sont presque toutes captées, les apports aussi bien liquides que solides se trouvent ainsi réduits. Les averses estivales généralement orageuses et intenses sont à l'origine des quantités de sédiments qui peuvent y être transportées.

A l'échelle saisonnière, pour l'oued Sikkak, c'est en Hiver que le phénomène est plus accentué avec 39092,01 tonnes /an, en deuxième position, on trouve l'hiver avec 27358,96 tonnes/an. Ces résultats sont estimés pour toute la période d'étude. L'été reste une saison sèche avec un transport quasi nul.

Ces valeurs restent toutefois faibles par rapport aux autres bassins. Aussi, contrairement aux autres bassins de la Tafna étudiés (Bouanani A., 2004).

III.4. Interprétations

Le calcul des paramètres de l'écoulement liquides et du transport solide sur la base des mesures continues de la charge en suspension réalisées dans le bassin versant du Sikkak aux stations de Ain Youssef (1972/73-1989/99) et Sidi Moussa (1999/00-2009/10), a permis une représentation (tableau.III.6) des caractéristiques majeure des écoulements et des Transports solides. La dégradation spécifique moyenne est de 133.2 et 231,45 t/km²/an respectivement, soit un moyen de 182,32 t/km²/an.

Tableau.III.6 : Valeurs de quelques paramètres d'écoulement et du transport solide dans le bassin versant d'oued Sikkak.

Paramètre	Ain Youssef (1972/73 à 1998/99)	Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)
Q_s (kg/s)	3,6	2,08
A_s (tonnes)	781907,71	553493,09
A_{ss} (t/km ² /an)	133,2	231,4

V- MODELES D'EVOLUTION DES PARAMETRES DEBITS LIQUIDES, CONCENTRATIONS ET DEBITS SOLIDES

La recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études, Probst J.L. et al. (1992), Terfous A. et al, (1999, 2001, 2003), Ghenim A., (2001), Achit M. (2002), Benkaled A. et al. (2003), Bouanani A., (2004),

Ghenim A., (2008)..., L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes. Les caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre ou d'un bassin à un autre. Aussi, il est admis aujourd'hui que les fluctuations climatiques sont des phénomènes quasi-cycliques (Kayzer N. et al, 1990 ; Tardy Y., 1994).

En effet, du siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau, la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminuer dans d'autres (Tardy Y., et al 1992 et 1995). Les caractéristiques morphométriques des bassins changent aussi au cours des années, on sait par exemple que le couvert végétal se développe et se conserve ou non en fonction de la pluviosité.

V.1 - Evolution des débits solides en fonction des débits liquides :

L'application de cette méthode dans notre cas est élaborée à l'échelle des débits instantanés relevés de la Station de Ain Youssef (1972/73 – 1998/99) et la station de Sidi Moussa-1999/00 - 2009/10).

$$Q_s = f(Q_l)$$

V.1.1 - Analyse annuelle :

Comme pour la plupart des cours d'eau on trouve pour l'Oued de Sikkak une bonne relation en puissance liant le débit des matières solides en suspension en Kg/s au débit liquide en m³/s (Figure III.10 ; III.11). La valeur de l'exposant « b » est comprise dans la fourchette entre 1 et 2 (Probst et Bazerbachi, 1986).

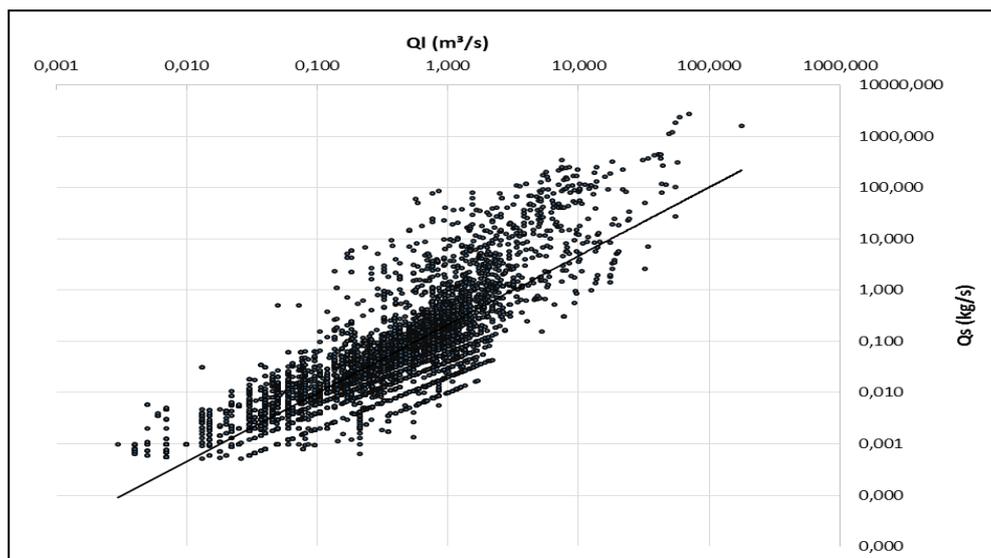


Figure.III.9 : Relations entre les débits liquides et solides instantanés de l'oued Sikkak à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) – $R=0,87$; $Q_s = 0,2124 Q_l^{1,3378}$

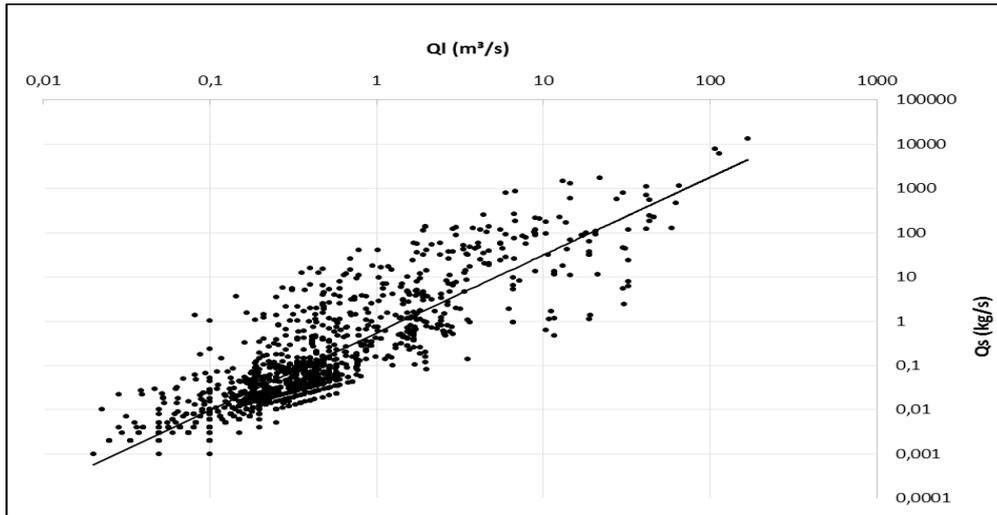


Figure.III.10 : Relations entre les débits liquides et solides instantanés de l'oued Sikkak à Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10) – $R=0,82$; $Q_s = 0,5509 Q_l^{1,7551}$

Une première analyse de ces figures montre qu'à de faibles débits liquides généralement estivaux (moins de $1 \text{ m}^3/\text{s}$) peuvent être associé de forte débits solides (près de 90 kg/s) déclenchées sûrement à la suite d'orages violents.

De même, de forts débits liquides n'ont engendré que de faibles transports solides (moins de 10 kg/s) du à la vidange des nappe survenue à la suite de crues importantes. (Bouanani A., 2004)

Tableau.III.7 : Paramètres de la relation débits solides – débits liquides.

Station	Période	a	b	Coefficient de corrélation	Taille d'échantillon
Ain Youssef	1972/1999	0.2124	1.3378	0.82	3240
Sidi Moussa	2000/2010	0.5509	1.7551	0.87	1251

V.1.2 - Analyse saisonnière :

Pour étudier les réponses du Bassin aux débits liquides et matières en suspension au cours de l'année hydrologique, on a jugé utile de regrouper suivant les différentes saisons les valeurs instantanées (prélevées sur les 38 années d'étude), et d'analyser la relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension. Le tableau (III.8) résume les modèles trouvés pour chaque saison.

L'analyse des figures (III.11 ; III.12), laisse apparaitre que l'hiver et le printemps se distingue par les débits forts engendrant un flux important de matières

solides en suspension. Le débit solide maximal est de l'ordre de 2459 Kg/s, atteint en mars 1974, résultant d'un débit liquide de 89,50 m³/s.

Tableau.III.8 : Modèle saisonniers liant les débits solide en suspension aux débits liquides.

Station	Saisonnier	Modèle de corrélation R	Coefficient de corrélation	Nombre
Ain Youssef (1972/73 à 1998/99)	Automne	$Q_s = 0,1982 Q_l^{1,2131}$	0,81	1264
	Hiver	$Q_s = 0,2569 Q_l^{1,5663}$	0,77	1071
	Printemps	$Q_s = 0,2544 Q_l^{1,4612}$	0,83	2194
	Eté	$Q_s = 0,0837 Q_l^{0,9712}$	0,82	726
Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)	Automne	$Q_s = 1,2547 Q_l^{2,0369}$	0.870	304
	Hiver	$Q_s = 0,3972 Q_l^{1,7215}$	0.893	376
	Printemps	$Q_s = 0,5431 Q_l^{1,6875}$	0.826	401
	Eté	$Q_s = 0,2157 Q_l^{0,3274}$	0.795	44

Tableau.III.9 : Paramètre du modèle en puissance

Saison	Automne				Hiver				Printemps				Eté			
	a	b	r	n	a	b	r	n	a	b	r	n	a	b	r	n
Ain yousef (1972/73 à 1998/99)	0,1982	1,2131	0,81	1264	0,2569	1,5663	0,77	1071	0,2544	1,4612	0,83	2194	0,0837	1,9712	0,82	726
Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)	1.2547	2.0369	0.870	304	0.3972	1.7215	0.893	376	0.5431	1.6875	0.826	401	0.2157	0.3274	0.795	44

r : coefficient de corrélation ; *n* : Taille d'échantillon.

Le facteur b est peut être lié directement à la superficie de drainage en période de crue (Benkhaled et al, 2003), mais il exprime aussi l'importance du taux du transport solide.

Le paramètre a exprimé l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier (Benkhaled et al, 2003). Ce paramètre « a » reste en général inférieur à 1, et même très faible en été pour le bassin du Sikkak.

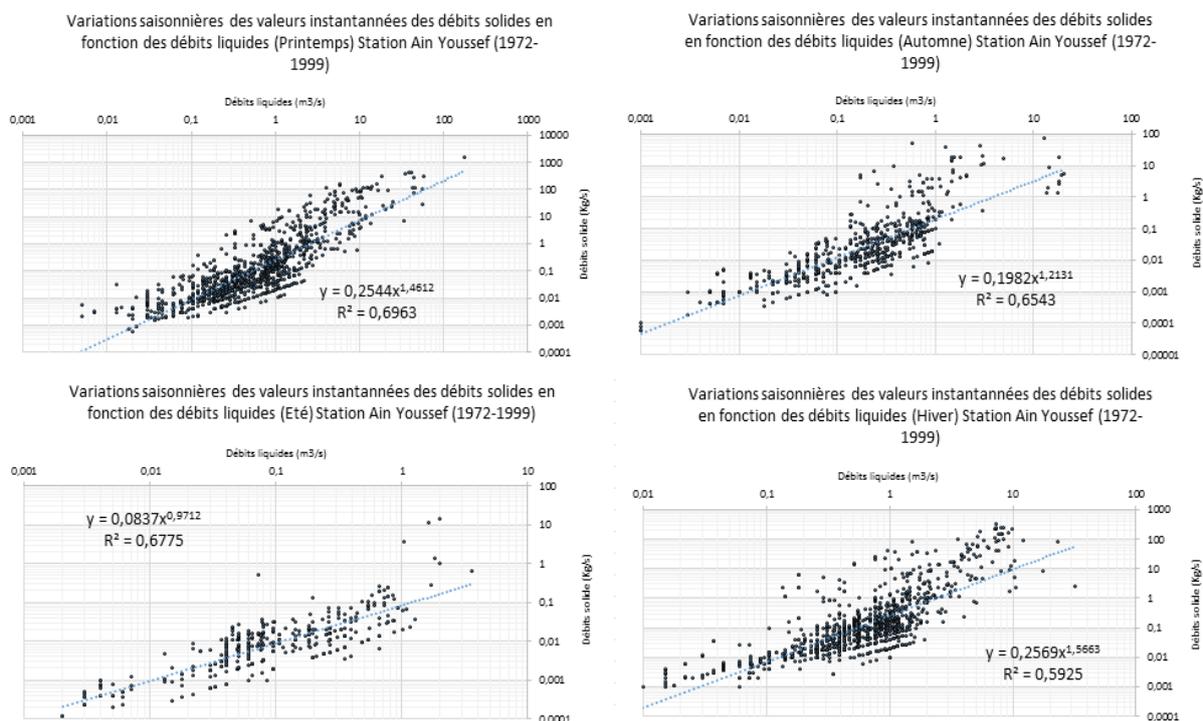


Figure.III.11 : Relation débits solides débit liquides à l'échelle saisonnière à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99)

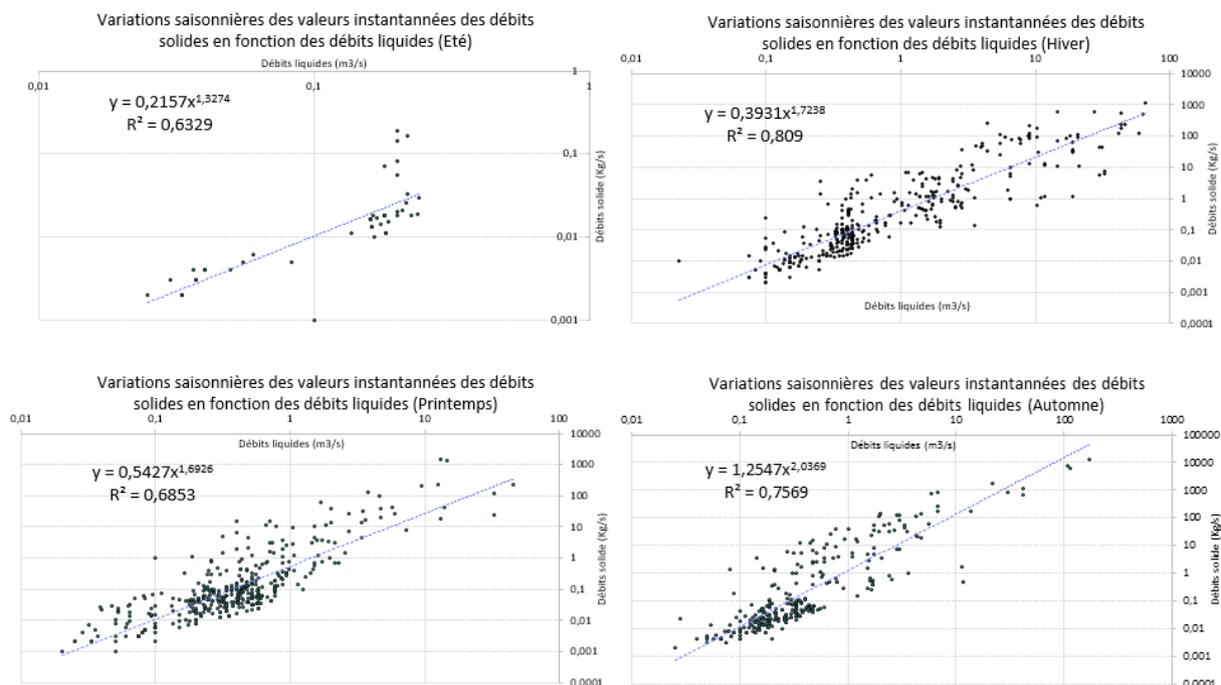


Figure.III.12 : Relation débits solides débit liquides à l'échelle saisonnière à Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)

Après la grande saison sèche, les premières pluies d'automne trouvent un sol sec et dur, difficilement érodable. La réponse du bassin en matière en suspension est donc très faible. C'est les pluies torrentielles qui surviennent en décembre qui arracheront de grandes quantités de matières solides, qui seront par la suite véhiculées en suspensions par le cours d'eau. La réponse du bassin se manifeste rapidement par des ruissellements et des écoulements hypodermiques peu profonds. La relation entre les deux débits semble être plus étroite pour les valeurs fortes.

Quoique moins importantes que celle de l'hiver, les pluies du printemps survenues après un hiver pluvieux et froid avec une succession de gel 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 chargés ; sans oublier de rappeler le rôle de la couverture végétale, l'état du sol qui font que l'action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulements abondants

V.2 - Evolution des concentrations en fonction des débits liquides :

Il nous a paru aussi intéressant de voir la relation de la concentration en fonction des débits liquides à l'échelle annuelle et saisonnière.

La concentration des sédiments en suspension C_s et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance $Y=a X^b$. (Etchanchu et al, 1986 ; Walling D.E., 1981 ; Wood P.A., 1977).

$$C_s = a Q_L^{b-1}$$

V.2.1 - A l'échelle annuelle

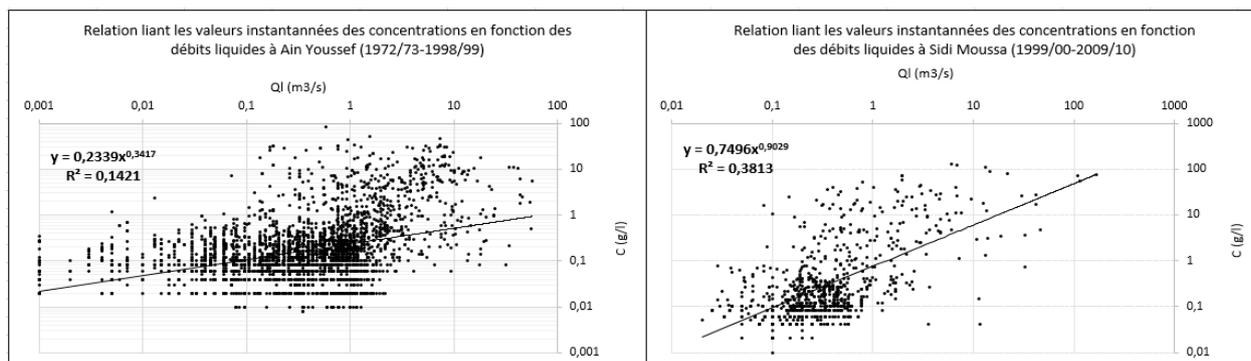


Figure.III.13 : Relation concentration-débits liquides à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) et Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)

Les relations de type puissance ($C=0.2339.Ql^{0.3417}$; $R = 0.38$) et ($C=0.7496.Ql^{0.9029}$; $R = 0.6$) (Figure.III.13) sont trouvées respectivement pour Ain Youssef (1972-1999) et Sidi Moussa (2000-2010) pour les modèles annuels.

V.2.2 - A l'échelle saisonnière

Les résultats des corrélations $C - Q_1$ pour les différentes saisons sont donnés au tableau (Tableau.III.10).

Tableau.III.10 : Relation concentration-débits liquides à l'échelle saisonnière à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99)

Stations	Saisonnier	Modèle de corrélation R	Coefficient de corrélation	Nombre
Ain Youssef (1972/73 à 1998/99)	Automne	$C = 0.196 Q_1^{0.225}$	0,27	1264
	Hiver	$C = 0.259 Q_1^{0.566}$	0,40	1071
	Printemps	$C = 0.251 Q_1^{0.412}$	0,41	2194
	Eté	$C = 0.096 Q_1^{0.045}$	0,08	726
Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10)	Automne	$C = 0.5427 Q_1^{0.6926}$	0,51	304
	Hiver	$C = 0.3684 Q_1^{0.9907}$	0,74	376
	Printemps	$C = 1.2547 Q_1^{1.0349}$	0,66	401
	Eté	$C = 0.2157 Q_1^{0.3274}$	0,30	44

Les coefficients de corrélation indiquent des relations qui semblent difficile à s'établir entre les concentrations et les débits liquides pour les modèles saisonniers. Il est insignifiant pour la saison d'été. L'automne et le printemps ont aussi de faibles corrélations (Figures III.14, III.15).

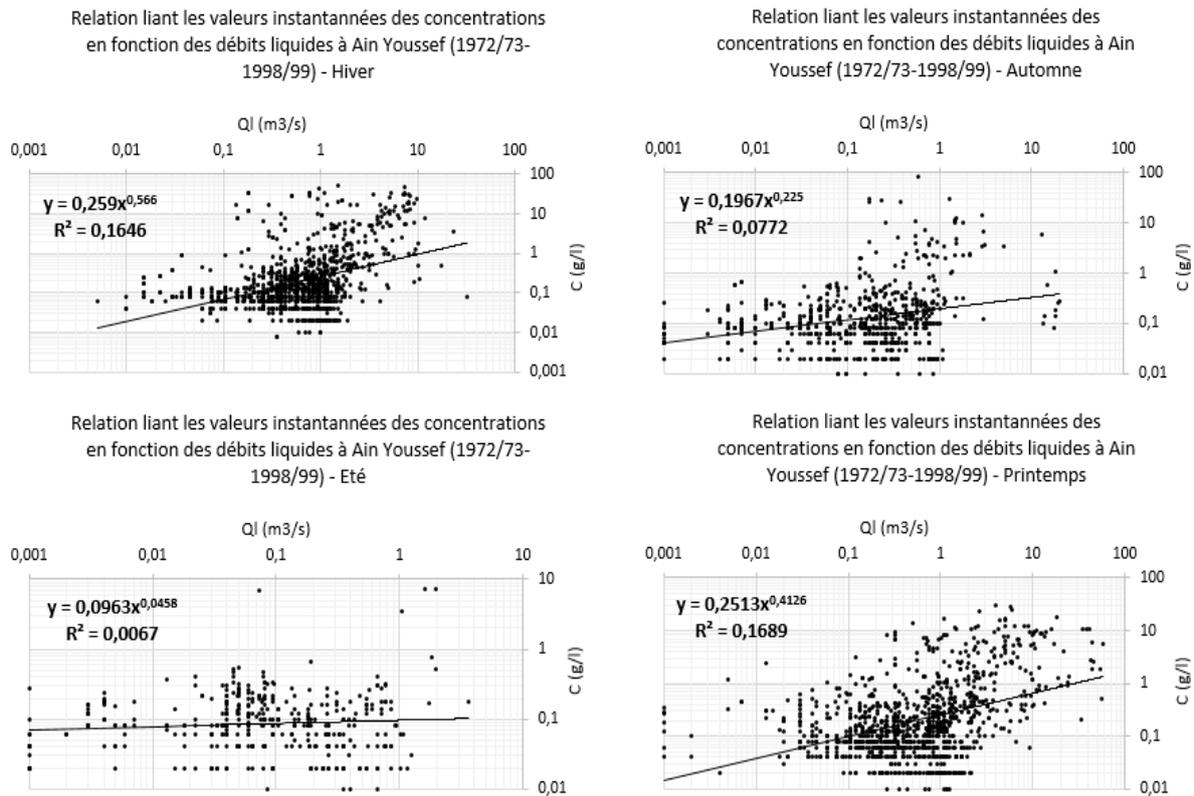


Figure.III.14 : Relation concentration-débits liquides à Ain Youssef (1972/73 à 1998/99) : Automne-Hiver-Printemps-Eté

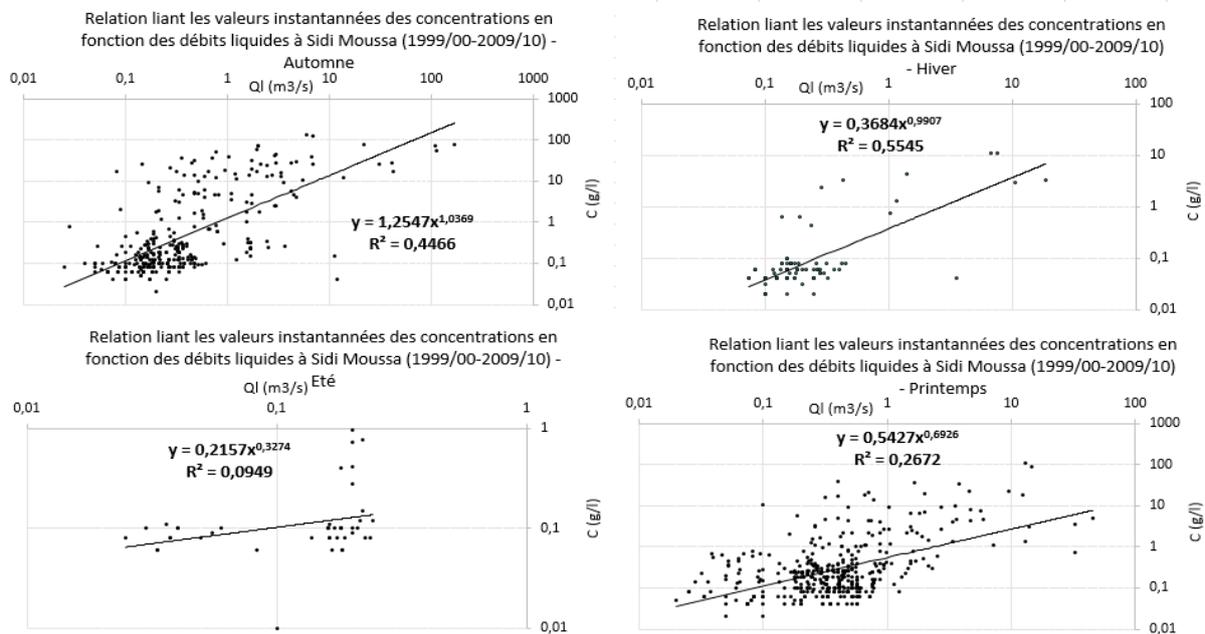


Figure.III.15 : Relation concentration-débits liquides à Sidi Moussa (1999/00 à 2009/10) : Automne-Hiver-Printemps-Eté

V.3 - Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides durant les crues

V.3.1- Méthodologie

Selon *A.Bouanani, 2004*, Cette étude est basée sur les travaux de *G.P. Williams, 1989*. Selon cet auteur, les relations entre concentration des sédiments en suspension (C) et les débits liquides Ql pour un événement hydrologique telles que les crues, peuvent être étudiées qualitativement par l'analyse des courbes des concentrations et des débits liquides en fonction du temps. A cet effet, l'auteur propose une classification de ces relations basées sur le rapport C/Ql durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont ainsi établis (tableau.III.11 et figure.III.16).

Bien que ce n'est pas toujours évident, vu le manque et l'imprécision des données, nous allons présenter, dans ce qui suit, les graphes des relations C-Ql pour les plus importantes crues au niveau du bassin. Nous essayons en même temps de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène.

Plusieurs facteurs, affectent les relations C-Ql. L'intensité des précipitations et leurs distribution spatiale, volume et vitesse d'écoulement, les distances parcourues des eaux des crues dans le cours d'eau principal.

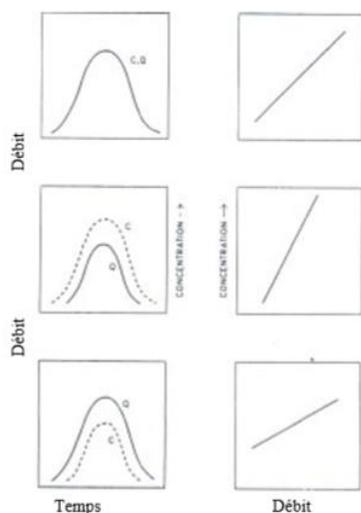
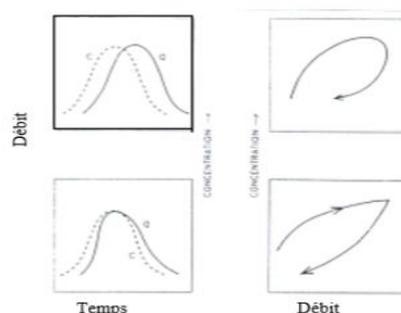
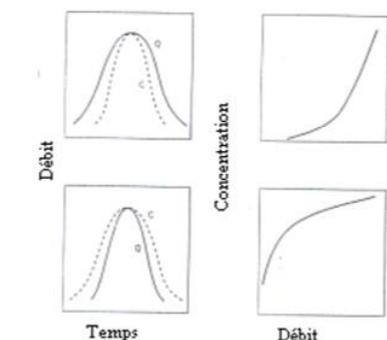
La concentration des sédiments à travers une section affecte la mobilisation continue, le stockage et la diminution spatio-temporelle des sédiments disponibles. Les sédiments transportés proviennent du lit et des berges par érosion ou glissement et des affluents tributaires. Le matériel du lit transporté en suspension à la station de mesure peut être influencé par les volumes, la hauteur, la puissance des crues précédentes, le pouvoir du courant à passer tout obstacle et par le couvert végétal qui peut retenir ou relâcher les sédiments. Les sédiments provenant des versants peuvent venir des terres par ruissellement. Dans certains endroits l'homme joue un rôle important dans la production des sédiments par les pratiques culturales.

La forme des courbes de concentration et celle de la relation C-Ql dépendent en partie de :

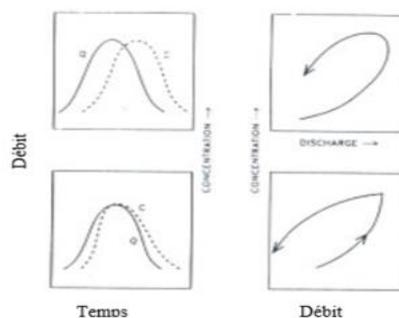
- Le temps et le volume des sédiments provenant de différentes sources jusqu'à la station de mesure.
- La proximité de la source des sédiments par rapport à la station. Parmi d'autres considérations sont impliqués, le temps et la vitesse d'entraînement des sédiments relative par rapport à la vitesse du mouvement de l'eau.

Tableau.III.11 : Classes des relations C - Ql

Classe	Modèle	Critère C/Ql	Référence
I	<p>courbe simple (single line) ligne droite</p> <p>Courbe, la pente croît quand Q_l augmente Courbe, pente décroît quand Q augmente.</p>	$(C/Q_l)_r \approx (C/Q_l)_f$ les pentes des deux sections montée et décrue sont égales les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales	Wood (1977)
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop).	$(C/Q_l)_r > (C/Q_l)_f$ pour toutes les valeurs de Q _l	Paustian et Beschta (1979)
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop)	$(C/Q_l)_r < (C/Q_l)_f$ pour toutes les valeurs de Q _l	Axelsson (1967)
IV	Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)	$(C/Q_l)_r \approx (C/Q_l)_f$ pour une partie des valeurs de Q _l $(C/Q_l)_r > (C/Q_l)_f$ pour une autre partie des valeurs de Q _l	-
V	Forme en huit (figure eight)	$(C/Q_l)_r > (C/Q_l)_f$ pour une partie des valeurs de Q _l $(C/Q_l)_r < (C/Q_l)_f$ pour l'autre partie des valeurs de Q _l	Arnborg et al. (1967)



Modèles de la classe II



Modèles de la classe I

Modèles de la classe III

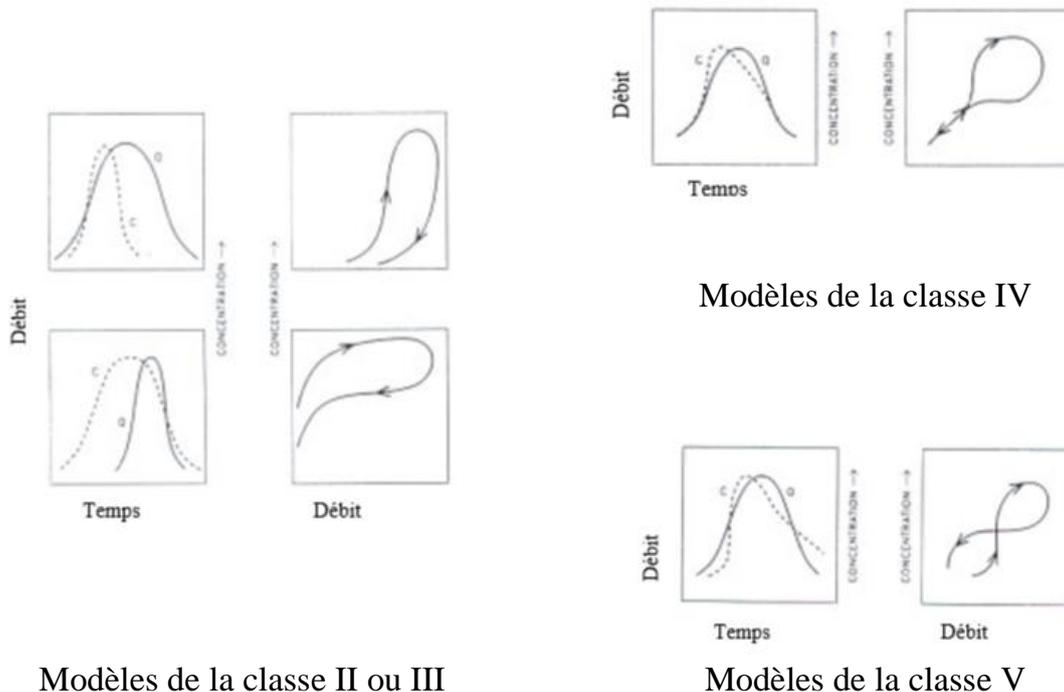


Figure.III.16 : Modèles des relations concentration débit liquide

(Williams, G.P., 1989)

a)- Modèle Classe I

De la courbe simple (ou single line) : la relation C- QI la plus simple est du type linéaire (ligne simple ou courbe simple). Son seul caractère est que les rapports C/QI sont égaux pour les valeurs de Q, que ce soit en montée de crue ou en décrue. Trois sous groupes découlent dans ce type de modèle : la ligne droite, la ligne à concavité vers le haut et la ligne à concavité vers le bas. Dans le premier cas, pourrait être associé un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977). Ce modèle indique aussi que les concentrations des sédiments en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide. C'est que les courbes doivent avoir des pics simultanément avec des largeurs et des pentes semblables. L'apport continu des sédiments pourrait s'étendre même au-delà de la courbe des débits ou descendre sous celle-ci. On peut concevoir que la même chose peut résulter de facteurs qui influencent l'entraînement des sédiments (taille des particules).

b)- Modèle classe II

De la boucle dans le sens des aiguilles d'une montre ou « clockwise loop » peut être due à deux causes principales.

- A un épuisement du stock de sédiment disponible avant le maximum du débit (Arnborg et al, 1967 ; Walling, 1974 ; Wood, 1977 ; Wansickel et Beschta, 1983).

L'épuisement ou la diminution des sédiments peut s'expliquer soit, par un petit apport disponible, soit par à un débit continu et/ou intense.

- Le deuxième postulat consiste à la formation d'obstacles au passage de la crue maximale (Arnborg et al. 1967).

Le « clockwise loop » a tendance à se produire plus au début de la saison des pluies qu'après (Sidle et Campbell, 1985). Ceci est lié à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes, comparés à un manque ou une diminution des réserves en sédiments à la fin de la saison sèche. Selon, Heidel (1956), dans les petits cours d'eau, la concentration maximum des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum.

c)- modèle 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 QI données alors $(C/QI)_r < (C/QI)_f$. 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 exemples semble 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 parcourt 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 a traîné derrière l'onde de crue. Aussi le temps de retard (latence) augmente avec la distance en aval.

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

d)- le modèle 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-QI.

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.

V.3.2- Application au bassin du Sikkak

L'application de l'approche des Hystérésis « Hyteritic curves », pour les différentes crues enregistrées au niveau du bassins étudié durant la période de données disponibles, fait ressortir la distribution (tableau.III.12), des différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments transportés avec les débits liquides et leur fréquence relative.

Tableau.III.12 : Fréquences des différents classe d'évolution de la relation C-QI des crues au niveau d'oued Sikkak (Station de Sidi Moussa de 1999/00 à 2009/10)

Classe	Nombre total des crues	- II - <i>Clockwise</i>	- III - <i>Counterclockwise</i>	- V - <i>Figure huit</i>
Sikkak (1999/00 -2009/10)	6	50 %	33,33 %	16,67 %

L'évolution de la relation concentration des sédiments en suspension, débit liquide pour les crues d'oued Sikkak (figure III.17 III.18 ; III.19 ; III.20 ; III.21 ; III.22), se présente surtout suivant le modèle de « clockwise » de la classe II, boucle dans le sens des aiguilles du montre (clockwise loop) en général pour les crues survenues pendant l'automne et le printemps. Cela pourrait être associé à 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 Sikkak pour la période allant de 1998/99 à 2009/10 est important pendant l'automne et l'hiver.

D'autres modèles sont également présentés par les relations C-QI en particulier ceux de la classe III, pour les crues d'oued Sikkak survenues en Hiver, une crue automnale donnent un modèle en forme de huit : celle du 15 Novembre 2000.

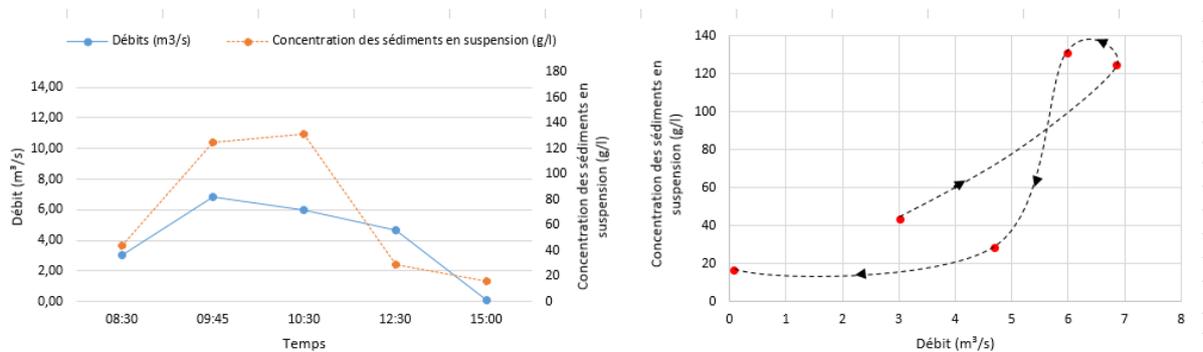


Figure.III.17 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (15 Novembre 2000) – Classe II

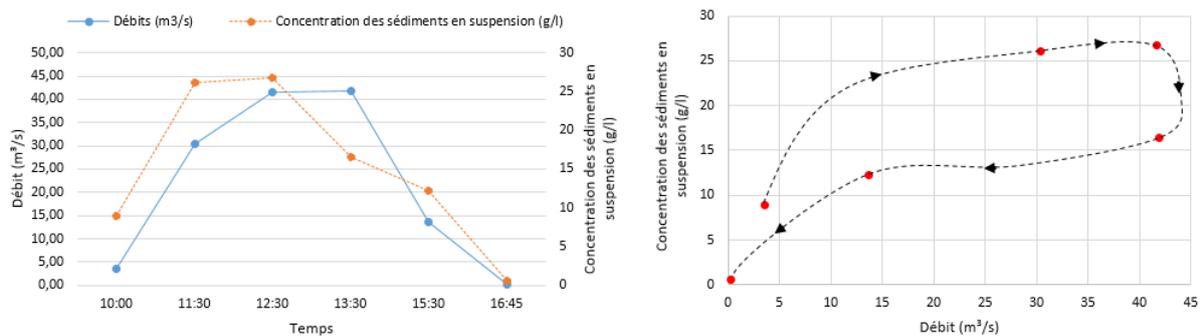


Figure.III.18 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (14 Octobre 2000) Classe II

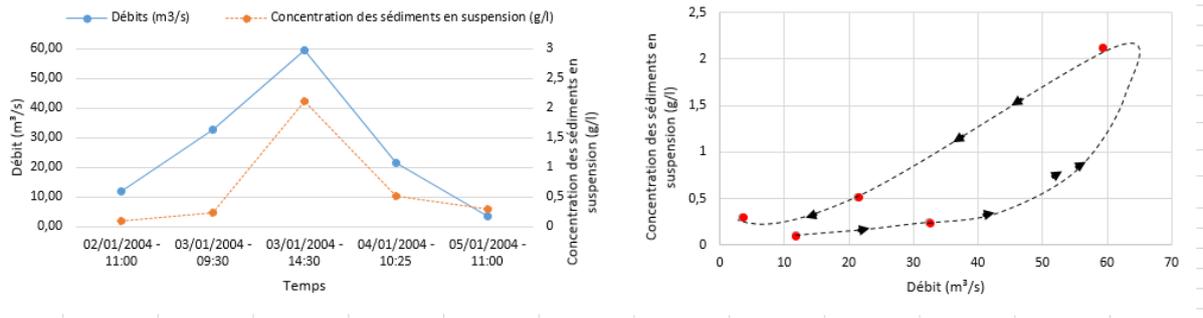


Figure.III.19 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (2, 3, 4 et le 5 Janvier 2004) Classe III

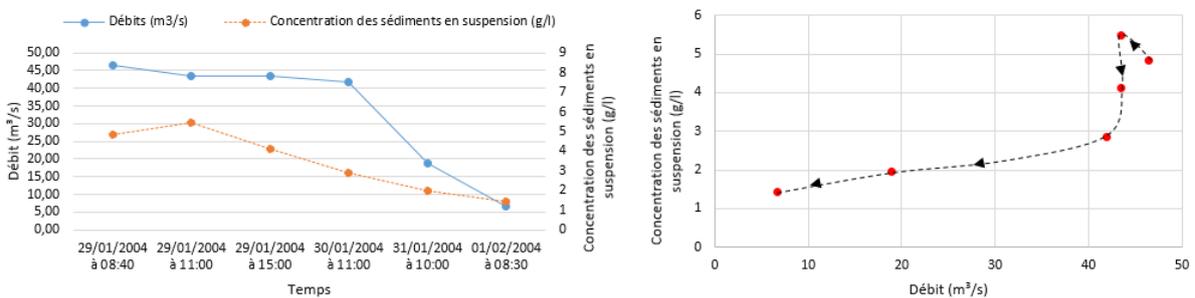


Figure.III.20 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (29, 30, 31 Janvier et le 1 Février 2004) – Classe III

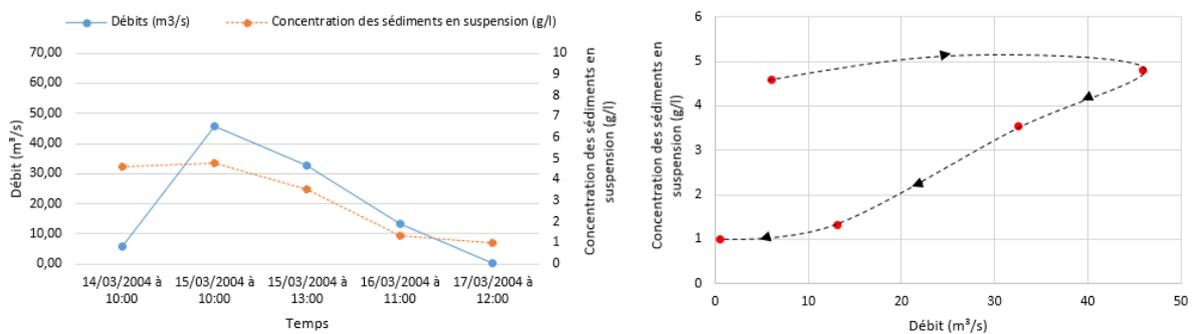


Figure.III.21 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (14, 15, 16 et le 17 Mars 2004) – Classe II

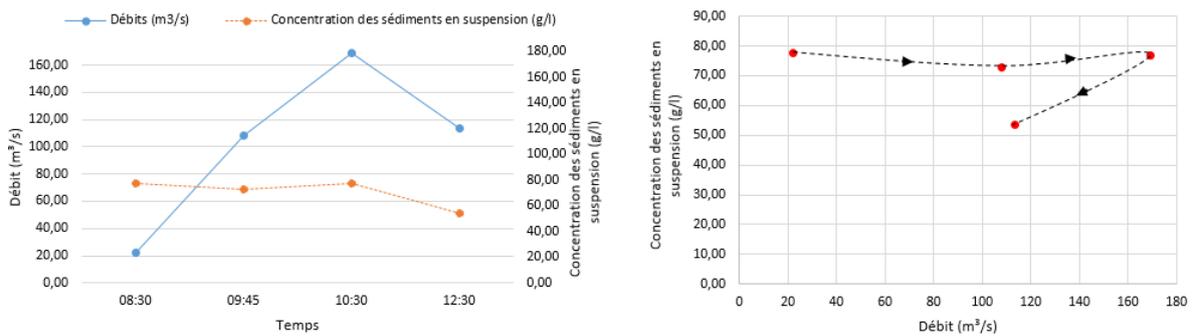


Figure.III.22 : Evolution de la concentration des sédiments transportés et des débits liquides en fonction du temps durant la crue de l'oued Sikkak (9 Septembre 2009) – Classe II

VI - CONCLUSION

Le transport solide en suspension reflète dans une certaine mesure, l'importance de la dégradation dans un bassin donné.

L'analyse des apports solides indique un approvisionnement important de la matière fine dans l'Oued Sikkak. Souvent les transports solides les plus importants sont ceux qui résultent lors des débits très élevés, et surtout lors des crues violentes.

L'examen des crues nous informe sur le fait que les quantités de transports solides plus importantes sont évacuées pendant la saison d'hivers et du printemps, plus particulièrement entre Février et Mars.

CHAPITRE IV

ESTIMATION DE L'ÉROSION PAR LE MODÈLE USLE

I- INTRODUCTION

L'action variable de l'érosion hydrique et du ruissellement n'est pas un fait nouveau, elle est naturelle ou géologique lorsqu'elle correspond plus ou moins à un état d'équilibre entre pédogenèse et le transport des particules meubles. On estime que sur une superficie de 20 millions d'hectares des bassins versants, 50 % présentent des risques d'érosion (Demmak .A, 1982).

L'érosion hydrique constitue, en Algérie, un phénomène très grave qui affecte durement le patrimoine foncier. Elle touche 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares et a pour cause principale, la pression exercée sur la couverture végétale (surpâturage, incendie, pratiques culturales inadaptées, etc...). Ce phénomène est encore plus grave lorsque l'on sait que 85 % des surfaces cultivables, soit 6 millions d'hectares, sont situées dans les zones les plus sensibles à l'érosion (Chibbani R. et al, 1999).

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux. (Cros-Cayot, 1996).

Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de thalweg.

II- GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉROSION

II.1. Définition

Erosion vient de "ERODERE", verbe latin qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un os. D'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi : les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation. En réalité, c'est un processus naturel qui

certes, abaisse toutes les montagnes (d'où le terme de "dénudation rate", vitesse d'abaissement du sol des géographes anglophones) mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable tolérable (FAO, 1994).

Selon (Baghdadi.D et al, 2011), les études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement de l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (De Ploey, et al, 1991; Jofitic, et al, 1992; Shaban, et al, 1998)

L'érosion hydrique est un phénomène complexe par son caractère irrégulier, aléatoire et par sa discontinuité spatio-temporelle. En raison de son ampleur et son agressivité, elle constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales (Achite.M, et al, 2006).

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la méditerranée. Il continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la torrencialité des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendre, sols fragiles, pentes raides et couvert végétal souvent dégradé) et de l'impact défavorable des activités agricoles, selon la (FAO, 1990), la situation continue à se dégrader. En Algérie 45% des zones telliennes sont touchées, soit 12 millions d'hectares (Chibbani.R & al, 1999).

Il y a trois types d'érosion, éolienne, mécanique et hydrique. On s'intéressera ici plus particulièrement à l'érosion hydrique.

II.2.L'érosion hydrique

II.2.1.Définition

L'érosion hydrique est un processus qui emporte et redistribue le sol. Bien qu'une certaine érosion se produise graduellement, le phénomène est surtout imputable à des événements météorologiques extrêmes (une forte pluie). L'érosion hydrique emporte la couche arable du sol, la plus propice au soutien de la vie microbienne et végétale. La disparition de la totalité ou d'une partie de cette couche superficielle diminue le potentiel de production d'un sol en réduisant sa fertilité, sa capacité d'accepter et d'emmagasiner l'eau et l'air. Les matériaux enlevés peuvent se redéposer un peu plus loin sans grandes conséquences apparentes pour l'environnement.

Cependant, dans certains endroits, l'érosion transporte les matériaux jusqu'aux cours d'eau et aux lacs et même jusqu'aux océans, dont les eaux se dégradent considérablement. [1]

II.2.2.Facteurs et mécanisme

Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs, font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier, W.H. et Smith, D.D., 1978 ; King, D. et Le Bissonais, Y., 1992).

A)- Intensité et agressivité des précipitations :

La désagrégation de la structure et le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluie résultent de la force exercée par les gouttes à la surface du sol. Les pluies, lors de l'impact des gouttes, provoquent un détachement des matières et une destruction des agrégats. Plusieurs phases sont à considérer lors d'une averse.

Les premières gouttes de pluies qui arrivent au sol y pénètrent proportionnellement à son ameublissement et sa porosité. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement de particules et d'un tassement du sol. Puis la couche superficielle s'humidifie, et l'on assiste au développement quasi simultané de trois processus : la désagrégation de la structure, la formation d'une pellicule de battance et l'érosion par "splasch" ou érosion par rejaillissement (*Benkhadra, H. 1997*).

L'impact direct des gouttes de pluie provoque non seulement le délitage et la fragmentation des agrégats du sol, mais également l'entraînement et la projection des particules dans toutes les directions. Ce rejaillissement peut être important.

Ces processus de désagrégation de la surface du sol et d'érosion par rejaillissement conduisent à la fermeture des pores à la surface du sol et à la réduction de son infiltrabilité en formant une croûte de battance.

Jusqu'à ce stade, on ne peut parler de transport proprement dit. Il faut que le ruissellement démarre pour qu'il y ait une prise en charge des particules détachées par mise en suspension ou par charriage. (*Bouanani.A, 2004*).

B)- Ruissellement

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures. Les plus faibles ruissellements proviennent des pluies tombantes après une période sèche. Par contre, les ruissellements et les pertes en terres les plus élevées ont eu lieu à une époque où le sol est déjà très humide et dans le cas de pluies exceptionnelles et des orages d'automne et de printemps (*Chebbani, R. et al. 1999*).

Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm (*Laouina, A. 1998*) sur sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur sol humide et compact (*Chebbani R et al, 1997*).

Ces seuils de hauteur dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, mais aussi du volume de pluie tombant après saturation du sol) et surtout de l'état de surface du sol (plus le sol est dégradé plus le ruissellement est rapide).

Selon (*Laouina, A. et al. 1993*), les pluies continues mais de faibles intensités permettent une certaine infiltration de l'eau et réduisent le ruissellement sur les versants, par contre les épisodes de fortes intensités entraînent un ruissellement plus important. Mais ce sont les épisodes pluvieux durables avec des événements de forte intensité répétitifs qui occasionnent la dégradation la plus forte, avec en particulier le passage du ruissellement en nappe au ruissellement en griffes et rigoles.

D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

e) Infiltration

Tous les sols sont plus ou moins perméables. Le coefficient de perméabilité qui représente la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol dépend essentiellement de la porosité du sol. Pour un sol homogène initialement non saturé, la surface du sol présente une certaine infiltrabilité définie comme le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue en contact avec l'eau et la pression atmosphérique. Au cours du temps cette baisse par l'action de la compaction des sols, que ce soit sous l'action des agents climatiques ou par l'action de l'homme, conduit à une réduction de la porosité et donc de la conductivité hydraulique. La diminution de la capacité d'infiltration constitue ainsi un facteur défavorable générateur de ruissellement et de transport de sédiments.

f) Détection superficielle et rugosité du sol

Elle correspond à la capacité de stockage temporaire de la surface du sol vis-à-vis de l'eau. La détection superficielle se fait sous forme de flaques dans les micro-dépressions, dont la capacité de stockage est liée à la rugosité. (Ammari A.2012).

g) Pente et longueur de pente

L'influence de la pente est complexe. Le plus souvent, l'érosion augmente avec la pente. Il se développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe quant à la longueur des pentes, il semble que son influence sur la naissance de rigoles dépend de diverses interactions avec la rugosité et la perméabilité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal. (Roose, 1994).

h) Couvert végétal

Il est clair que le couvert végétal est efficace pour réduire le ruissellement. La couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, constitue la protection la plus efficace du sol. Elle intervient vis à vis du sol par : l'interception nette : une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation. Elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement.

La dissipation de l'énergie cinétique : une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve alors modifiée. L'expérience montre (*Ruiz-Figueroa, J.F. 1983*) in (*Bouanani.A, 2004*) que l'efficacité d'un couvert végétal à l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément récepteur est bas. (*Roose, E. et al. 1999*).

C)- Etat hydrique initial

L'état hydrique du sol au moment d'une pluie a une très forte influence sur la dégradation, la formation des croûtes et la réduction de l'infiltrabilité résultante (*Le bissonais, Y. 1992*). Selon (*Bouanani.A, 2004*), Les agrégats secs sont plus sensibles à l'éclatement. En effet l'intensité de ce processus croît avec le volume d'air piégé en particulier sous des pluies de forte intensité qui peuvent former des croûtes très rapidement (*Le Bissonais, Y. 1988*).

L'état hydrique initial influence aussi la succion exercée à la surface du sol par les couches sous-jacentes et donc l'infiltration au travers de cette surface.

Lorsque le sol en surface est argileux sensible à la dispersion par l'effet de l'impact des gouttes de pluie à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation, il y a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies (*Chebbani, R. et al. 1999*).

En effet, l'humectation des sols argileux entraîne un gonflement qui est une forme analogue de désagrégation. Cette argile mobilisée migre dans l'eau de l'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices infra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former une croûte. La formation des croûtes ou organisation pelliculaire de surface, entraîne une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion. (*Ammari.A , 2012*)

II.2.3.Type d'érosion hydrique

Plusieurs types d'érosion sont dus à l'action de l'eau sur le sol :

II.2.3.1.Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente (Figure.IV.1) : selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. [2]



Figure.IV.1 : Le tracé distinct formé par les eaux de ruissellement est un signe d'érosion en rigoles ayant emporté le sol (Kessel.C, 2015).

II.2.3.2.Érosion par ravinement

Le ravinement, ou érosion par ravinement, est un stade avancé de l'érosion en rigoles. Le sol est alors si profondément entaillé que les dépressions qui se forment nuisent aux opérations normales de travail du sol (Fig.IV.2) (Kessel.C, 2015).



Figure.IV.2 : Sans intervention, l'érosion en rigoles peut mener à l'érosion par ravinement. (Kessel.C, 2015).

II.2.3.3.Érosion en nappes

Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles (Fig.IV.3). Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer.



Figure.IV.3 : érosion en nappe (Kessel.C, 2015).

L'érosion en nappe dépend de :

- ❖ L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement ;
- ❖ L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules ;
- ❖ La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies, c'est à dire l'état du sol.

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol, les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- ❖ Le nivellement de la surface du sol ;
- ❖ La squelettisation des horizons superficiels ;
- ❖ Le décapage entraînant l'apparition de taches claires. [2]

II.2.3.4.Érosion des berges

Les cours d'eau naturels et les canaux de drainage servent d'exutoires aux eaux de ruissellement et aux effluents des réseaux de drainage souterrain. L'érosion fait son œuvre sur les berges au fur et à mesure du sapement, de l'affouillement et de l'effondrement de celles-ci (figure.IV.4). Des aménagements déficients, le manque d'entretien, le libre accès du bétail et la trop grande proximité des superficies cultivées sont autant de facteurs en cause (Kessel.C, 2015).



Figure.IV.4 : L'érosion des berges résulte du sapement et de l'affouillement des berges des cours d'eau naturels et des canaux de drainage. (C.Kessel, 2015)

III- QUANTIFICATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE :

III.1- Méthodes empiriques d'estimation de la dégradation spécifique

Afin d'évaluer l'état de dégradation au niveau d'un bassin versant dépourvu d'une station hydrométrique et d'analyser son degré d'instabilité, plusieurs calculs ont été établis par des chercheurs en utilisant des formules empiriques. Néanmoins, il est conseillé de prendre ces formules avec précaution car souvent elles ne reflètent pas la réalité.

Il existe plusieurs formules permettant la quantification de l'érosion hydrique, nous ne citerons que celles qui impliquent des paramètres physiques représentatifs.

III.1.1- Formule de la Sogréah

Basée sur des données de 30 bassins algériens, cette formule est décrite de la façon suivante :

$$ASS = \alpha E^{0,15} \quad (1)$$

Avec :

ASS : Apport solide spécifique (T/km²/an)

A : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol

E : Ecoulement annuel (mm)

III.1.2- Formule de Tixeront

Les travaux faits sur 32 bassins algériens et 9 bassins tunisiens ont abouti à la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{ASS} &= 354 \text{ E}^{0,16} && \text{(Pour les bassins Tunisiens)} \\
 \text{ASS} &= 92 \text{ E}^{0,21} && \text{(Pour la région est Algérien)} \\
 \text{ASS} &= 200 \text{ E} && \text{(Pour la région centre Algérien)}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

(Ass) et (E) sont les mêmes paramètres précédents.

III.1.3- Formule de Fournier

Elle est définie par la relation suivante :

$$\text{Ds} = 1/36 (\text{Pm}^2 / \text{Pa})^{2,65} (\text{H}^2 / \text{S})^{0,46} \tag{3}$$

Avec:

- Ds** : Dégradation spécifique (T/km²/an)
- Pm** : Précipitation mensuelle du mois le plus arrosé (mm)
- Pa** : Précipitation moyenne annuelle (mm)
- H** : Dénivelée moyenne (m)
- S** : Surface du bassin versant (km²)

III.1.4- Formule de l'ANRH

Elle est définie par la relation suivante :

$$\text{Ts (t km}^{-2} \text{ an}^{-1}) = (26,62 \times \text{IL}) + (5,07 \times \text{Ip}) + (9,11 \times \text{CT}) - 593,56 \tag{4}$$

Avec :

- IL** : Indice lithologique (rapport de la surface occupée par la roche érodable et de la superficie du bassin)
- IP** : Indice pluviométrique (produit du pourcentage et de la fréquence des pluies supérieures à 20 mm)
- CT** : Coefficient de torrentialité (produit de la densité de drainage et de la fréquence des talwegs)

III.1.5- Formule de Wischmeier et Smith (1978)

La formule s'écrit :

$$\text{A} = \text{R.K.LS.C.P} \tag{5}$$

Avec :

A : Taux de perte de sol (t/ha.an).

R : Erosivité de pluie (MJ.mm/ha.h.an).

K : Erodabilité du sol (t.ha.h/ha.MJ.mm).

LS : Facteur topographique intégrant la pente et la longueur de pente.

C : Facteur de protection du sol par la couverture végétale.

P : Facteur exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles.

III.2. Formule de Wischmeier et Smith (1978)

III.2.1.Toile de fond :

L'équation universelle des pertes en terre (EUPT, mieux connue par son abréviation anglaise, USLE) prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. L'EUPT prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. (*Stone R.P. et Hilborn D., 2000*).

Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'EUPT peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles. (*Stone R.P. et Hilborn D., 2000*)

Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par l'EUPT représentent avec plus de précision les moyennes à long terme. (*Stone R.P. et Hilborn D., 2000*)

III.2.2. Evaluation de l'érosion hydrique par le modèle USLE

L'équation universelle des pertes en sol modifiée permet d'estimer le risque d'érosion hydrique. Il s'agit d'un modèle empirique qui réunit les facteurs ayant une incidence sur l'importance de l'érosion. Il se présente comme suit :

$$A = R.K.LS.C.P \quad (6)$$

Avec :

A : Taux de perte de sol (t/ha.an).

R : Erosivité de pluie (MJ.mm/ha.h.an).

K : Erodabilité du sol (t.ha.h/ha.MJ.mm).

LS : Facteur topographique intégrant la pente et la longueur de pente.

C : Facteur de protection du sol par la couverture végétale.

P : Facteur exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles.

D'après ce modèle, cinq facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de cette méthode peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par contre, à long terme, les valeurs moyennes obtenues par USLE représentent les pertes en sol avec plus de précision (*Stone.R.P et Hilborn.D, 2000*).

- ❖ A exprime les pertes de terre annuelles moyennes possibles à long terme en tonnes par acre par année. Cette valeur peut ensuite être comparée aux limites de « pertes de terre tolérables ».
- ❖ R correspond au facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique. Le facteur R. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus les risques d'érosion sont grands. (*Stone.R.P et Hilborn.D, 2000*).
- ❖ Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer. (*Stone.R.P et Hilborn.D, 2000*).
- ❖ LS est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente. Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre en un endroit caractérisé par une inclinaison « standard » de 9 % et une longueur de pente de 72,6 pieds. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion. On établit le facteur LS à l'aide soit du (Tableau.IV.1), soit de l'équation servant au calcul du facteur LS donnée plus bas (Eq.9)

Tableau.IV.1 : Facteur LS (Stone.R.P et Hilborn.D, 2000).

Longueur de la pente en m	Pente (%)	Facteur LS
31	10	1,3800
	8	0,9964
	6	0,6742
	5	0,5362
	4	0,4004
	3	0,2965
	2	0,2008
	1	0,1290
61	0	0,0693
	10	1,9517
	8	1,4092
	6	0,9535
	5	0,7582
	4	0,5283
	3	0,3912
	2	0,2473
	1	0,1588
122	0	0,0796
	10	2,7602
	8	1,9928
	6	1,3484
	5	1,0723
	4	0,6971
	3	0,5162
	2	0,3044
	1	0,1955
244	0	0,0915
	10	3,9035
	8	2,8183
	6	1,9070
	5	1,5165
	4	0,9198
	3	0,6811
	2	0,3748
	1	0,2407
488	0	0,1051
	10	5,5203
	8	3,9857
	6	2,6969
	5	2,1446
	4	1,2137
	3	0,8987
	2	0,4614
	1	0,2964
975	0	0,1207
	10	7,8069
	8	5,6366
	6	3,8140
	5	3,0330
	4	1,6015
	3	1,1858
	2	0,5680
	1	0,3649
0	0,1386	

- ❖ C correspond au facteur de végétation et de gestion. Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre. Le facteur C est un ratio qui compare les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment laissé en jachère (*Stone.R.P et Hilborn.D, 2000*).

Le facteur C combine la couverture, le degré de production de la plante et la technique de culture associée (*Farhan.Y, et al, 2013*). Selon (*Markhi.A, et al, 2015*), le facteur C varie entre 1 pour le sol nu et moins de 0.1 pour les forêts denses.

- ❖ P correspond au facteur de pratique de conservation. Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eaux de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui réduisent de ce fait l'importance de l'érosion. Le facteur P représente le ratio des pertes de terre associées à une pratique de conservation aux pertes de terre associées à la culture en lignes dans le sens de la pente. Les pratiques de conservation les plus couramment utilisées sont le travail du sol à contre-pente, la culture suivant les courbes de niveau et la culture en bandes (*Stone.R.P et Hilborn.D, 2000*).

IV-DONNÉES ET MATÉRIELS UTILISÉS :

IV.1.Documents :

- Modèle Numérique de Terrain (N.W Algérie) : The CGIAR consortium for spatial information CSI.
- Données des textures des sol depuis le site de FAO (version 1,21)
- Images Satellitaires « SAS PLANET ».

IV.2.Matériels :

- Système de traitement des données cartographiques (Arc Map et Arc View).

V- MÉTHODOLOGIE

L'Equation Universelle de Perte en Sol (USLE) a été choisie pour évaluer la perte en sol provoquée par l'érosion en nappe (Wischmeier et Smith, 1978). Pour

évaluer le ruissellement et l'érosion, on a appliqué le modèle U.S.L.E qui permet de déterminer la sensibilité à l'érosion. Des valeurs théoriques de pertes de sol annuelles par hectare sont déterminées en fonction des facteurs suivants :

- Facteur climatique (R) ou agressivité des pluies ;
- Facteur topographique (LS) indiquant la pente et la longueur de pente ;
- Facteur lithologique ou érodibilité des sols (K) ;
- Facteur cultural (C) déterminé à partir de l'occupation du sol ;
- Pratiques agricoles antiérosives (P).

La perte en sol (A) est déterminée par le produit des six facteurs précédents selon l'équation :

$$A = R.K.LS.C.P \quad (7)$$

V.1.Élaboration des données

Elle consiste en :

- + La numérisation de l'hydrographie à partir de modèle Numérique de Terrain (MNT) et ses dérivées, ainsi que le réseau hydrographique.
- + L'extraction de la carte pédologique qui couvrant le bassin versant afin d'élaborer les couches d'érodibilité des sols.
- + Les traitements numériques de l'image satellitaire donnant la carte d'occupation des sols. L'intégration de ces données dans le Système d'Information Géographique (SIG) piloté par le logiciel Arc GIS.

V.2.Estimation des facteurs (R ; LS ; K ; C ; P) :

V.2.1.Agressivité de la pluie, R

Ce facteur est obtenu à partir du dépouillement des données de la pluviométrie portant sur la période de (1973/74 – 2009/10) aux stations de Mefrouche, Lala Setti, Tlemcen et de Hennaya (Fig.IV.6). Les valeurs du facteur R sont déterminées pour la zone d'étude à l'aide de la formule suivante : (El Garouani.A, et al, 2007)

$$R = 143 \text{ Log } (P . P_{24}^2 . 10^{-6}) + 89,7 \quad (8)$$

Avec :

R : Valeur moyenne de l'érosivité des pluies

P : Précipitations moyennes annuelles (mm/an) dans une série de données considérée (1974/2010).

P₂₄ : Moyenne des pluies maximales en 24 h relative à une série de données considérée (1974/2010) (Tableau.IV.2).

Tableau.IV.2 : valeurs de facteur R aux différentes stations (1974-2010)

Station	Mefrouche (1974-2010)	Lalla Setti (1974-2010)	Tlemcen (1974-2010)	Hennaya (1974-2010)
Pluies maximales en 24 h (mm)	158,1	157	146,4	131,6
Précipitation moyenne annuelles (mm/an)	560,77	504,88	509,14	391,17
Facteur R	253,67	246,28	238,12	208,51

La répartition spatiale de pluie érosive aux stations de Tlemcen ; Hennaya ; Mefrouche et de Lala Setti (Fig.IV.5) montre que le bassin versant de Sikkak est soumis à une agressivité pluvial.

Les valeurs de R subissent un gradient croissant de l'aval vers l'amont, 60% du territoire du bassin versant est soumis à une agressivité des pluies élevée correspondante à une classe de R supérieur à 210 MJ.mm/ha.h.an.

Ce résultat permet de déduire que le bassin est subit à un pouvoir érosif important, avec une moyenne établie à 226 MJ.mm/ha.h.an (Fig.IV.5)

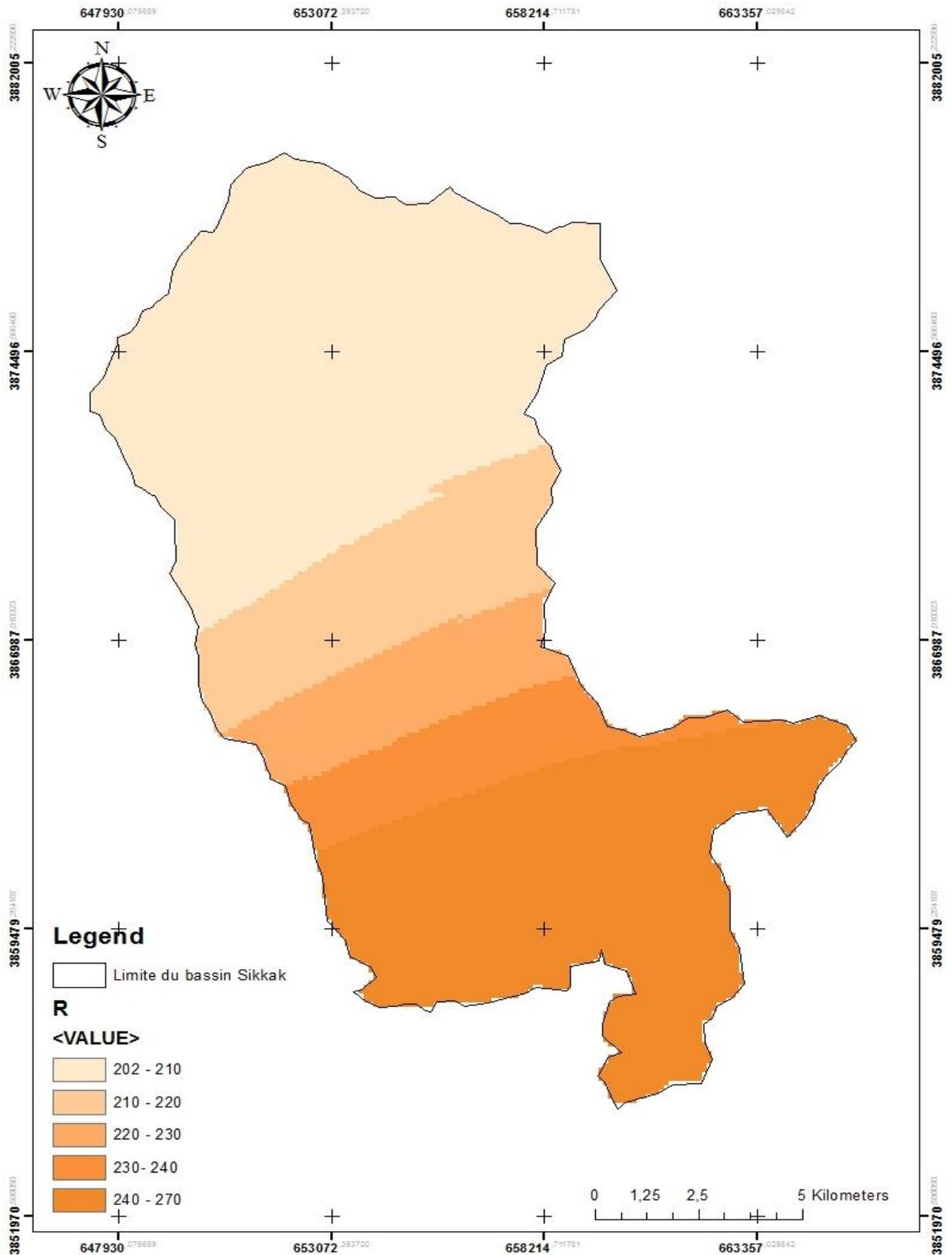


Figure.IV.5 : carte du facteur R au bassin versant Sikkak

Tableau.IV.3 : Résultats de facteur R en fonction de la surface du bassin

Bassin Sikkak (217.4 km ²)	Surface (km ²)		Surface (ha)	Surface (%)	R (MJ.mm/ha.h.an)
		104,4	10440	48,02	202-215
		34,53	3453	15,88	215-235
		42,1	4210	19,37	235-250
		37,75	3637	16,73	250-265

Les valeurs de R les plus faibles (200 à 210 MJ.mm/ha.h.an) se focalisent sur la partie inférieure du bassin, alors que les valeurs les plus fortes 250 à 270 MJ.mm/ha.h.an concernent les zones situées au sud du bassin Sikkak. La (Fig.IV.6) montre la distribution spatiale du facteur R.

V.2.2.Erodibilité des sols, K

- K représente le facteur d'érodibilité du sol .Il s'agit de la perte de terre moyenne en tonnes/ acre par unité de superficie pour un sol particulier.
- D'après la base des données que nous avons obtenues depuis le site officiel de l'Organisation d'Alimentation et de l'Agriculture (FAO), nous avons pu extraire les trois types de sols numérisés sur le bassin versant de Sikkak (Fig.IV.6).

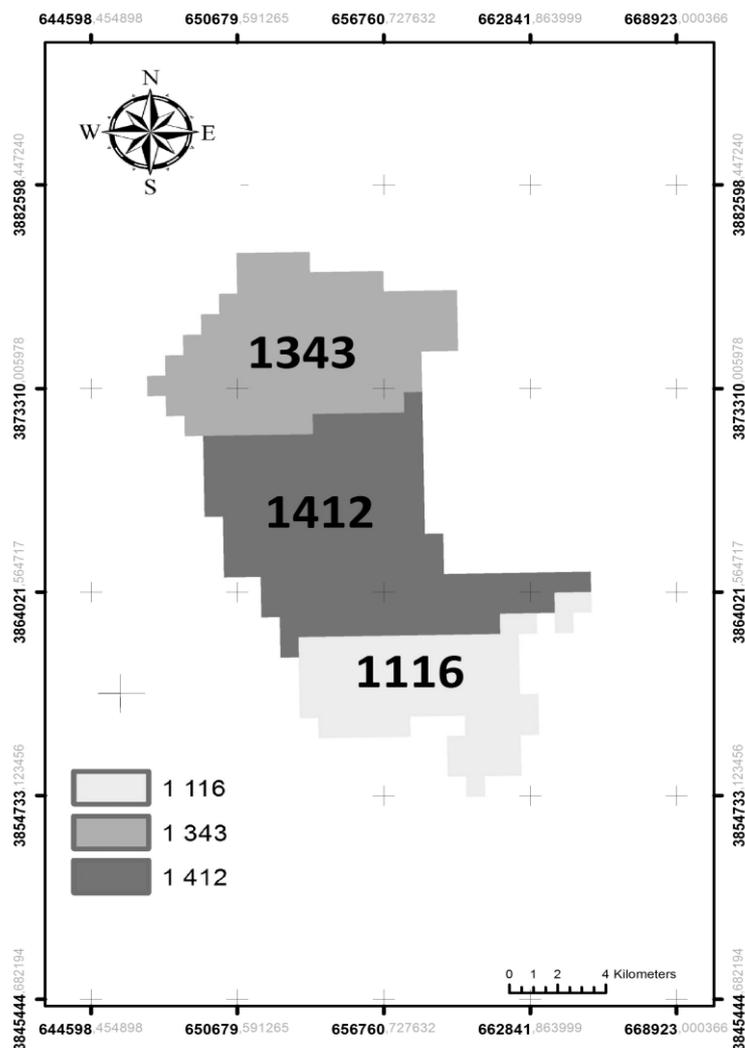


Figure.IV.6 : les trois codes des sols du bassin versant d'oued Sikkak

Tableau.IV.4 : Les données depuis « Harmonized World Soil Database v.1.21»
Data (FAO)

Identifiant	Code	Teneur en carbone organique (%)	Sable	Limon	Argile	Teneur en matière organique (%)
38438	1116	0,63	36	41	23	1,083
38912	1343	0,60	37	45	18	1,032
39112	1412	0,86	39	27	34	1,479

- Selon *Fitzpatrick, 1983*, Habituellement, les pourcentages de carbone sont multipliés par un facteur de conversion de 1,72 afin de fournir une indication des quantités totales de matière organique présentes (Tableau.IV.4).

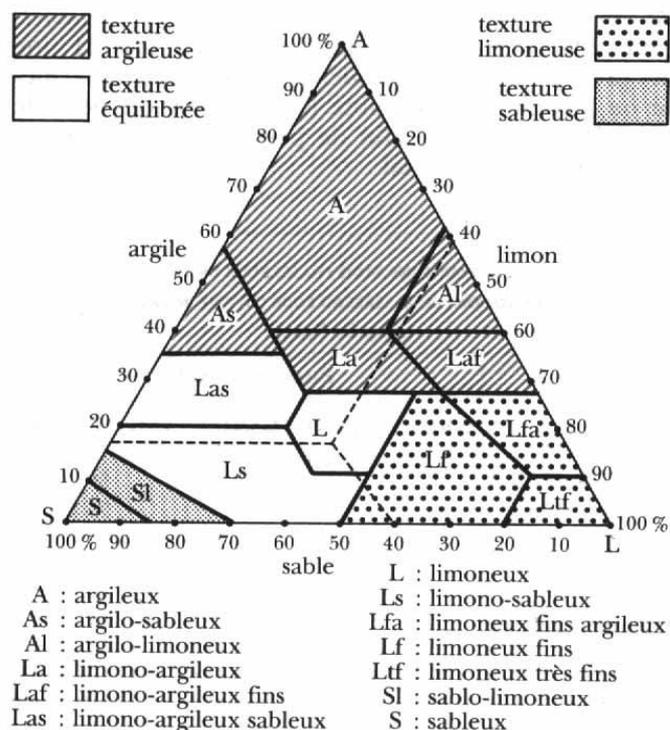


Figure.IV.7 : Triangle des textures (d'après le département de l'agriculture USA)

- En fonction de la texture du sol (Fig.IV.7), nous avons trouvé le facteur K (Tableau.IV.5). Pour le champ qui comportent plus d'un type de sol et qui ne sont pas très différents. Nous les avons rassemblés sous le type qui caractérise la plus grande surface.

Tableau.IV.5 : Facteur K (R.P. Stone et D. Hilborn, 2000)

Classe texturale	Teneur en matière organique		
	Moyenne	Moins de 2 %	Plus de 2 %
Argile	0,22	0,24	0,21
Limon argileux	0,30	0,33	0,28
Limon sableux grossier	0,07	–	0,07
Sable fin	0,08	0,09	0,06
Limon sableux fin	0,18	0,22	0,17
Argile lourde	0,17	0,19	0,15
Limon	0,30	0,34	0,26
Sable fin limoneux	0,11	0,15	0,09
Sable limoneux	0,04	0,05	0,04
Sable très fin limoneux	0,39	0,44	0,25
Sable	0,02	0,03	0,01
Terre franche argileuse	0,20	–	0,20
Limon sableux	0,13	0,14	0,12
Limon limoneux	0,38	0,41	0,37
Argile limoneuse	0,26	0,27	0,26
Limon limono-argileux	0,32	0,35	0,30
Sable très fin	0,43	0,46	0,37
Liment sableux très fin	0,35	0,41	0,33

- Les valeurs de K adoptées pour le bassin versant d'Oued Sikkak sont respectivement 0,33 ; 0,33 ; 0,34 dont la matière organique ne dépasse pas les 2% respectivement 1,08 ; 1,03 ; 1,47.
- Les résultats obtenus pour le facteur K à l'échelle du bassin versant de Sikkak varie de 0.33 t.ha.h/ha.MJ.mm pour les sols les plus résistants à 0.34 t.ha.h/ha.MJ.mm pour les sols les plus érodables. Les sols de la zone d'étude sont considérés comme des sols sensibles à l'érosion étant donné que la moyenne de leur indice d'érodibilité K est de 0,336 t.ha.h/ha.MJ.mm.
- la distribution spatiale du facteur K (Figure.IV.8) montre un potentiel d'érodibilité plus élevé au nord 0,34 à 1 t.ha.h/ha.MJ.mm et au sud de 0,33 à 034 t.ha.h/ha.MJ.mm.

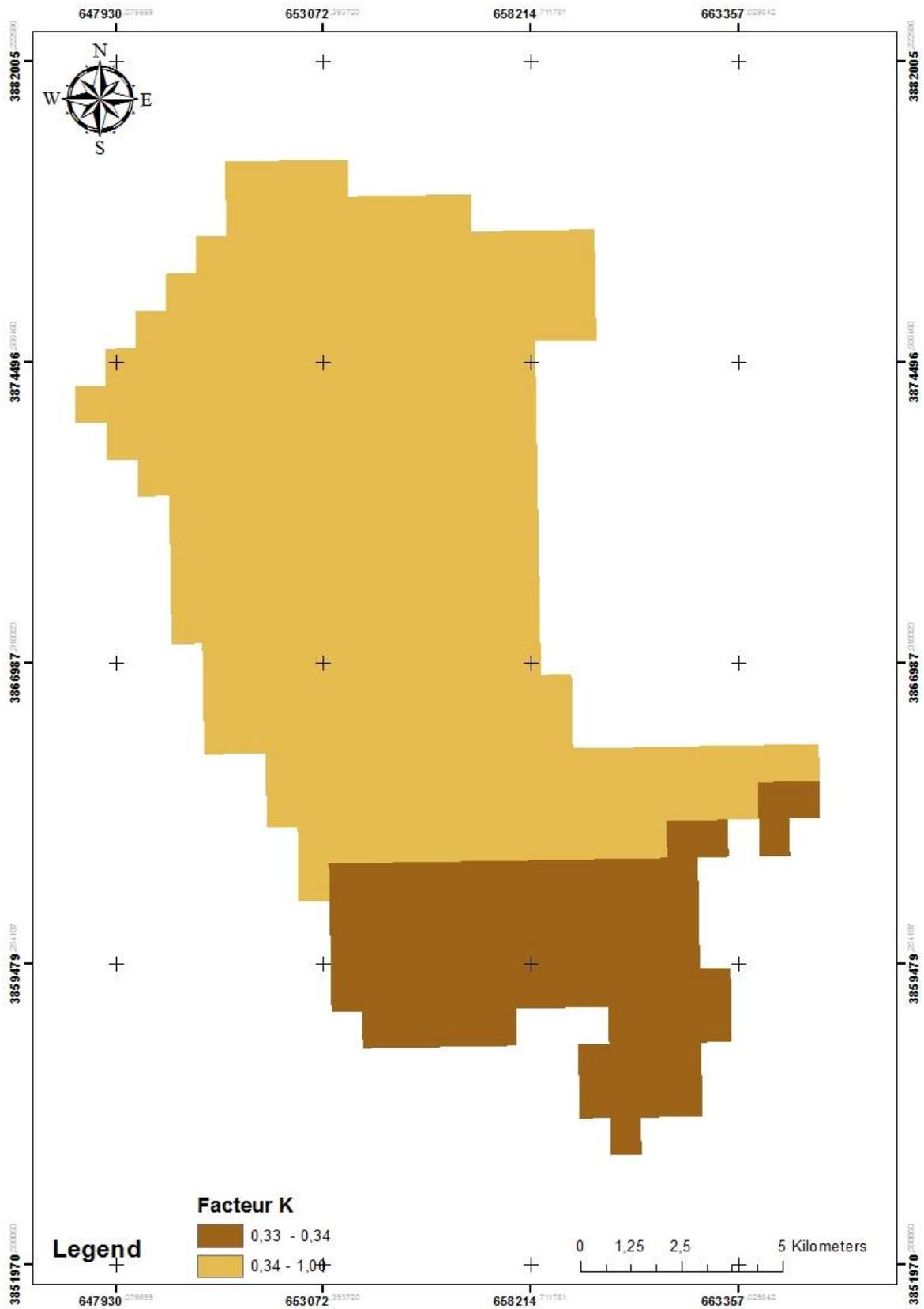


Fig.IV.8 : carte du facteur K au bassin versant Sikkak

V.2.3. Le facteur topographique, LS

Le paramètre LS est le produit de deux sous facteurs à savoir la longueur de la pente et le gradient de la pente (Fig.IV.9). Ils proviennent du Modèle Numérique du Terrain. La longueur de la pente (L) est définie comme étant la distance parcourue par une goutte d'eau depuis la source de ruissellement jusqu'à un point donné du bassin.

L'approche utilisée est basée sur les procédures et les équations de (*Moore.I.D et Burch.G.J, 1986*). Pour calculer les facteurs L et S, on s'est basé sur le MNT de la zone d'étude à haute résolution (30m x 30m). Un programme développé sur la base d'ArcMap a permis de déterminer la carte de potentiel érosif (Fig.IV.10) du bassin selon l'expression suivante :

$$LS = [0,065 + 0,0456 (P) + 0,006541 (P)^2] \left(\frac{LP}{Constant} \right)^N \quad (9)$$

Avec :

P : Inclinaison de la pente (%)

LP : Longueur de la pente (m.)

Constante : 22,1 en mesures métriques

NN : Correspondant à la pente global moyenne (Tableau.IV.6)

Tableau.IV.6 : Pente globale moyenne (Stone R.P.et H.Hilborn D., 2000)

Pente	< 1	1 ≤ Pente < 3	3 ≤ Pente < 5	≥ 5
NN	0,2	0,3	0,4	0,5

Le facteur LS varie en fonction de la topographie du bassin (Fig.IV.10), on remarque que les zones relativement planes dans le bassin versant impliquent une répartition assez faible des valeurs de (LS) entre 0 et 0, 1, d'autre part (LS) varie entre 0,30 et 4 au sud du bassin qui est caractérisées généralement par une agressivité topographique.

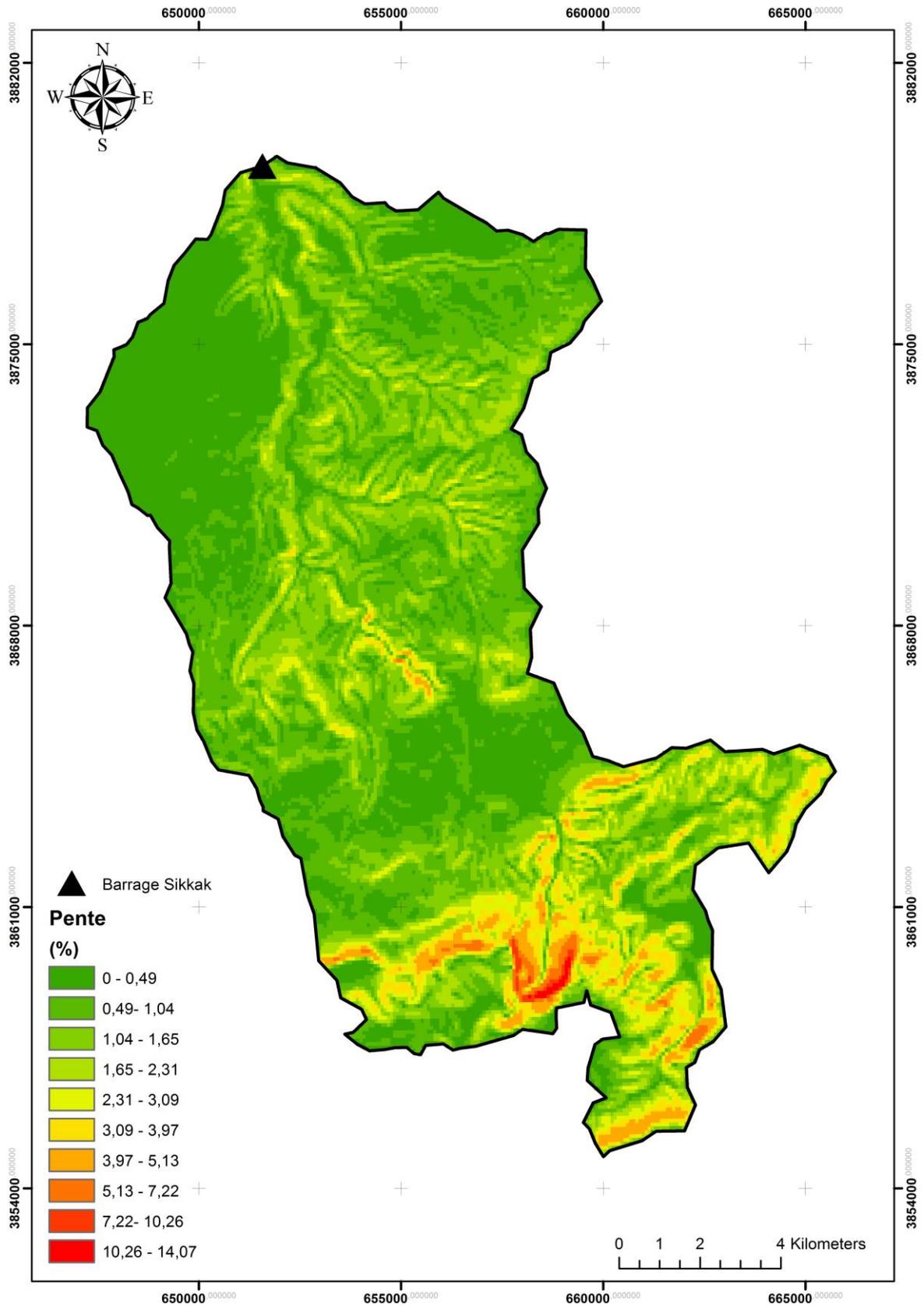


Figure.IV.9 : carte des pentes de bassin versant Sikkak

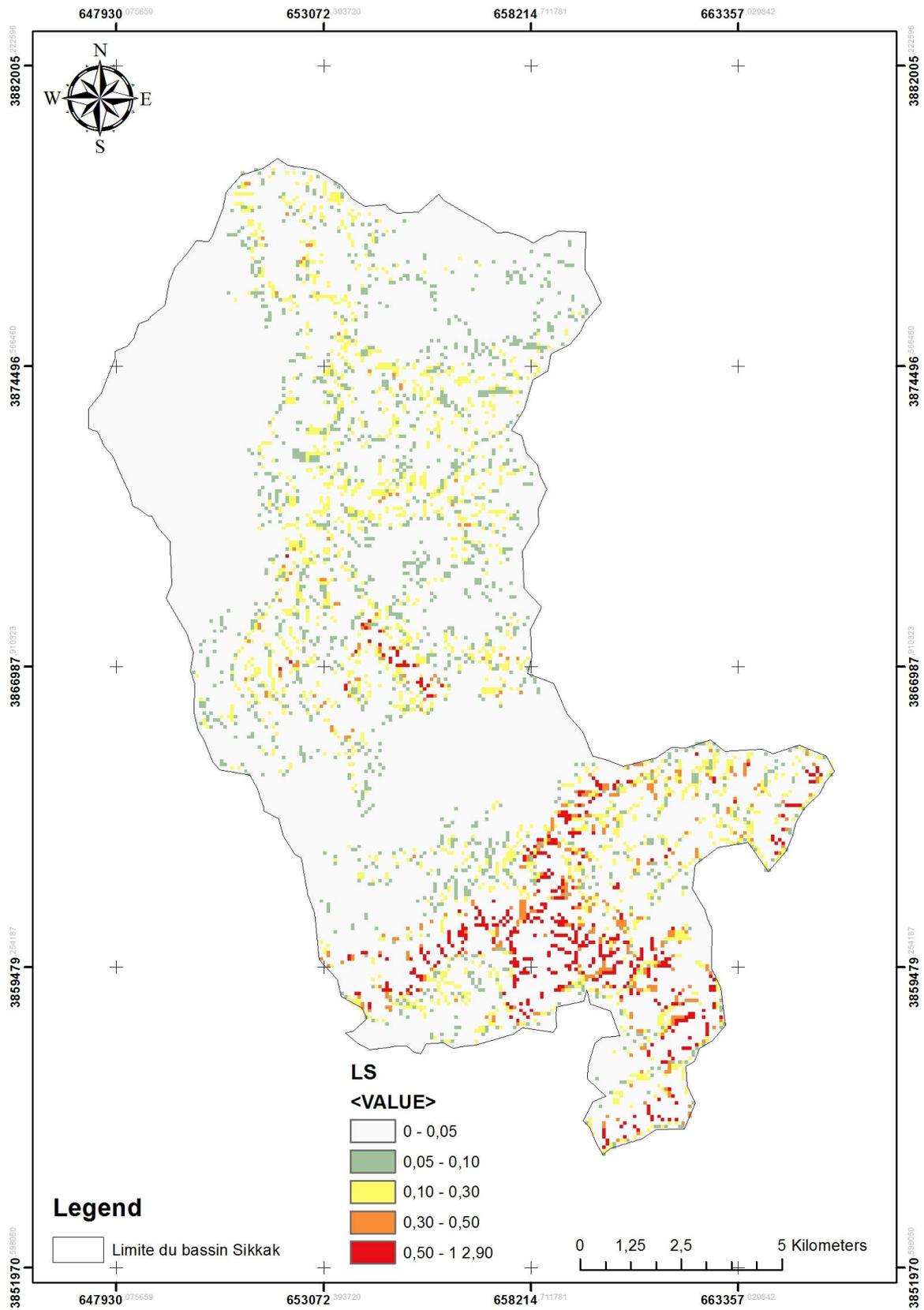


Figure.IV.10 : carte du facteur LS au bassin versant Sikkak

V.2.4. Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturelles, C

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou de résidus. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration (Cyr *et al*, 1995 ; Bannari *et al*, 1999).

Une approche par classification supervisée de l'image Spot a été appliquée pour déterminer la carte d'occupation du sol. Cette carte a été réalisée par les images satellitaires. En plus, par des opérations de seuillage de l'indice de végétation, il est possible d'établir la carte de densité du couvert végétal (El Garouani *et al*, 2001). Ces cartes sont utilisées pour en déduire le facteur de protection du sol par la couverture végétale (facteur C).

En effet, nous avons affecté par analogie, à partir des images satellitaire, pour chacune des différentes cultures et utilisation du sol des valeurs du facteur C.

Les opérations de traitements d'images satellitaires effectuées sur « ArcMap » pour la cartographie de l'occupation du sol sont :

- Interprétation visuelle ;
- Classification dirigée des couleurs ;
- Traitements post-classification ;
- Combinaison des rasters.

D'après la carte réalisée (Fig.IV.11) on peut distinguer trois types d'occupations majeures qui couvrent tout le bassin versant ; les valeurs de 0,01 à 0,041 demeurent dans les zones de l'agriculture et l'arboriculture, cependant les coefficients de 0 à 0.01 se localisent dans les aires urbanisées et espacées. Les coefficients les plus élevés 0,041 à 0,44 correspondent aux sols nus. Les fortes sensibilités à l'érosion sont attribuées aux zones nues ou bien non cultivées.

Une carte de l'indice de couvert végétal a été élaborée à l'échelle du bassin versant de Sikkak (Fig.IV.11).

Tableau.IV.7 : Coefficients correspondants aux différents types d'occupation du sol (Stone R.P. et Hilborn D., 2002 ; Roose .E, 1994)

Classification	Coefficient
Sol nu	0,45
Urbanisation	0,01
Terre de culture	0,041

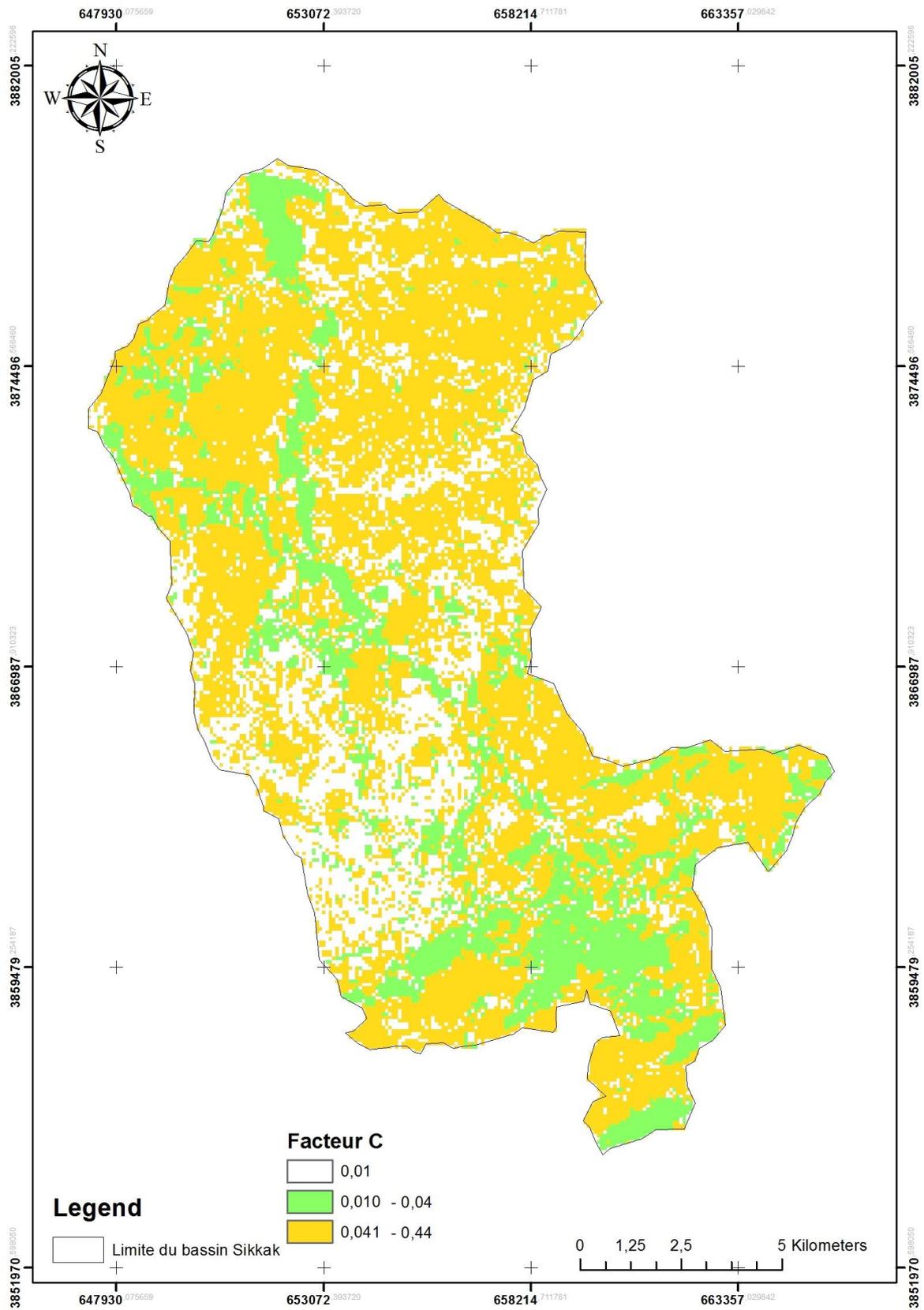


Figure.IV.11 : carte du facteur C au bassin versant Sikkak

V.2.5. Le facteur aménagement anti - érosif, P

Il varie en fonction de l'aménagement effectué sur la pente et de la valeur de la pente elle-même. Il est le rapport de la perte de sol avec un soutien spécifique pratiqué sur les terres agricoles à la perte correspondante avec labour de pente parallèle (. Wischmeier W. H et Smith D. D 1978).

Une fois les aménagements cartographiés, on combine la carte des aménagements avec celle de la pente afin de déterminer sur quel niveau de pente l'aménagement en question a été effectué.

Concernant notre bassin d'étude, en l'absence d'informations sur les pratiques anti-érosives, nous avons attribué à ce paramètre la valeur 1. (El Garouani.A, et al ,2003)

En fin et pour l'élaboration de la carte des pertes en sol, nous avons procédé à la spatialisation de ces facteurs en utilisant les techniques du SIG. La méthodologie adoptée dans ce travail est illustrée par la Figure (IV.12).

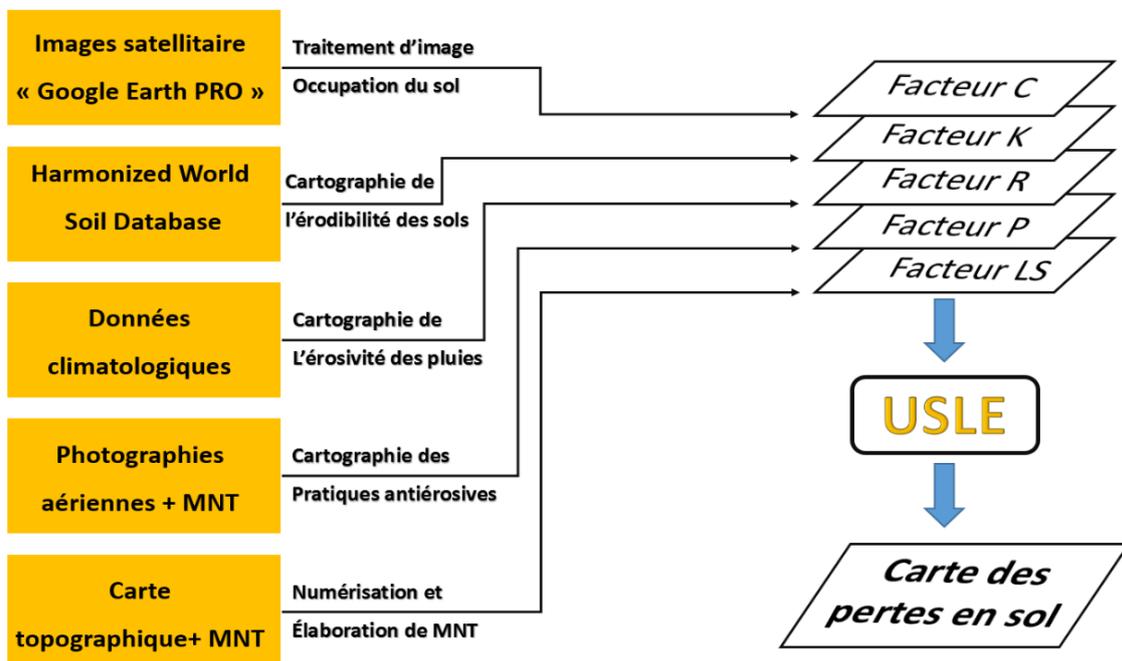


Figure.IV.12 : Méthode utilisée pour l'évaluation quantitative des pertes en sol

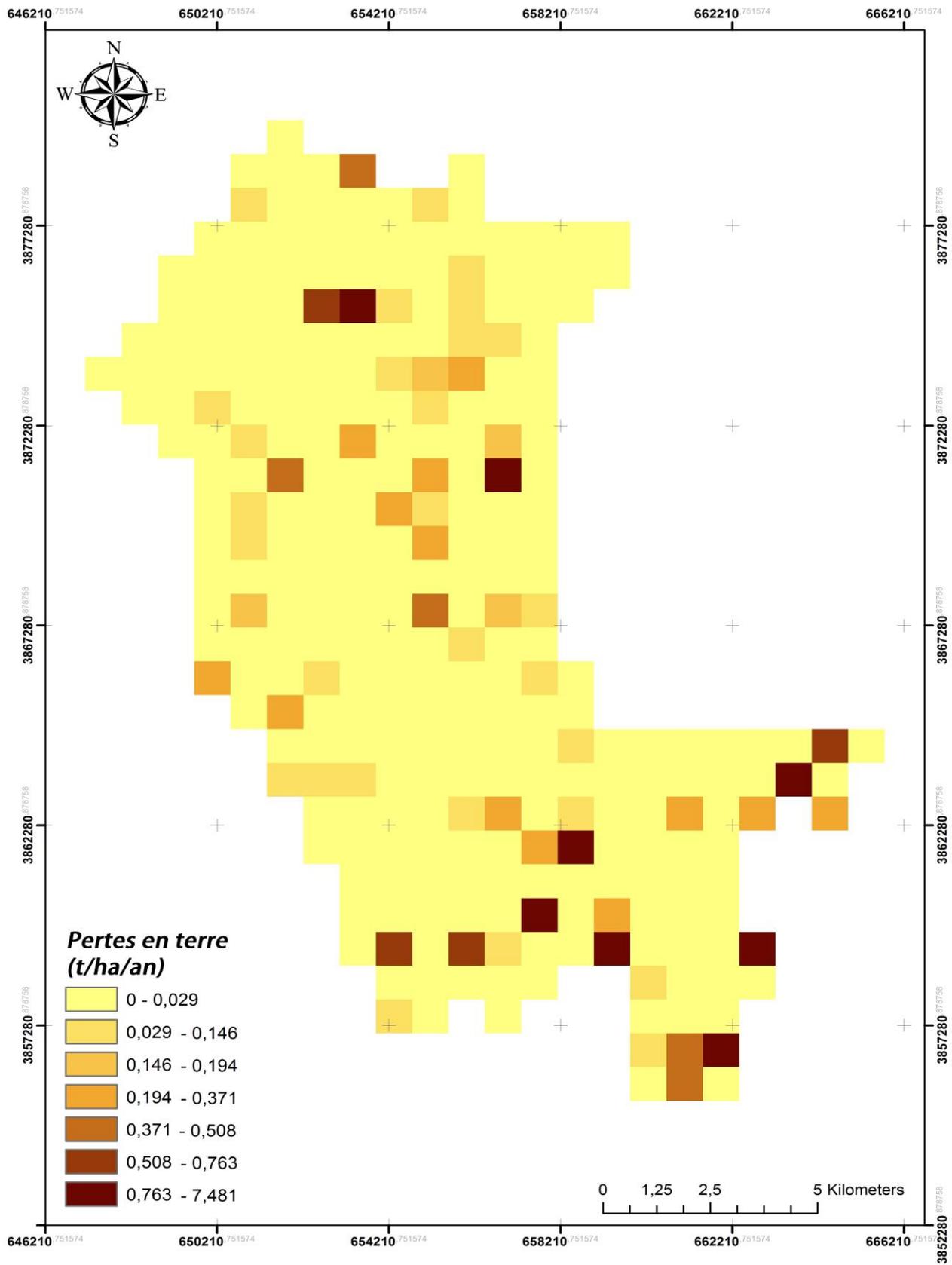


Figure.IV.13 : carte de taux d'érosion au niveau du bassin versant Sikkak

Les résultats des calculs des pertes en sols annuels (Tableau IV.8, Fig.IV.13) montrent :

- Une grande fragilité de la partie sud-Est et nord-Est du bassin constituée essentiellement par des alluvions et des marnes miocènes (de 3 à 7,5 t/ha/an). Environ 3950 ha, soit 18 % de la superficie totale du bassin.
- Les faibles taux d'érosions (< 3 t/ha/an) dominent surtout sur les versants de l'ouest du bassin où le travail du sol couvre la majorité de la surface.
- Les régions de faibles pertes en sol correspondent à des zones de faible pente ou à des plaines qui souffrent de sédimentation.

Il faut rappeler que la recherche sur la modélisation des processus d'érosion a été très active durant les dix dernières années en Algérie pour faire face au grand manque de données de mesures au champs des pertes en sols.

A l'état actuel de ce travail effectué dans la région, le taux d'érosion spécifique annuelle calculé par le modèle doit être considéré à titre indicatif et son importance réside dans le suivi de la variation temporelle du processus.

Tableau.IV.8 : Répartition des classes de perte en sol dans le bassin Sikkak

<i>Classe des pertes en sol</i>	<i>Perte en sol (T/ha.an)</i>	<i>Surface (ha)</i>	<i>Pourcentage</i>
<i>I</i>	<1.5	12022,25	55,3 %
<i>II</i>	1.5-3	6682,5	30,74 %
<i>III</i>	3-7,4	1822,5	8,38 %
<i>IV</i>	>7,4	1215	5,58 %

Le taux de l'érosion résulte de la combinaison des facteurs du modèle USLE, notamment l'agressivité climatique R (ou érosivité des précipitations), l'érodibilité des sols K et l'effet combiné du degré et de la longueur de la pente LS, la couverture végétale C et les pratiques antiérosives P. Sa détermination permet de connaître la répartition du risque érosif dû aux seuls effets des facteurs naturels. La combinaison et le traitement sous SIG de ces quatre facteurs présentés en détail plus haut ont permis d'élaborer à l'échelle du bassin du Sikkak la carte de l'érosion potentielle. Les valeurs de l'érosion potentielle (t/ha/an) obtenues à l'échelle du bassin ont ensuite été regroupées en 4 classes (Tableau.IV.8) de valeurs comme suit :

- Une première classe qui regroupe les zones avec une érosion potentielle inférieure à 1,5t/ha/an. Elle constitue 55.3 % de la superficie du bassin étudié et couvre principalement les secteurs qui se trouve sur la plaine en aval du bassin versant.

- Une deuxième classe qui regroupe les zones avec une érosion potentielle comprise entre 1,5 et 3 t/ha/an. Elle constitue 30.47 % de la superficie du bassin étudié, se focalise principalement au centre et à l'ouest du bassin versant.

- et les dernières classes, une troisième qui regroupe les zones avec une érosion potentielle comprise entre 3 et 7 t/ha/an. Elle représente 8.38 % de la superficie du bassin étudié, et Une quatrième classe qui regroupe les zones avec une érosion potentielle supérieure à 7t/ha/an. Elle représente 5.58 % de la superficie du bassin étudié. Elles se focalisent sur les zones montagneuses et sur les zones à terre friable généralement à l'amont du bassin versant.

En effet, ce résultat acquit du modèle USLE révèle l'altération actuelle des matériaux érodés et renseigne sur la quantité de l'érosion potentiellement fournis par l'érosion dans le bassin versant. On peut dire que le modèle ne prend pas en considération les processus de transport des matériaux ; dépendant de l'écoulement de surface et de sa compétence.

VI- CONCLUSION

La présente étude expose les résultats de l'application de l'Equation universelle de pertes en sol à l'aide d'un Système d'information géographique dans le bassin versant de l'oued Sikkak. L'étude a montré qu'en intégrant les résultats sur la surface du bassin, le bassin versant sera perde en moyenne 287 t/ha/an. Cette valeur correspond à une érosion très élevée par les sols qui subissent un climat agressif avec des précipitations faibles mais à caractère orageux.

Les résultats apportés dans le cadre de cette étude permettant de mettre en évidence les dynamiques d'érosion hydrique sur le bassin versant du Sikkak. L'effet de l'agressivité climatique et l'effet de l'érodibilité des sols se sont des facteurs qui en une influence importante sur l'érosion hydrique.

L'effet de cette influence est dû :

- les pluies rares et irrégulières ;
- l'intensité des pluies ;
- la dégradation des sols.

Enfin, le présent travail a délimité, à échelle moyenne, les zones à risque d'érosion hydrique et les facteurs déterminants de la dégradation des terres.

Bien que la validité des pertes en sols de l'USLE soit sujette à discussion, la méthode apporte une aide importante aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution de la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion par la délimitation des zones les plus exposées aux risques d'érosion afin de protéger le milieu naturel, d'éviter la pollution de l'eau, l'envasement du barrage SIKKAK, situé à l'aval du bassin versant. Surtout dans les zones où l'érosion en nappe est prédominante sur l'érosion linéaire. Elle permet aussi de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Arrivés au terme de notre étude, nous pensons que notre travail ne serait pas complet si nous ne faisons le bilan des réponses que nous avons apportées, ce travail que nous venons d'élaborer présente une contribution à la quantification de l'érosion et du transport solide au niveau du bassin versant Sikkak.

C.I- Caractéristique de base du bassin versant SIKKAK

C.I.1- Morphométrie

Les paramètres physiographiques, montrent que le bassin SIKKAK présente une forme assez Allongé ($1,25 < Kc < 1,50$), favorisant une érosion linéaire et régressive. La densité de drainage qui montre que le bassin est bien hiérarchisé et drainé ($0,6 < Dd < 3,2$).

Le bassin présentent en général un relief modéré à assez fort ($0,011 < Ig < 0,04$). Selon sa taille, son relief et sa densité de drainage, le coefficient de torrentialité égale à 1,98. Le temps de concentration a estimé pour 3h et 8min.

L'analyse hypsométrique nous a donné la preuve tangible de l'évolution tectogénique récente qui témoigne du rejeu des accidents qui avaient entraîné le découpage de la région en horsts et grabens. L'analyse en composante principale nous a permis de mettre en évidence l'interrelation entre les différents paramètres physiographiques et la présence de trois groupes de bassins. Notre bassin fait partie de la moyenne Tafna et descend tous vers la plaine de la Tafna versant Nord des monts de Tlemcen au Sud.

C.I.2- Géologie

A l'issue de l'étude géologique, nous avons pu individualiser les formations selon leur perméabilité. En fait, la majorité des formations de notre bassin ont, de par leur structure physique, une perméabilité assez bonne. Les réserves en eaux souterraines sont liées essentiellement aux nappes superficielles des formations plio - quaternaires et aux phénomènes karstiques des massifs calcaires du Jurassique.

Par ailleurs, les terrains à dominante imperméable (roches marneuses ou argileuses) favorisent largement le ruissellement superficiel. Par contre, la présence notable de formations perméables (calcaires, dolomites ou alluvions etc.....) contribue, de pair avec les facteurs morphologiques défavorables, à limiter les possibilités de l'écoulement de surface.

C.II - Les paramètres hydrologiques du bassin versant SIKKAK

C.II.2- Précipitations et régime thermique

D'un climat méditerranéen semi-aride, et à l'instar des sous bassins du nord-ouest algérien, le bassin Oued Sikkak a connu une variation temporelle accentuée de la pluviométrie depuis les années 1974. La moyenne interannuelle enregistrée en considérant l'influence des trois stations de mesures (Henaya, Tlemcen, Lala setti et Mefrouche) est de 491.5 mm

Une variation spatiale qui se traduit par une augmentation des pluies de Nord vers le Sud et de l'Ouest en Est, il est à noter que la précipitation moyenne annuelle au niveau du bassin est évaluée à 491,5 mm pour la période d'observation allant de 1974/75 à 2009/10, on voit que notre région est située dans une région semi - aride avec une précipitation moyenne de 391 mm à Hennaya et 509 mm à Mefrouche.

Une variation temporelle qui se traduit par l'existence de deux périodes, l'une humide et fraîche (données anciennes : 1913/38), l'autre plus sèche et plus chaude (1970/98). Ceci nous permet d'insister sur le fait qu'une série de 30 années de données pluviométriques est insuffisante pour caractériser statistiquement la variable pluie. (Bouanani et al, 2003).

Durant la période 1974 – 2010, la variabilité interannuelle des modules pluviométriques ($0,26 < C_v < 0,34$) est moins marquée que la variabilité mensuelle. Les séries pluviométriques de stations étudiées 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 de la Tafna.

La variabilité mensuelle des précipitations avec des coefficients de variation élevés fait ressortir deux périodes distinctes : une humide qui s'étale de septembre à mai et une autre sèche de juin à août. Le maximum saisonnier se situe en hiver (168 mm) suivi par un maximum secondaire (153mm) au printemps. En outre l'automne est lui aussi relativement pluvieux avec 111 mm en moyenne. Les séries pluviométriques des quatre stations s'ajustent en général à une loi normale de Gauss.

Le régime thermique est caractérisé par des températures moyennes annuelles comprises entre 15° et 18°C, avec des amplitudes annuelles assez fortes équivalentes aux températures annuels. Ceci permet d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration, le tarissement des cours d'eau, l'assèchement rapide des sols, la dégradation du couvert végétal et ainsi le développement d'érosion intense et la production de sédiment pour de transport solide.

C.II.2- Ecoulements superficiels

En dépit de données de débits parfois fragmentaires, nous avons pu néanmoins, dégager les grands traits du régime d'écoulement de notre bassin.

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.

C.III – Le transport solide

Sur la base des mesures continues de la charge en suspension réalisées dans le bassin versant SIKKAK (1972/73 – 2009/10), nous avons calculé les différentes valeurs des paramètres de l'écoulement liquide et du transport solide.

En effet, la dégradation spécifique moyenne est de 182,32 t/km²/an. Toutefois, si on regarde la variabilité interannuelle de ce phénomène, on constate que la dégradation spécifique varie considérablement. Ainsi on passe de 1,5 t/km²/an à 1271,29 t/km²/an.

A l'échelle saisonnière, c'est au printemps que le phénomène est plus accentué avec 0,607 MT, en deuxième position, on trouve l'hiver avec 0,553 MT. Ces résultats sont estimés pour toute la période d'étude. L'été reste une saison sèche avec un transport quasi nul.

C.IV – L'érosion

La quantification des pertes en terre se fait par le biais des modèles de perte en sol. Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle (USLE).

L'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique nous a permis de modéliser le phénomène de l'érosion à l'échelle du bassin versant SIKKAK. Cette modélisation a été faite sur la base des unités de taille égale à la résolution définie par les documents utilisés.

L'évaluation des pertes en sol a permis de mettre en évidence une classification des surfaces en fonction de l'importance de risque à l'érosion. Le zonage de cette cartographie, en particulier celle des surfaces de plus forts taux d'érosion, facilitera les décisions d'intervention ainsi que le choix et la planification des mesures de conservation.

La technique utilisée permet l'évaluation rapide de l'érosion nette à l'échelle du bassin et l'identification des secteurs qui nécessitent des interventions pour lutter contre la dégradation des sols.

La carte d'érosion des versants réalisée fournit de nombreuses informations concernant le potentiel de production de sédiments par l'érosion des versants et la localisation des zones sources exprimées en (t/ha/an). Les valeurs du taux de l'érosion potentielle obtenues à l'échelle du bassin ont ensuite été regroupées suivant des classes entre 0 t/ha/an et 7,5 t/ha/an. L'évaluation a donné une moyenne de 287 t/km²/an.

C.V – Comparaison

Afin de mettre en lumière les taux de dégradation du sol par le modèle USLE et du transport solide à l'échelle du bassin versant, on conclue que 63,5 % des pertes en terre atteignent le réseau hydrographique. Soit 1,506 MT de sédiments sont transportés par l'oued Sikkak sur 2,370 MT des pertes en terre estimées par le modèle USLE pour une période de 38 ans.

Ces premiers résultats permettent de mettre en évidence les zones les plus sensibles à l'érosion, il est donc possible d'établir à partir de celles-ci des mesures de gestion pour les zones les plus fragiles menacées par l'érosion. En perspective, il serait possible d'envisager un suivi des dynamiques d'occupation du sol, et d'apporter une meilleure description des facteurs C, K et LS afin d'affiner l'estimation des pertes de sols. Dans ce contexte, nous recommandons une étude qui vise à mettre à jour les données d'occupation du sol via l'imagerie satellitaire.

LES REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Achite M., Touaibia B. et Ouillon S., 2006. Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives, 14th International Soil Conservation Organization Conference, Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 ISCO 2006, 6 p.

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 p.

Ammari, A., 2012, Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois), Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider. Biskra, 172 p.

B

Baba Hamed, K., 2001. Contribution à l'étude hydrologique de trois sous-bassins de la Tafna (bassin de Sebdou, de Mouilah et d'Isser). Thèse de Magister. Univ. Oran. 195 p.

Baghdadi D., Hartani A., Amoukrane F., Chouieb M. et Aïbout F., 2011. Analyse Spatiale de l'érosion hydrique en zone semi-aride cas du sous bassin versant de l'Oued Mina, Algérie Nord-Ouest, Programmes Nationaux de Recherche 2011-2014 , Développement des Régions Arides , 345 p.

Bannari A., Haboudane D. et Bonn F., 1999. Potentiel des mesures multi spectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents", 21st Canadian Symposium on Remote Sensing (June 1999, Ottawa, Ontario, Canada), Université d'Ottawa, Canada, 359-366 p.

Barguaoui, M. et Alouini, A., 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie, Revue scientifique, IRESA, 30, Tunisie. 13 p.

Belagoune, F., 2012. Etude et modélisation des crues des cours d'eau en milieu semi-aride : cas des grands bassins versants 05, 06 et 07. Thèse de Magistère, Univ. D'Ouargla, 181 p.

Bello, N.J., 1998. Evidence of climate change based on rainfall records in Nigeria. Weather, Publ, Department of Agrometeorology and Water Management, University of Agriculture, PMB 2240, Abeokuta, Nigeria, 412-418 p.

Benest, M. et Bensalah, M., 1999. La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine Tlemcenien (Avant-Pays Tellien d'Algérie Occidentale) : stratigraphie, paléo environnements, dynamique sédimentaires et tectogenèse alpine. Bull. Serv. Géol. Algérie, Vol. 10, n° 2.

Benest, M., 1985. Evolution de la plate-forme de l'Ouest Algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt, Documents des laboratoires de géologie. Lyon, 0750-6635 ; no 95, 497-518 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). 144-153 p.

Ben Khaled L., Gomez A., Honrubia M., Oihabi A., 2003. Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le Rhizobium, Agronomie, EDP Sciences, 2003, 23 (7), 553-560 p.

Berrezoug, T. et Kissi, S., 2002. La protection du futur – Barrage « Sikkak » contre la pollution et l'envasement. Mém, Ing, Hydraulique, Univ Tlemcen. 107 p.

Bontron et Obled, 2003. Prédiction à moyenne échéance des pluies intenses en zone méditerranéenne par recherche de situations analogues. IAHS publ.

Bouanani A. & al, 2003. Variations climatiques et conséquences hydrologiques :cas du bassin versant de la Tafna (NW Algérie), Conférence internationale "Hydrologie des régions méditerranéennes et semi arides". Montpellier, 1-4 avril 2003.

Bouanani, A., 2004. : Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW— Algérie), Thèse de doctorat en hydraulique appliqué, Univ.Tlemcen, 225 p.

Bouanani, A., Baba-Hamed, K. et Fandi, W., 2013. Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie), Revue des sciences de l'eau. 120-132 p.

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 p.

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, 5-11 p.

Branly, N., 2012. Contribution à l'étude de variation des débits du bassin du fleuve Congo. Cas du bassin versant du Kasaà, Mém. Ingénieur, Univ. Kinshasa, 2012. 52 p.

Bravard, J.P. et Petit, F., 2002. Les cours d'eaux «Dynamique du système Fluviale », Edition Armand Colin, Paris, France.

C

Carbonnel, J.P. et Hubert P., 1994. Etude statistique de quelques série pluviométriques bulgares et roumaines ; incidences sur l'évolution climatique récente. Romanian Journal of Hydrology and water resources, 1 : 107-113 p.

Chebanni R., Djilli K., Roose E., 1997. Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser (Tlemcen), Article, 1ères journées d'étude sur les agricultures de montagne, Mascara, Algérie.

Cheggour, 2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc, Doctorat, Spécialité : Géologie Option : Hydrologie, sciences du sol et environnement (2008).

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, 85-95 p.

Cosandey, C. et Robinson, M., 2000. Hydrologie continentale, Edition Armand Colin, Paris.

Cosandey, C., 2003. Les eaux courantes, Editions Belin, Collection Géographie, Paris.

Cros-Cayot, S., 1996. Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte Armoricaïn. Thèse de L'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 218 p.

Cyr L., Bonn F. et Pesant A., 1995, Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. *Ecol. Modelling* 79, 277-285 p.

D

Dekiche, A., 1993. Etude statistique multidimensionnelle du régime pluviométrique et des crues application au bassin versant de la Tafna. Rapp. ANRH. (Inédit). juin 1993.

Demmak, A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Ing, Univ. Paris, France.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P., 2007. De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle d'un bassin versant. Actes du colloque international de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'2007, Clermont-Ferrand, 16 p.

E

Etchanchu D., Bropst J.L., 1986. Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure de ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 302, série II, n°17, 1063-1067 p.

El Garouani A., Merzouk A. et Ozer.A, 2003. Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Régions, Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003. IAHS Publ. no. 278. 2003.

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A. et Abahrour M., 2007. Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc), Publ , Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007.

El Garouani A., Merzouk A., Hinaje S., Jabrane R. et Boussema M.R., 2001. Identification des géorisques par télédétection : érosion des sols et glissement des terrains au pré-Rif marneux (Maroc), Publ, Les Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie (Yaounde, Cameroun, 29 novembre-2 décembre 2001). Ecole National Supérieure Polytechnique.

Estienne, P. et Godard, A., 1970. Climatologie, librairie Armand Colin. Edité par Armand Colin 1982. Paris. France.1982.

F

Fandi, W., 2011. Caractérisation des écoulements dans un bassin versant par l'étude des évènements : Cas du bassin versant de Sikkak (N-W Algérie), Thèse de Magister, Univ. Tlemcen, pp. 253 p.

FAO, 1990. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Bulletin Pédologique no. 57, FAO, Rome, Italy.

FAO, 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique no. 70, FAO, Rome, Italy.

Farhan Y., Zreqat D., et Farhan I., 2013. Spatial Estimation of Soil Erosion Risk Using RUSLE Approach, RS and GIS Techniques : A Case Study of Kufranja Watershed, Northern Jordan. Journal of Water Resources and Protection, 5, 1247-1261 p.

Fox, H.R., Moore, H.M., 1993. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Discussion. Hydrol. Sci. J., 38, 621-637 p.

Fem et Fida, 2002. S'attaquer à la dégradation et à la désertification des terres, Publ. Edition GMS GRAFICHE, Rome.

Fitzpatrick, E.A., 1983. Soils. Their formation, classification and distribution. Longman, London & New York, 353 p.

Fox, H.R., Moore, H.M., 1993. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Discussion. Hydrol. Sci. J., 38, 621-637.

Frey, P., 1991. Etude expérimentale et simulation numérique du transport turbulent de particules solides dans un décanteur, Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon. 162 p.

G

Gestion intégrée des crues, 2006. : Aspects sociaux et participation des parties prenantes, politiques de gestion des crues, Programme associé de gestion des crues OMM - N° 1008, Genève, Suisse Août 2006. 87 p.

Ghenim A.N., Terfous A. et Seddini A., 2007. Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin-versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien), Article scientifique. Sécheresse 2007 ; 18 (1), 39-44 p.

Ghenim, A., 2001. Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas d'oued Isser, oued mouilah et de la Haute tafna. Thèse de Magister, Univ. Tlemcen. 336 p.

Ghenim, A.N., 2008. Etude des écoulements et du transport solide dans les régions semi-aride méditerranéennes, Thèse de doctorat, Univ. Tlemcen, 38 p.

Ghorbal, A. et Claude J., 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie : estimation des transports solides. Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters. (Proc Paris Symp, jully 1977), I.A.H.S. Bull, n° 122, 232 p.

Gilroy E.J., Kirkby W.H., Cohn T.A. et Glysson G.D., 1990. Uncertainty in suspended sediment transport curves, discussion. Journal of Hydraulic Engineering, 116 (1) : 145 p.

H

Hauchard, E., 2001. De la dynamique non linéaire à la dynamique du relief en géomorphologie, Application aux bassins versants de la marge Nord-occidentale du Bassin de Paris, Thèse de Doctorat, MTG, Université de Rouen, 3 Volumes, 2001, 730 p.

Hayane, S.M., 1983. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen). Thèse Doc. 3e cycle.Univ.Oran1983, 236 p.

Horton, R.E., 1945. "Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology". Bulletin of the Geological Society of America, vol. 56, 554 p.

K

Kessel, C., 2015. Pratiques de gestion optimale : lutte contre l'érosion du sol à la ferme, Gouvernement de l'Ontario, (Article).

Khaldi, A., 2005. Impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaire de l'Ouest Algérien "Monts de Tlemcen- Saida". Thèse doctorat d'Etat, Univ. Oran, 229 p.

King, D. et Le Bissonais, Y., 1992. Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe . C.R. Académie Agriculture Fr., 78, n°6, 105 p.

L

Lambert, R., 1996. Géographie du cycle de l'eau, Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse.

Laouina A., Chaker M., Naciri R. et Nafaa R., 1993. L'érosion anthropique en pays méditerranéen. Le cas du Maroc septentrional. Bull. Ass. Géogr Français, Paris, 398 p.

Laouina, A., 1998. Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. Bull. Réseau Erosion, 18, 53 p.

Lawani, A.M., 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données, doctorat en Science de l'Eau dans l'Environnement Continental de l'université montpellier.

Ludwig, B., 1992. L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien: analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg I, 201 p.

M

Meddi H., 1993. Étude du transport solide dans le bassin-versant de Kebir Rhumel. Mémoire de fin d'études, Institut de génie rural, université de Blida, 1993.

Meddi M., Khaldi A. et Meddi H.,1998. Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord , Institut d'Hydraulique, Université de Mascara, BP 763, 29000 Mascara, Algérie, 397 p.

BRGM , 1996. Trasport solide : modèle et conditiond d'application dans la région PACA , L'entreprise de services de la terre ,Rapp.Document public ,Drire provenance .Alpes. Coté d'azur (France), Décembre 1996, 38 p.

Markhi A., Laftouhi N., Soulaïmani A. et Fniguire F., 2015. Quantification et evaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle rusle et déposition intégrés dans un sig. application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de marrakech (maroc) European Scientific Journal October 2015 edition vol.11, No.29, 350 p.

Merzouk, A. et Blake, G., 1991. Indices for the estimation of interrill erodibiitiy of Moroccan soils. Catena 18.

Moore, I.D. et Burch, G.J., 1986. Physical Basis of the Length Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. Soil Science Society of America, 50, 1298 p.

Malavoi J.R., 2011. Le transport solide en rivière : Fonctionnement, dysfonctionnements, principes de gestion, Seminaire technique, Jeudi 24 novembre 2011 à Vierzon (18), Pole hydro-écologie cours d'eau.

P

Probst J.L., Amiotte suchet P., 1992. Fluvial suspended sédiment transport and mechanical érosion in the Maghreb (North Africa). Hydrol. Sci. J., 37, 621- 637 p.

Probst J.L., Bazerbachi A. 1986. Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol., Bull., 39,1 : 79-98.

Pardé M., 1963. L'hydrologie de l'ingénieur de G. Remanieras. In : *Annales de Géographie*, t. 72, n°390, 1963, 206-214 p.

R

Remini, B., 1999. Les conséquences de l'envasement des barrages : quelques exemples Algériens. Revue Techniques Sciences Méthodes. 4, 55-62 p.

Roche, M., 1963. Hydrologie de surface. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, Paris, Gauthier – Villars, N° d'Édition : 1097.

Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, Bulletin pédologique de la FAO, 70 p.

Roose, E., Chibbani, R., Bourougaa, L., 1999. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Bull. ORSTOM, Rés. Eros., 19.

S

Snoussi, M., Jouanneau, J.M., Latouche, C., 1990. Flux de Matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebou et du Souss, Maroc). Importance dans le bilan global des apports d'origine continentale parvenant à l'Océan Mondial. J. Afric. Earth Sci. 11, 43-54 p.

Seltzer, P., 1946. Le climat de l'Algérie. Inst. Météo. Et de Phys. Du globe. Univ. Alger (Algérie), 219 p.

Stone, R.P. et Hilborn, D., Mai 2000. Equation universelle des pertes en terre (usle), Ministère d'agriculture et d'alimentation et des affaires rurales, Gouvernement de l'Ontario, Fiche technique. Commande n° 00-002.

T

Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani A., 2001. Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Rev. Sci. Eau, 14, 175-185 p.

Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani A., 2003. Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes. IAHS pub. N° 278, 366-372 p.

Tardy, Y. et Probst J.L., 1992. Crises climatiques et oscillations télé connectées du climat depuis cent ans. Sécheresse, 3 : 25-26 p.

Touaïbia.B, 2000, Erosion, transport solide, envasement de barrage. Cas du bassin versant de l'Oued Mina dans la Wilaya de Relizane. Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques, El-Harrach, Alger (Algérie).

Tourki, M., 2010. Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est Nord-Est Algérien, Thèse de Magister, Univ. Badji mokhtar. Annaba, 137 p.

V

Veltri M., Veltri P. et Maiolo M., 1996. On the fractal dimension of natural channel network. Journal of Hydrology, vol. 187, 137-144 p.

W

Wischmeier, W.H. et Smith, D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning, USDA Science and Education Administration, Hyattsville, Maryland, USA. 62 p.

Wood, P.A., 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England. Sedimentology 24: 437-445 p.

Willams, G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers. J. Hydrol., 111: 89-106 p.

REFERENCES WEB

[1] : Référence WEB :

<http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/Chap1-sommaire.html> : consulté le 02/06/2017

[2] : Référence WEB :

<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0203/travaux/optsee/bei/2/projet/indextec2.html> : consulté le : 08/06/2017

NOTATION ET **ABREVIATIONS**

NOTATION ET ABREVIATIONS

I- NOTATIONS

$A_{(USLE)}$: Perte en terre	L : longueur
A_l : Débit liquide	L_e : Lamme d'eau écoulée
A_s : Apport solide	LP : Longueur de pente
A_{ss} : Apport solide spécifique	$LS_{(USLE)}$: Facteur topographique
C : Concentration	m : mètre
$C_{(USLE)}$: Facteur de protection du sol	MJ : Mega joule
C_p : Coefficient Pluviométrique	MT : Million de tonnes
C_T : Coefficient de Torrentialité	N : Taille d'échantillon
C_v : Coefficient de Variation	P : périmètre
D_d : densité de Drainage	P : Précipitations
D_s : Dégradation spécifique	$P_{(USLE)}$: Facteur de protection du sol par les pratiques anti-érosive.
D_s : Dénivelé spécifique	P_{24} : Moyenne des pluies maximales en 24 h.
f : fréquence	P_m : Précipitation minimum
F_s : Fréquence des Cours d'eaux	PM : Précipitations Maximum
H : Altitude	Q : débit
H_m : Dénivelée moyenne	Q_l : Débit liquide
H_a : Hectar	Q_m : Débit Moyen
I_g : Indice de pente globale	Q_s : Débit solide
Il : Indice lithologique	Q_{ss} : Débit solide en suspension
I_p : Indice de pente de Roche	r : Coefficient de corrélation
IP : Indice pluviométrique	$R_{(USLE)}$: Erosivité des pluies
$K_{(USLE)}$: Erodabilité du sol	R_c : Rapport de Confluence
K_c : indice de compacité de Gravelius	R_{ci} : Coefficient de Circularité
K_m : kilomètre	R_L : Rapport des Longueurs
l : largeur	

S : surface

χ^2 : Test de Khi deux

S : superficie

σ^2 : Variance

T : Température

σ : Ecart Type

T : Tonne

T_C : Temps de Concentration

α : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol

II-ABREVIATIONS

ANRH : Agence National des ressources hydriques.

BV : Bassin versant.

CMD : Coefficient mensul de débit.

EUPT: Equation universale de perte en terre.

FAO: L'organisation de l'agriculture et de l'alimentation.

GIS : Geographic international system.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

USLE: Universal soil loss equation

ANNEXES

VALEURS DES PRECIPITATIONS OBSERVEES PAR ORDRE CROISSANT

Station de Mefrouche (1943 – 2015)

Mefrouche (1943 -2015)	rang	f	u
211,8	1	0,0068	-2,47
248,8	2	0,0205	-2,04
340,5	3	0,0342	-1,82
342,4	4	0,0479	-1,67
346,8	5	0,0616	-1,54
352,2	6	0,0753	-1,44
382,7	7	0,0890	-1,35
392,7	8	0,1027	-1,27
392,7	9	0,1164	-1,19
426,3	10	0,1301	-1,13
431,4	11	0,1438	-1,06
444,8	12	0,1575	-1,00
447,6	13	0,1712	-0,95
448,6	14	0,1849	-0,90
450,2	15	0,1986	-0,85
453	16	0,2123	-0,80
463,1	17	0,2260	-0,75
467,6	18	0,2397	-0,71
474,6	19	0,2534	-0,66
480,5	20	0,2671	-0,62
518,4	21	0,2808	-0,58
522,2	22	0,2945	-0,54
525,6	23	0,3082	-0,50
531,3	24	0,3219	-0,46
560,2	25	0,3356	-0,42
562,5	26	0,3493	-0,39
564,4	27	0,3630	-0,35
567	28	0,3767	-0,31
567,5	29	0,3904	-0,28
577,5	30	0,4041	-0,24
580,9	31	0,4178	-0,21
581,9	32	0,4315	-0,17
583,8	33	0,4452	-0,14
614,5	34	0,4589	-0,10
631,1	35	0,4726	-0,07

639,9	36	0,4863	-0,03
640,9	37	0,5000	0,00
661,3	38	0,5137	0,03
661,5	39	0,5274	0,07
667,7	40	0,5411	0,10
671	41	0,5548	0,14
677,9	42	0,5685	0,17
684	43	0,5822	0,21
687,8	44	0,5959	0,24
693,5	45	0,6096	0,28
696,5	46	0,6233	0,31
726	47	0,6370	0,35
727,6	48	0,6507	0,39
729,9	49	0,6644	0,42
731,2	50	0,6781	0,46
731,2	51	0,6918	0,50
750,2	52	0,7055	0,54
758	53	0,7192	0,58
766,7	54	0,7329	0,62
797	55	0,7466	0,66
832,5	56	0,7603	0,71
835,3	57	0,7740	0,75
841	58	0,7877	0,80
845,3	59	0,8014	0,85
869,2	60	0,8151	0,90
875,7	61	0,8288	0,95
877,8	62	0,8425	1,00
896,3	63	0,8562	1,06
928,5	64	0,8699	1,13
932	65	0,8836	1,19
944,7	66	0,8973	1,27
947,1	67	0,9110	1,35
949,7	68	0,9247	1,44
950	69	0,9384	1,54
968	70	0,9521	1,67
976,2	71	0,9658	1,82
1062,4	72	0,9795	2,04
1144,9	73	0,9932	2,47

Station de Lala Setti (1956-2010)

Lala Setti (1956 -2010)	Rang	f	u
269,1	1	0,00943396	-2,3481302

325,6	2	0,02830189	-1,906358
333	3	0,04716981	-1,67293739
341,8	4	0,06603774	-1,50596768
343,5	5	0,08490566	-1,37281032
347,5	6	0,10377358	-1,2603388
366,6	7	0,12264151	-1,16188294
386,5	8	0,14150943	-1,07356238
388	9	0,16037736	-0,99290815
400,4	10	0,17924528	-0,91824509
410,3	11	0,19811321	-0,84837993
411,1	12	0,21698113	-0,7824294
416,6	13	0,23584906	-0,71971886
419,3	14	0,25471698	-0,65971933
427,2	15	0,27358491	-0,6020065
442,9	16	0,29245283	-0,54623318
458,9	17	0,31132075	-0,4921101
473,9	18	0,33018868	-0,43939223
500,1	19	0,3490566	-0,38786869
508	20	0,36792453	-0,33735533
513,6	21	0,38679245	-0,28768888
514,3	22	0,40566038	-0,23872252
536,3	23	0,4245283	-0,19032227
544	24	0,44339623	-0,14236406
544,3	25	0,46226415	-0,09473124
544,6	26	0,48113208	-0,04731252
572,5	27	0,5	0
574	28	0,51886792	0,04731252
580,5	29	0,53773585	0,09473124
581,3	30	0,55660377	0,14236406
588,6	31	0,5754717	0,19032227
655,8	32	0,59433962	0,23872252
656,3	33	0,61320755	0,28768888
656,6	34	0,63207547	0,33735533
659,4	35	0,6509434	0,38786869
665,4	36	0,66981132	0,43939223
676,1	37	0,68867925	0,4921101
681	38	0,70754717	0,54623318
685,6	39	0,72641509	0,6020065
688,5	40	0,74528302	0,65971933
695,8	41	0,76415094	0,71971886
702,3	42	0,78301887	0,7824294
735,4	43	0,80188679	0,84837993
770,4	44	0,82075472	0,91824509
781,6	45	0,83962264	0,99290815

784,1	46	0,85849057	1,07356238
835	47	0,87735849	1,16188294
835	48	0,89622642	1,2603388
841,4	49	0,91509434	1,37281032
870,5	50	0,93396226	1,50596768
905,5	51	0,95283019	1,67293739
930,6	52	0,97169811	1,906358
973,1	53	0,99056604	2,3481302

Station de Tlemcen (1964-2010)

Tlemcen (1964 -2010)	Rang	f	u
310,7	1	0,0106383	-2,30303994
315,2	2	0,03191489	-1,85336691
332,1	3	0,05319149	-1,6146663
338,8	4	0,07446809	-1,44329932
362,2	5	0,09574468	-1,30618586
373,1	6	0,11702128	-1,19000977
374,7	7	0,13829787	-1,08799856
374,8	8	0,15957447	-0,99620832
374,9	9	0,18085106	-0,9121265
376,3	10	0,20212766	-0,83404555
394,1	11	0,22340426	-0,76074647
442	12	0,24468085	-0,6913244
453,4	13	0,26595745	-0,62508558
459,2	14	0,28723404	-0,56148334
459,5	15	0,30851064	-0,50007641
461,3	16	0,32978723	-0,44050075
465,1	17	0,35106383	-0,38244993
474,5	18	0,37234043	-0,325661
474,6	19	0,39361702	-0,26990409
493,9	20	0,41489362	-0,21497446
497,2	21	0,43617021	-0,16068637
499,7	22	0,45744681	-0,1068681
505,8	23	0,4787234	-0,05335782
523,5	24	0,5	0
528,2	25	0,5212766	0,05335782

546,9	26	0,54255319	0,1068681
555,6	27	0,56382979	0,16068637
577,6	28	0,58510638	0,21497446
584,7	29	0,60638298	0,26990409
587,9	30	0,62765957	0,325661
592,5	31	0,64893617	0,38244993
606,3	32	0,67021277	0,44050075
611,6	33	0,69148936	0,50007641
614	34	0,71276596	0,56148334
616,2	35	0,73404255	0,62508558
637,3	36	0,75531915	0,6913244
638,5	37	0,77659574	0,76074647
649,2	38	0,79787234	0,83404555
650,5	39	0,81914894	0,9121265
660,2	40	0,84042553	0,99620832
683,6	41	0,86170213	1,08799856
725,5	42	0,88297872	1,19000977
768,4	43	0,90425532	1,30618586
793,2	44	0,92553191	1,44329932
813,5	45	0,94680851	1,6146663
814,7	46	0,96808511	1,85336691
817,3	47	0,9893617	2,30303994

Station de Hennaya (1974-2012)

Hennaya (1974-2012)	Rang	f	u
119,41	1	0,01282051	-2,23160584
142,2	2	0,03846154	-1,76882504
226,4	3	0,06410256	-1,52121805
255,1	4	0,08974359	-1,34233568
278,1	5	0,11538462	-1,1983797
280,9	6	0,14102564	-1,07572272
297	7	0,16666667	-0,96742157
299,6	8	0,19230769	-0,86942377
307,1	9	0,21794872	-0,77913968
321,9	10	0,24358974	-0,69480185
330,6	11	0,26923077	-0,6151411
333,7	12	0,29487179	-0,53920764
333,9	13	0,32051282	-0,46626526

339,1	14	0,34615385	-0,3957253
339,3	15	0,37179487	-0,32710332
352,5	16	0,3974359	-0,2599896
382,4	17	0,42307692	-0,19402814
384,6	18	0,44871795	-0,12890111
391,3	19	0,47435897	-0,06431684
392,3	20	0,5	0
394,6	21	0,52564103	0,06431684
411,2	22	0,55128205	0,12890111
416,6	23	0,57692308	0,19402814
424,5	24	0,6025641	0,2599896
433,3	25	0,62820513	0,32710332
438,9	26	0,65384615	0,3957253
458	27	0,67948718	0,46626526
458,4	28	0,70512821	0,53920764
464,7	29	0,73076923	0,6151411
471,7	30	0,75641026	0,69480185
472,9	31	0,78205128	0,77913968
474,4	32	0,80769231	0,86942377
498,4	33	0,83333333	0,96742157
499,5	34	0,85897436	1,07572272
541,18	35	0,88461538	1,1983797
552	36	0,91025641	1,34233568
558,4	37	0,93589744	1,52121805
560,2	38	0,96153846	1,76882504
602,2	39	0,98717949	2,23160584

