

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l' Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Faculté des sciences et technologie



كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Génie civil et Hydraulique
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Thème

**Applicabilité d'un modèle statistique à
l'évaluation de transport sédimentaire
dans le Nord Est Algérien**

Présenté par :

ABDENNEBI Aboubaker Essedik

TOUAITI Abdennour

promoteur :

Dr : GUIDOUM Azzedine

Devant le jury composé de :

Boulmaiz Tayeb

Amieur Rekia

président du jury

Examinatrice

Résumé

Notre étude porte sur le transport solide en suspension pour quatre bassins versant situés dans le Nord-est algérien. Ces bassins s'étendent sur des superficies comprises entre 144 et 2083 km² et peuvent être considérés comme représentatifs des conditions physiques et climatiques du nord-est algérien. Après la présentation de l'état de l'art et de connaissances en matière d'érosion hydrique et de transport solide, une analyse préalable de l'ensemble des paramètres physico-géographiques des bassins versants sélectionnés a été effectué. Ensuite le processus de transport solide en suspension a fait l'objet d'une analyse approfondie. Ce Ci à travers la mise en évidence de relations statistiques entre les débits solides et les débits liquides. Cette analyse est fondée sur le traitement statistique des données hydrométriques et des concentrations des sédiments en suspension.

Mots clés : transport solide, concentration, modèle régressif, bassin versant, Algérie

Abstract

Our study focuses on the suspended sediment transport for four watersheds located in the Northeastern Algeria. These watersheds extend over areas between 144 and 2083 km², and may be considered representative of the physical and climatic conditions of northeast Algeria. After the state of the art and knowledge presentation of water erosion and sediment transport, a preliminary analysis of all the physic-geographic parameters of the selected watersheds, was carried out. Then the process of suspended sediment transport in suspension was subjected to detailed analysis. This through the identification of statistical relationships between suspended sediment flows and liquid flows.

Keywords: sediment transport, concentration, regressive model, watershed, Algeria

ملخص

دراستنا هذه تخص الحمولة الصلبة العالقة لأربعة أحواض تجميعية واقعة في شمال شرق الجزائر. حيث تمتد على مساحات تتراوح بين 144 و 2083 كم² ويمكن اعتبارها ممثلة للظروف الفيزيائية والمناخية للشمال الشرقي الجزائري. بعد تقديم لمحة عما تم التوصل إليه في مجال التعرية المائية والنقل الصلب لمياه الأودية، قمنا بإجراء تحليل أولي لجميع المعلمات الفيزيوجغرافية للأحواض التجميعية المختارة. بعد ذلك كانت ظاهرة النقل الصلب للمواد العالقة موضوع تحليل معمق وهذا من خلال تبيين العلاقات الإحصائية بين التدفقات الصلبة والتدفقات السائلة بالاعتماد على المعالجة الإحصائية للبيانات الهيدرومترية وتركيزات الرواسب العالقة في مياه الأودية.

الكلمات المفتاحية: النقل الصلب، التركيز، النموذج الإحصائي، الحوض التجميعي، الجزائر

Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe de respect et de reconnaissance envers :

Mes Parents

Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse.

Je le dédie également à

Mes frères et mes sœurs

Ma marie et mon fils mohammed zinelabidine

Mes amis

En un mot, à toute la famille TOUATI , mes amis et ceux qui ont contribué de près de loin à ma formation

Abdennour

Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe de respect et de reconnaissance envers :

Mes Parents

Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse.

Je le dédie également à

Mes frères et mes sœurs

Mes amis

En un mot, à toute la famille ABDEENNEBI , mes amis et ceux qui ont contribué de près de loin à ma formation.

Aboubaker Essedik

Remerciements

- ❖ *Nous commençons par remercier dieu le tout puissant de nous avoir réalisé ce modeste travail.*
- ❖ *A notre promoteur Mr. GUIDOUM Azzedine pour ses orientations et ses précieux conseils.*
- ❖ *A tous les enseignants et le personnel du département de l'hydraulique et génie civil qui ont contribués de près ou de loin à notre formation.*
- ❖ *Aux membres de jury qui auront à juger et approuver ce travail*
- ❖ *Nous tenons aussi à remercier nos amis qui nous ont aidés pendant la réalisation de ce travail*

Abdenneou et Aboubakour Essedik

Sommaire

| | |
|---|----|
| Résumé..... | I |
| Liste des figures..... | |
| Liste des tableaux..... | |
| Tables de matières..... | |
| Introduction..... | I |
| Chapitre I :Processus du transport solide | |
| I-1 Le transport solide..... | 02 |
| I-1-1 Régime de transport..... | 02 |
| I-1-1-1Le charriage (bed load)..... | 03 |
| I-1-1-2La suspension (suspended load)..... | 03 |
| I-1-1-3la saltation..... | 04 |
| I-2 Prédiction de l'érosion hydrique et du transport solide..... | 04 |
| I-2-1 Estimation des pertes en terre à l'aide du modèle de Wischmeier..... | 05 |
| I-2-1 1Principe..... | 05 |
| I-2-1-2 Intérêt et limites de l'USLE..... | 06 |
| .. Intérêts..... | 07 |
| . Limites..... | 07 |
| I-2-3 Evaluation du transport solide avec les donnéesde mesures..... | 08 |
| I-2-3-1Méthode basée sur la mesure du taux de remplissage des retenues..... | 08 |
| I-2-3-2 Méthode basée sur la mesure de la concentration..... | 09 |
| . Mesure par prélèvementponctuel–pesée..... | 09 |
| . Mesure optique (turbidité)..... | 11 |
| . Mesure acoustique..... | 11 |
| . Limites des méthodes et incertitudes de mesures..... | 12 |
| . Extrapolation des mesures : corrélation et régression..... | 13 |
| . Quantification des apports solides : techniques d'interpolation et d'extrapolation..... | 14 |
| I-2-3-3 La mesure des transports de fond..... | 16 |
| I-3 Ampleur de l'érosion en en Algérie..... | 19 |
| I-4 Quelques données chiffrées sur l'érosion et le transport solide en Algérie..... | 20 |
| I-5 Énonce de quelques études faites sur l'érosion et le transport solide en Algérie..... | 23 |
| I-6 Conclusion | 26 |
| Chapitre II : Généralités sur les bassins versants étudiés | |
| II.1. Présentation des bassins versants..... | 28 |
| II.2 Relief et Morphométrie..... | 28 |
| II.3.Réseau hydrographique | 31 |
| II-3-1 Le bassin de l'Oued Bouhamdene..... | 32 |
| II-3-2 Le bassin de l'Oued El Gueiss..... | 33 |
| II-3-3 Le bassin de l'Oued El Arab..... | 34 |
| II-3-4 Le bassin de l'Oued El Hai..... | 35 |
| II.4 Caractéristiques climatiques..... | 35 |
| II.4. 1 La pluviométrie..... | 36 |
| II.4. 2 Les autres paramètres climatiques..... | 45 |
| II.5 végétation..... | 48 |
| II.5.1 le bassin de l'Oued Bouhamdane..... | 49 |
| II.5.2 le bassin de l'Oued El Gueiss..... | 49 |
| II.5.3 le bassin de l'Oued El Arab..... | 49 |

| | |
|--|----|
| II.5.4 le bassin de l'Oued El Hai..... | 50 |
| II.6 Description lithologique..... | 50 |
| II.6 1le bassin de l'Oued Bouhamdane..... | 50 |
| II.6 2le bassin de l'Oued El Gueiss..... | 51 |
| II.6 3le bassin de l'Oued El Arab..... | 52 |
| II.6 4le bassin de l'Oued El Hai..... | 53 |
| Conclusion..... | 55 |
| Chapitre III : Bilan et modélisation statistique du transport solide en suspension | |
| III.1 Mesures des transports solides en suspension en Algérie : Dispositifs et incertitudes | 57 |
| III.2 Qualité et fiabilité des données..... | 57 |
| III.3 Méthode opérationnelle pour l'évaluation de la charge solide (Méthode opérationnelle) | 59 |
| III.4 Modélisation statistique : Concentrations – débits liquides instantanés..... | 61 |
| III.5 Bilan du transport solide en suspension des bassins versants étudiés..... | 65 |
| III.5 -1Evaluation des résultats de la modélisation statistique..... | 65 |
| III.5 -2 Les valeurs annuelles moyennes et leur variation spatiale..... | 65 |
| III.5 -3Les variations interannuelles de l'apport solide en suspension..... | 68 |
| III.5 -4Les variations saisonnières et mensuelles..... | 72 |
| III.5 -5La relation saisonnière entre le débit liquide et le débit solide..... | 73 |
| III.5 -6Les variations journalières et la contribution des crues dans le bilan annuel des apports solides..... | 76 |
| Conclusion..... | 79 |
| Conclusion générale | 81 |
| Références bibliographiques..... | 84 |

Listes Des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 01: les différents modes de transport solide | 3 |
| Figure 02 : Transport en charriage | 3 |
| Figure 03 :Transport en suspension | 4 |
| Figure 04 : Bouteille de prélèvements fixée sur une perche avec système d'ajustage..... | 10 |
| Figure 05 : Appareil de mesure de la charge en suspension | 10 |
| Figure 06 : Exemple de turbidités croissantes | 11 |
| Figure 07 :(a) Radeau dérivant équipé d'un hydrophone ; (b) Exemple de profil acoustique obtenu..... | 12 |
| Figure 08: Exemple de dispositif de mesure placé dans l'écoulement | 13 |
| Figure09 : un piègeage des sédiments dans l'appareil de mesure | 17 |
| Figure 10 : Exemple de sonde de turbidité Hach Lange..... | 17 |
| Figure 11:Nasse Type Helley-Smith..... | 18 |
| Figure 12 : Situation géographique de la zone d'étude | 28 |
| Figure 13 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued Bouhamdene | 32 |
| Figure 14 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued El Gueiss | 33 |
| Figure 15 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued El Arab | 34 |
| Figure 16 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued El Hai | 35 |
| Figure 17 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued Bouhamdane (1970-2004) | 37 |
| Figure 18 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued El Gueiss (1970-2004)..... | 38 |
| Figure 19 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued El Hai (1970-2004) | 39 |
| Figure 20 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued El Arab (1970-2004)..... | 41 |
| Figure 21 : Lithologie du bassin versant de l'Oued Bouhamdane..... | 51 |
| Figure 22 : Lithologie du bassin versant de l'Oued El Gueiss | 52 |
| Figure 23 : Lithologie du bassin versant de l'Oued El Arab | 53 |
| Figure 24 : Lithologie du bassin versant de l'Oued El Hai | 54 |
| Figure 25 : Exemples de variabilité des concentrations en MES à l'échelle de la crue | 58 |
| Figure 26 :Approche adoptée pour le calcul du débit solide moyen journalier..... | 59 |
| Figure 27 : Reconstitution du turbidigramme correspondant à la crue du 04/09/1972 à Kh Sidi Nadji..... | 60 |
| Figure 28 (a) : Recherche d'une relation saisonnière débit liquide-débit solide $Q_s=f(Q_l)$ | 62 |
| (Saisons : Automne et Hiver)..... | 62 |
| Figure 28(b) : Recherche d'une relation saisonnière débit liquide-débit solide $Q_s=f(Q_l)$ | 63 |
| (Saisons : Printemps et Eté) | 63 |
| Figure 29 (a) Variations interannuelles des débits solides, débits liquides et des concentrations en MES | 69 |
| Figure 29 (b) Variations interannuelles des débits solides, débits liquides et des concentrations en MES | 69 |
| Figure 30 : Dégradation spécifique moyenne annuelle en Tonnes/km ² | 71 |
| Figure 31 : Répartition mensuelle des Apports solides en % | 74 |
| Figure 32 : Relation concentration-débit liquide sur le Bouhamdane à Medjez Amar II..... | 75 |
| Figure 33 : Potentialité de quelques crues sélectionnées pour l'Oued El Gueiss | 77 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 01 : Risque de transport solide à quelque barrage en Algérie (Envasement) | 22 |
| Tableau 02 : caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins d'étude aux stations hydrométriques | 31 |
| Tableau 03 : Stations pluviométriques des bassins étudiés (ANRH) | 36 |
| Tableau 04 : Moyenne, écart-type, et coefficient de variation de la série Pluviométrique (1970-2004)..... | 42 |
| Tableau 05 : Écart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes (1970-2004)..... | 43 |
| Tableau 06 : Répartition saisonnière des pluies dans les stations des bassins..... | 44 |
| Tableau 07 : Régime thermique mensuel aux stations climatiques de la zone d'étude (1990-2004) | 46 |
| Tableau N° 08 : Données d'observation des autres paramètres climatiques (Station batna). .. | 47 |
| Tableau 09 : Quelques paramètres climatiques de la zone d'étude | 48 |
| Tableau 10 : Statistiques sur les séries de données de concentration en MES (g/l) collectées | 59 |
| Tableau 11 : Modèle courbe du transport solide (puissance) : $Q_s = a \cdot Q_l^b$ | 64 |
| Tableau 12 : Bilan des Apports solides dans quatre bassins..... | 67 |
| Tableau 13 : Concentration, débit solide, et dégradation spécifique pour les bassins d'étude. | 68 |
| Tableau 14 : Apports annuels en matières en suspension..... | 70 |
| Tableau 15 : Valeurs mensuelles de la Concentration en g/l..... | 72 |
| Tableau 16 : Potentialité de la turbidité journalière et instantanée (Oueds : El Gueiss et Bouhamdane) | 76 |



Introduction Générale

Introduction Général

L'érosion hydrique constitue une contrainte majeure dans les régions méditerranéennes, qui menace les potentialités en eau et en sol. L'Algérie est l'un des pays les plus menacés par ce phénomène qui se manifeste essentiellement en période de crues surtout pendant les pluies d'automne et au moment où la couverture végétale saisonnière est absente.

La quantité de sédiments déposés dans les barrages algériens ne cesse d'augmenter avec un taux annuel estimé à 32 millions m³ et le nombre de réservoirs mis hors service par suite de l'alluvionnement est en augmentation constante (Benkhaled et Remini 2003, Elahcene et Remini, 2009).

Dans le Nord-est de l'Algérie, une partie importante des terres sont affectées par l'érosion, et les sédiments transportés par les eaux des Oueds ont contribué à réduire considérablement la capacité de stockages des barrages tels que ceux concernés par notre étude. Il s'agit de Hammam debagh, Foum El Gueiss, Foum El Guerza et fontaine des gazelles. Ces apports en sédiment mettent également en danger, en l'absence d'aménagement anti-érosif, la durée de vie des nouveaux ouvrages de mobilisation à ériger dans la région.

Dans ce travail, nous étudierons les bassins de Oued Bouhamdane, Oued El Gueiss, Oued El Arab et Oued El Hai de en tant que systèmes hydrographiques représentatifs du nord-est algérien. Ces unités naturelles seront étudiées sur le plan physique (morphologie, géologie, hydrographie, couvert végétal...etc.) pour caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans l'écoulement et par conséquent sur le transport solide en suspension.

Quant au choix de ce type de sujet, on est parti du constat que l'eau dans le nord-est algérien est une ressource limitée, qui nécessite une protection et une utilisation rationnelle, pour pallier aux besoins en eau toujours grandissants dictée par une pression démographique intense et une économie de plus en plus exigeantes.

En effet, le transport des matériaux arrachés au versant par les cours d'eau, est un phénomène dont la complexité à l'échelle spatiale et temporelle, reste difficile à mettre en équation vu les différents facteurs mis en jeu.

Il est classique de chercher un modèle régressif significatif reliant le débit solide au débit liquide, pour évaluer l'apport en sédiments d'un bassin versant. Cependant ce modèle nécessitent d'être validés par comparaison avec des mesures bathymétrique par exemples. De

ce fait, il faut toujours justifier le choix d'un modèle plutôt qu'un autre et adopter celui qui offre une explication raisonnable et acceptable.

En Algérie, l'application du modèle "courbe du transport solide" proposé dès 1895 par Kenedy (Elahcene et Remini, 2009) reliant l'écoulement liquide et l'écoulement ou le transport de matériaux solides : $Q_s = a \cdot Q_l^b$ a fait l'objet de nombreuses études (AchiteetOuillon2007, BenkhaledeRemini2003, Elahcene et Remini 2009 ; Larfi et Remini 2006, Megnounif et al. 2003ReminietHallouche2005). Généralement, ces études adoptent Justifiés le choix de ce type de modèle par la variance expliquée. Généralement, ces études adoptent Justifiés le choix de ce type de modèle par la variance expliquée.

Ce mémoire va présenter les résultats d'une étude de quantification des apports solides des Oueds cités précédemment à travers la mise en évidence de relations statistiques entre les débits solides et les débits liquides. Ceci en optant celui qui a le coefficient le plus élevé et en essayent de trouver la justification du modèle choisi. Les données de l'envasement des barrages érigés sur les bassins étudiés va nous permette de procéder à un essai de la validation du modèle.

Notre étude s'articule autour des trois chapitres essentiels :

Le premier chapitre expose un état de l'art et de connaissances en matière d'érosion hydrique et de transport solide. il s'agit de présenter les différents régimes du transport solide, les méthodes de prédiction et d'évaluation, l'ampleur du phénomène en Algérie ainsi que les études réalisées.

Le deuxième tente de définir le comportement du bassin et de préciser comment les différents facteurs naturels : L'orographie et la morphologie du bassin, la lithologie, la végétation, et le climat, interfèrent dans la genèse de l'écoulement et sur le transport des sédiments.

Le troisième chapitre concerne l'étude du transport solide en suspension proprement dite, qui est fondée sur le traitement statistique des données hydrométriques et de concentration en sédiments en suspension. Elle tente de quantifier les sédiments transportés par les oueds à travers la mise en évidence de relations statistiques entre les débits liquides et solides mesurés au niveau des stations qui contrôlent les bassins étudiés. Ce chapitre met en lumière les aspects fondamentaux du transport annuel, saisonnier, extrême.

A decorative frame resembling a scroll, with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved, and the left side has two circular elements that look like the ends of a scroll. The text is centered within the frame.

Chapitre I

Processus du

transport solide

Introduction

La gestion du transport solide en rivière est rendue délicate par la complexité des processus et la difficulté de la mesure. Les mesures directes, les premières initiées, consistent à immerger et à poser sur le lit de la rivière des paniers préleveurs. Dans la plupart des cas, ces méthodes nécessitent des moyens opérationnels conséquents et coûteux, avec une mise en œuvre parfois dangereuse.

I-1 Le transport solide :

Un cours d'eau transporte des sédiments (sables, graviers, galets) qui proviennent de l'érosion hydrique soit des terres du bassin versant, soit des berges ou du fond de son lit. Ce phénomène est appelé « transport solide ».

Lors des crues, les sédiments les plus lourds se déplacent sur le fond en roulant et les plus légers sont emportés par le courant en suspension dans l'eau. Lorsque la vitesse du courant diminue à la fin de la crue, les sédiments se déposent et forment alors des bancs, ou atterrissements. Ces sédiments seront de nouveau mobilisés lors d'une prochaine crue. ([http :www .reart66.fr /les milieux-aquatiques/le transport- solide.html](http://www.reart66.fr/les-milieux-aquatiques/le-transport-solide.html))

Le transport solide joue un rôle important dans la dynamique des cours d'eau, son expression couvre un ensemble de phénomènes physiques extrêmement vastes, il s'agit de l'entraînement des particules solides à l'état granulaire sous l'action de l'écoulement de l'eau (Lebreton, 1974). Il dépend de deux critères essentiels qui sont la vitesse de l'écoulement et la granulométrie. Ainsi l'entraînement des particules solides est essentiellement en fonction de la dimension des particules (Hug, 1975)

I-1-1 Régime de transport :

Généralement deux modes de transport solide sont considérés, le transport solide par charriage et le transport solide en suspension (Probst, J.L. et al. 1989 et Cardoso, A.H. 1994). Il y'a des auteurs qui considèrent un troisième mode caractéristique intermédiaire, la saltation, ou les particules se déplacent par des bonds, en alternant charriage et suspension (Elahcene,O.Remini B., 2009).

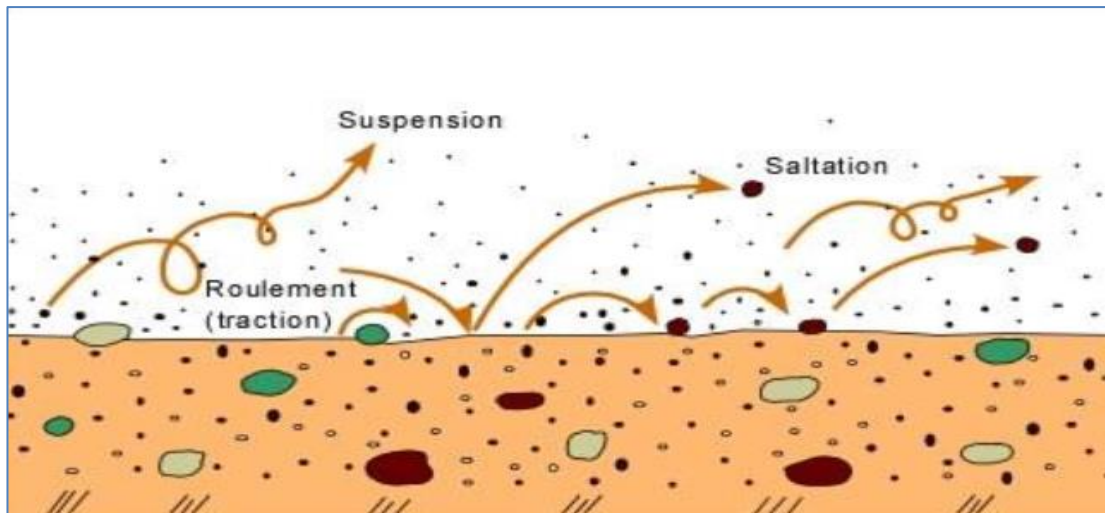


Figure 01: les différents modes de transport solide (BOUZID .2005)

I-1-1-1 Le charriage (bed load):

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs) , qui se déplacent par glissement ou roulement au voisinage du fond du cours d'eau et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et l'espace (Bouanani 2004)



Figure 02 : Transport en charriage (Mokhtari El,2008)

I-1-1-2La suspension (suspended load):

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval. Dans la très grande majorité des cas, la charge en suspension représente quantitativement un pourcentage très important du transport global (Bouannani 2004).



Figure 03 :Transport en suspension (Mokhtari El,2008)

I-1-1-3 la saltation :

Le transport de particules par saltation est lié à la condition d'adhérence d'un fluide réel sur une paroi formée de particules sans liaisons rigides. Les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide (BOUANNANI 2004), le transport sur le fond de lit, qui se déroule près du fond du cours d'eau. Les éléments les plus grossiers du lit sont déplacés par roulement, glissement et saltation (RASSI. W 2004)

I-2 Prédiction de l'érosion hydrique et du transport solide :

Les phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation tiennent une grande place mais sont relativement peu connus. Les deux agents principaux de l'érosion hydrique sont les précipitations et le ruissellement superficiel. Toutefois un grand nombre de facteurs (intensité et agressivité des précipitations, caractéristiques du sol, pentes et longueur de pente, le couvert végétal et l'état hydrique initial) et de mécanismes affectent la relation "chute de pluie – ruissellement- entraînement des terres (BOUANANI 2004)

L'érosion se produit naturellement sous l'action du vent (érosion éolienne) et l'eau (érosion hydrique) et peut être accélérée par divers facteurs tels que les travaux agricoles et les incendies. Ce phénomène affecte aussi la qualité des eaux et la capacité de stockage des barrages. Dans ce

qui suit nous nous intéresserons particulièrement à l'érosion hydrique des bassins versants des cours d'eau.(BOUKLIKHA& BERRICHI 2017).

I-2-1 Estimation des pertes en terre à l'aide du modèle de Wischmeier

La méthode la plus connue pour la détermination et la zonalité de l'aléa érosion est l'équation universelle de perte en sol «Universal Soil Loss Equation (USLE) » proposée par Wischmeier et Smith (1960,1978).

Il s'agit d'un modèle d'érosion, permettant d'évaluer les zones à haut risque et de quantifier les pertes de sol moyennes annuelles. Le modèle permet l'estimation des quantités de sédiments qui seront transportées par le cours d'eau.

Dans ce sens, il existe un autre modèle qui utilise presque les mêmes paramètres physiques, la SLEMSA (SoilLoss Estimation Model for Southern Africa). Ces modèles constituent les seuls recours que les chercheurs utilisent pour planifier les besoins de conservation des sols à une échelle régionale.

Ce modèle ou l'une de ses versions modifiées (par exemple RUSLE), ont été empiriquement établies à partir de mesures ponctuelles sur parcelles expérimentales en tenant compte de tous les facteurs naturels et humains intégrés à l'échelle d'un bassin versant pour l'évaluation de l'érosion. Il est mis au point en 1959 aux Etats-Unis et né du traitement statistique des résultats de 20 ans de mesures sur parcelles expérimentales. Depuis, ce modèle a été largement utilisé en Afrique.

I-2-1-1 Principe

Il s'agit d'un modèle d'érosion (Wischmeier&smith, 1978), permettant d'évaluer les zones à haut risque et de quantifier les pertes de sol moyennes annuelles. Le modèle permet l'estimation les quantités de sédiments qui seront transportées par le cours d'eau. La formule s'écrit :

$$A= R .K .L .S .C.P \quad \text{Avec:}$$

A : Perte de terre (tonne/ha/an) ;

R : Facteur d'agressivité climatique ;

K : Indice d'érodibilité du sol ;

L : Facteur longueur de pente ;

S : Facteur de pente ;

C : Facteur agronomique ;

P : Facteur des aménagements antiérosifs.

Elle porte le nom de WISCHMEIER et SMITH. C'est la formule la plus utilisée mais sa complexité réside dans la difficulté de la détermination exacte de tous ses paramètres. (Bednarczyk et Madeyski, 1998).

Ce modèle compare l'érosion d'un site quelconque à l'érosion d'une parcelle témoin de dimensions standard tout en la traitant périodiquement afin qu'il ne se forme aucune croûte superficielle ou qu'elle ne change pas de formation superficielle initiale. A noter que les mesures sur la parcelle permettent essentiellement d'évaluer l'érosion décapante induite par le ruissellement en nappe.

Le but essentiel de l'application de cette équation est de définir de les techniques culturales et les aménagements anti érosifs à mettre en œuvre en un lieu dont on connaît : la topographie, le climat, le sol et les cultures souhaitables de développer sans risque de ruiner le patrimoine foncier. Ce modèle bien que universel, renferme des défaillances. En effet, selon Auzet (1987) cité par Macary&Berville (2003) la principale critique à cette équation est qu'elle se présente sous la forme d'un produit et fait intervenir les facteurs que par leurs poids statistiques sans tenir compte de leurs liaisons causales, négligeant alors les relations complexes.

Certains auteurs ont critiqué la prise en compte des valeurs seuils pour caractériser les précipitations et aussi l'utilisation des parcelles expérimentales standardisées .Roose (1988) a aussi souligné une des limites des parcelles d'érosion. Il explique que la méthode des parcelles d'érosion ne donne pas la valeur absolue de l'érosion en un point du versant puisqu'on isole la parcelle de son environnement naturel, en particulier des apports d'eau et de sédiments venant de l'amont.

En plus L'USLE estime donc uniquement l'importance des pertes en terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple, sans toutefois tenir compte des pertes en terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol.

I-2-1-2 Intérêt et limites de l'USLE :

L'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, du système cultural et des pratiques de gestion.

a. Intérêts :

Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence du système cultural et du système de gestion sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole,(Bouannani 2004)

Il peut servir à comparer les pertes en terre provenant d'un champ donné soumis à un système cultural et à un système de gestion particuliers, à des taux de « pertes en terre tolérables » ou encore aux pertes observées avec un autre système cultural ou un autre système de gestion, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles,(Bouannani 2004).

b. Limites

Cette équation empirique demande l'exploitation de nombreux résultats. Il est donc nécessaire, pour fixer les valeurs des différents facteurs, de posséder un grand nombre de résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus sur parcelles ne peuvent être transposés sur des vastes surfaces dans le cadre des programmes généraux de lutte contre l'érosion.

Ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie: il ne s'applique donc jamais à l'érosion linéaire, ni à l'érosion en masse.

Ce modèle a été testé et vérifié dans des paysages de pénéplaines et de collines sur des pentes de 1 à 20 % à l'exclusion des montagnes jeunes, en particulier des pentes supérieures à 40 % où le ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies et où les mouvements de masse sont importants.

Les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies utilisées généralement dans ce modèle ne sont valables que dans la plaine américaine. Elles ne sont pas valables en montagne.

Ce modèle ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans. il n'est donc pas valable à l'échelle de l'averse.

Enfin une limite importante de ce modèle, c'est qu'il néglige certaines interactions entre les facteurs pour pouvoir distinguer plus facilement l'effet de chacun des facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente(F.A.O, 1990).

I-2-3 Évaluation du transport solide avec les données de mesures :

La mesure de transport solide se fait par plusieurs méthodes dont les plus connues sont : les levées bathymétriques et les mesures turbidimétriques, De nombreuses formules ont été établies à partir de données observées sur des différents bassins du globe pour l'estimation de transport solide, citons, à titre d'exemple :

- La relation de FOURNIER :

$$E = \frac{1}{2} (Pm^2 / Pan)^{2.65} * (H/S)^{0.46}$$

E : Apport solides spécifiques moyens annuels (t /km²/an)

Pm : pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm)

Pan : pluie moyenne annuelle (mm)

H : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin (Km²)

Cette formule basé sur des données recueillies dans nombre des bassins chaque un à ca surface appartenant à différentes régions du globe

- La relation de TIXERONT :

$$A = 92 * R^{0.21} \text{ (région de l'Est Algérien)}$$

A : Apport solides spécifiques moyens annuels (t /km²/an)

R : Écoulement annuel total (mm)

Cette relation basée sur des données recueillies dans 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie varient entre 90 et 22300 Km².

I-2-3-1 Méthode basé sur la mesure du taux de remplissage des retenues :

Le contrôle de l'envasement des retenues et des barrages permet d'évaluer de façon globale l'importance du processus érosion-transport solide, incluant le charriage de fond. Son intérêt est également évident pour l'exploitation des barrages.

Cette méthode permet l'estimation globale des sédiments transportés par les cours d'eau, y compris le charriage de fond (Ghorbel et Claude, 1982). Les levées bathymétriques sont la base de cette estimation.

Un barrage constitue une fosse à sédiments de grande taille, Si l'on contrôle le bilan hydraulique du barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou soutirés, on peut déduire

de l'envasement de la retenue, une valeur moyenne des transports solides sur une période allant de la date de la mise en eau du barrage à la date des mesures d'envasement ou sur une période suffisamment longue, comprise entre deux relevés successifs (Demmak, 1982) .

La formule du Calcul de la rétention sur la base de chronique haute fréquence est comme suit :

$$1) \text{ rétention} = (Q \text{ entrant} \times C \text{ entrant}) - (Q \text{ sortant} \times C \text{ sortant})$$

$$2) \% \text{ de rétention} = (\Sigma \text{ flux entrant} - \Sigma \text{ flux sortant}) \times 100 / \Sigma \text{ flux entrant} \text{ (Jodeau M. 2003)}$$

I-2-3-2 Méthode basée sur la mesure de la concentration (turbidité) en MES :

La méthode est basée sur la mesure de la turbidité ou de la concentration en Matières En Suspension(MES) qui correspond pratiquement à la quantité de matériaux en suspension recueillie à travers une membrane poreuse (la taille moyenne des pores est en général de 0,2 µm). La concentration en MES s'exprime en milligrammes par litre d'eau brute.

Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la charge en suspension transportée par un cours d'eau. La méthode la plus consiste à procéder, comme pour la mesure du débit liquide, à une intégration de différentes concentrations et des vitesses sur plusieurs verticales. Cette technique nécessite un matériel de prélèvement adapté aux caractéristiques de la section de mesure. Le contrôle en continu de la charge solide est possible grâce aux programmes d'échantillonnages intensifs avec des pompes automatiques ou, de manière indirecte, avec l'installation de turbidimètres (Belhedi 2010)

-Mesure par prélèvement ponctuel–pesée :

La procédure consiste à prélever des échantillons durant un intervalle de temps suffisamment long pour atténuer les fluctuations de concentrations. Le prélèvement se fait point par point ou par intégration le long d'une verticale, selon les modèles. Dans ce dernier cas, l'échantillon recueilli permet de mesurer la concentration moyenne pondérée par les débits sur toute une verticale. L'appareil de mesure le plus simple est constitué d'une bouteille à large col fixée à une perche. A travers le bouchon, passe un ajustage d'admission qui doit être dirigé face au courant tandis qu'un deuxième conduit, dirigé vers l'aval, permet à l'air de s'échapper. Des systèmes obéissant au même principe peuvent être installés sur des saumons de les tages(Belhedi 2010)

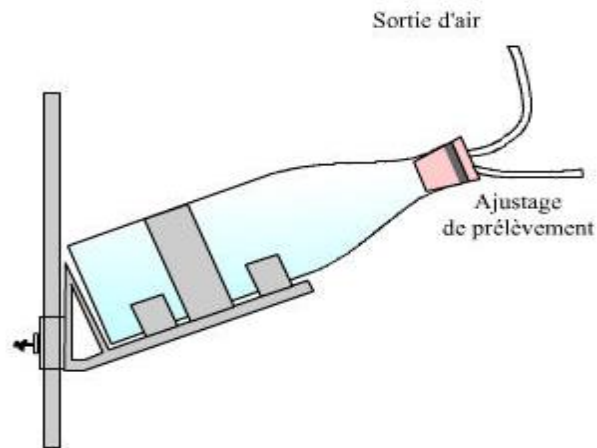


Figure 04 : Bouteille de prélèvements fixée sur une perche avec système d'ajustage (Nouvelot,1993).

Ou par les échantillonneurs standardisés qui prélèvent à chaque verticale un certain nombre de mesures, comme le montre la figure suivante :



Figure 05 : Appareil de mesure de la charge en suspension (Mussy2002).

En considérant la section S d'un cours d'eau de largeur L , chaque verticale V peut être définie par son abscisse l (distance à l'une des 2 rives), et sa profondeur totale P . Si en un point d'une verticale V , situé à la profondeur p , sont mesurées à la fois la vitesse du courant v et la concentration c de matériaux en suspension, le débit solide sur la surface ds de la section S s'écrit : $Q_s = c.v.ds$

Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration:

$$Q_s = \iint_S q_s = \iint_S c \times v \times ds = \iint_S c \times v \times dl dp$$

Avec : Q_s : débit solide du cours d'eau [kg/s] ;

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport : $C_m = Q_s / Q_L$,

Avec : Q_L : étant le débit liquide total sur la section $Q_L = \iint_S v ds$

Cette méthode pour mesurer la quantité de sédiments transportée par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont donc généralement simplifiées. Elles sont surtout utiles pour valider les protocoles d'échantillonnages des réseaux de surveillance du transport en suspension.

-Mesure optique (à l'aide de turbidimètres) :

La turbidité correspond à la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension, elle est mesurée par des turbidimètres. Le principe est de mesurer et interpréter en terme de concentration, la quantité de lumière transmise (transmissométrie), diffusée à 90° (turbidimétrie) et/ou rétrodiffusée par les particules en suspension selon plusieurs directions de mesure (néphélométrie), (Dupont 2001, Mano 2008). La turbidité peut s'échelonner de moins d'une UTN (unités de turbidité néphélométriques) à plus de 1000 UTN



Figure 06 : Exemple de turbidités croissantes

(http://www.discip.accaen.fr/svt/pages/college/eau_douce/qualite_eau.php)

- Mesure acoustique :

Cette méthode de mesure consiste à déployer un hydrophone sur la section en travers d'une rivière. Le capteur est installé sous un radeau qui sera manipulé par un opérateur depuis un pont ou depuis la berge : la mesure consiste alors à laisser dériver le radeau, puis à recommencer en plusieurs positions le long de la section en travers. En dérivant, l'hydrophone suit le courant, ce qui permet de s'affranchir des bruits dus aux frottements de l'eau sur le micro. Cela permet également une mesure intégrative, en naviguant sur toute la section au plus près des sources de bruit. (EDF-Division Technique Générale).

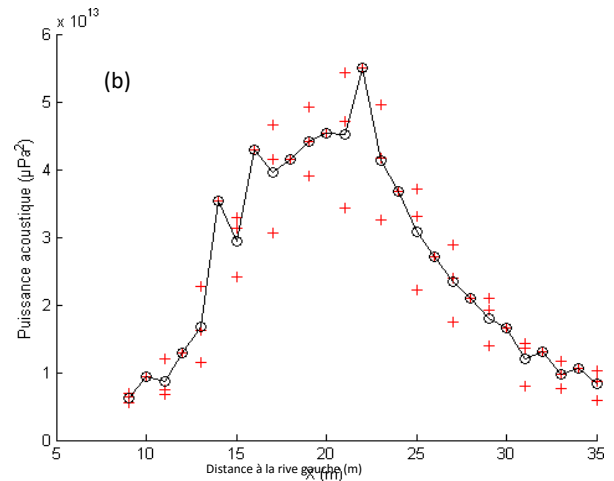


Figure 07 : (a) Radeau dérivant équipé d'un hydrophone ; (b) Exemple de profil acoustique obtenu

- Limites des méthodes et incertitudes de mesures.

Les incertitudes de mesure résultent de l'effet combiné de l'opérateur, de l'environnement, de l'équipement et de la technique de mesure, et des caractéristiques de la grandeur mesurée (Marechal, 2000).

La mesure par prélèvement ponctuel est une méthode un peu difficile à effectuer et pose des problèmes de représentativité de conservation et d'homogénéisation de l'échantillon prélevé.

La mesure optique soulève un certain nombre de difficultés quant à l'utilisation de la turbidimétrie pour mesurer le taux de MES (Mathieu, 2000). Si la mesure de turbidité ne nécessite pas de prélèvement, elle pose de nombreuses difficultés pratiques (dérive de l'électronique, encrassement des capteurs, erreurs des mesures à la présence de bulles d'air (Hach et al. 1982, Harremöes et al. 1993 in : Marechal 2000)).

En revanche, les systèmes de mesure acoustique est beaucoup moins sensible à l'encrassement que les capteurs optiques. Cependant, la valeur de la concentration mesurée est une valeur relative par rapport à la concentration en surface, qu'il faut connaître indépendamment. En plus des limitations inhérentes à la technique de mesure, notamment l'impossibilité de mesurer dans une zone proche du capteur et à proximité du fond, ce système nécessite une calibration très précise, souvent difficile à obtenir, même en laboratoire. (Marechal 2000).

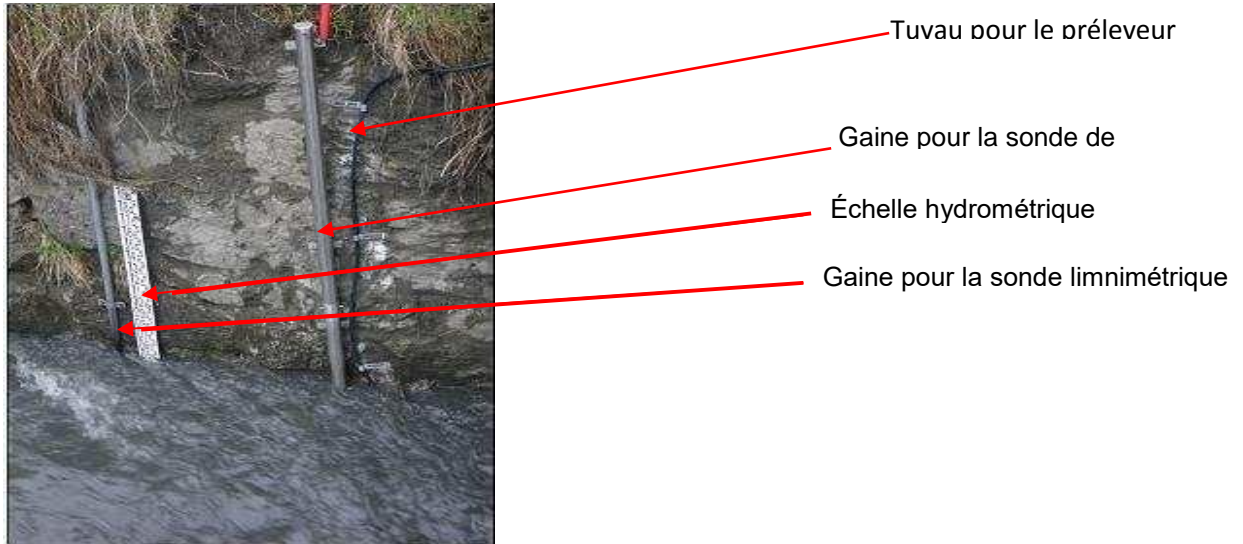


Figure 08: Exemple de dispositif de mesure placé dans l'écoulement (source Cemagref Lyon 2011)

. Extrapolation des mesures : corrélation et régression :

L'insuffisance des mesures du transport solide (concentration en MES), nous amène souvent à rechercher des modèles statistiques régressifs pour remédier à ce problème. Le but d'un modèle régressif est d'expliquer le mieux possible la variabilité de la variable dépendante (y) à l'aide d'une ou plusieurs variables indépendantes (x). Dans le cas de la régression linéaire simple, le modèle ne contient qu'une seule variable indépendante. Ci-dessous, une présentation succincte des modèles les plus connus :

-Le modèle linéaire ($y = ax + b$) : il exprime un rapport d'évolution proportionnel entre deux variables x et y dans un rapport de 1 à a.

-Le modèle puissance ($y = b \cdot x^a$) : il exprime une dépendance donnant graphiquement une courbe convexe lorsque $a < 1$, concave lorsque $a > 1$ ou en i quand $a < 0$. L'exposant (a) indique de combien varie y en % lorsque x augmente de 1%

-Le modèle exponentiel ($y = b \cdot e^{ax}$ ou $y = b \cdot 10^{ax}$) : ils 'exprime par une courbe en J ($a > 1$) ou en i ($a < 0$) être présente une évolution (croissance ou décroissance) à un taux constant ou en accélération.

-Le modèle polynomial ($y = a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + b$) : il s'exprime par une courbe complexe avec plusieurs creux et bosses. Les plus simples étant le modèle parabolique, cubique et quadratique.

Le choix du type de courbe (modèle) doit s'appuyer sur certaines règles-étapes: la connaissance théorique préalable du phénomène étudié, la connaissance du terrain, la représentation graphique du nuage de points permettant de visualiser une distribution

(indépendance, liaison fonctionnelle ou dépendance), enfin l'intensité de la corrélation (Belhedi, 2010). Pour être significatif, le coefficient de corrélation calculé doit être supérieur ou égal au seuil indiqué par la table de Bravais Pearson.

Cette table donne les valeurs théoriques à atteindre ou à dépasser en fonction du nombre d'observations (n) ou du degré de liberté (v) en ligne, le risque d'erreur α ou le seuil de probabilité (1 - α) en colonne. Le nombre de degré de libertés $v = n - p - 1$ où n: le nombre d'observations, p: le nombre de variables explicatives. Dans le cas de la corrélation simple on a $v = n - 2$, (Belhedi, 2010).

. Quantification des apports solides : techniques d'interpolation et d'extrapolation

La quantification des flux sédimentaires nécessite en théorie de mesurer sur plusieurs années le débit (Q) des cours d'eau considérés et la concentration en Matières En Suspension (MES) à une fréquence d'acquisition suffisamment élevée pour intégrer la variabilité temporelle de ces paramètres.

En l'absence des données détaillées sur les concentrations des sédiments en suspension, plusieurs méthodes indirectes, basées sur les techniques d'interpolation et d'extrapolation, ont été adoptées. Selon Walling et Webb (1981), les procédures fréquemment utilisées, pour calculer la charge de sédiments en suspension, à partir des données de débits disponibles, à pas de temps fin, et pour une période de temps déterminé, sont. (Valentin.L, Olivier .c 2017)

-Le produit de la concentration moyenne de n échantillons et du débit moyen des mêmes échantillons multiplié par un coefficient tenant compte du temps:

$$As = k \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n} \right)$$

-La somme de la moyenne des produits des couples (Q, C) de chaque intervalle multipliée par un coefficient tenant compte du temps.

$$As = k \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i Q_i}{n} \right)$$

-le produit d'un facteur temps, le débit moyen et le rapport des concentrations par le nombre de mesures.

$$As = k \bar{Q}_r \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right)$$

-la combinaison entre la concentration moyenne pondérée par le débit multipliée par le débit liquide moyen.

$$As = \frac{k \sum_{i=1}^n (C_i Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \cdot \bar{Q}_r$$

-la somme des produits de la concentration d'échantillon et le débit moyen pour un intervalle.

$$As = k \sum_{i=1}^n (C_i \bar{Q}_{pi})$$

-la somme sur 12 mois des produits entre les concentrations moyennes mensuelles et les débits moyens mensuels.

$$As = k \sum_{m=1}^{12} (\bar{C}_m \cdot \bar{Q}_m)$$

C_i : concentration instantanée mesurée ; Q_i ; Débit instantanée mesurée ; Q_R : Débit moyen durant la période de mesure ; Q_{pt} : Débit moyen pour l'intervalle entre les mesures ; C_m : concentration moyenne mensuelle ; Q_m : Débit moyen mensuel ; K : Facteur de conversion tenant compte la période de mesure ; n : Nombre de mesures.

La reconstitution des valeurs manquantes et l'extension des séries d'observation, s'appuie le plus souvent sur des relations statistiques entre la concentration (ou le débit solide) et le débit liquide sous la forme : C=f(Q) ou QS=f(Q). Ces paramètres, sont dans une grande mesure étroitement liés entre eux. Walling et al. (1981), Ferguson(1987)et Hasnain(1996)in: Achite et

Ouillon(2007),ont mentionné que la concentration des sédiments en suspension (C) et le débit liquide (Q) évoluent suivant un modèle puissance ($C=aQ^b$).

Par ailleurs, une relation a été proposée dès 1895 par Kennedy et communément appelée courbe du transport solide (Cambell et al. 1940, Crawford 1991, Restrepo et Kjerfve2000). Elle lie le débit solide au débit liquide.

les paramètres (a) et (b), généralement estimés par régression linéaire, sont en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, et des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau (Leopold et Maddock 1953, Dawdy 1967, Fleming 1969, Bogardi 1974, Vanoni 1977, Wood 1977, Wallinget Webb1981, Ferguson 1986, Battala et Sala 1992, Linsley et Franzini1992 in: Benkhaled et Remini , 2003 (GUIDOUM.A 2017)

I-2-3-3 La mesure des transports de fond :

La mesure directe du débit de charriage présente de grandes difficultés. Les préleveurs de matériaux de transport de fond perturbent l'écoulement du transport solide dont ils sont supposés mesurer la quantité [Atkinson 1990]. De façon sommaire, les différents équipements de mesure sont les suivants [EPFL 2003].

- les nasses constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension mais capte les matériaux grossiers
- les pièges constitués de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le sommet est dirigé vers l'amont. A l'aval, des cloisons inclinées piègent les matériaux (les sables essentiellement) ;



Figure09 : un piégeage des sédiments dans l'appareil de mesure

Source (CETE Normandie Centre – Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois 2011)

-les sondes à ultrasons ;permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes



Figure 10 : Exemple de sonde de turbidité Hach Lange(internet à gauche et Cemagref Lyon à droite).

-les plages de dépôt et les barrages de rétention des éléments grossiers dans les torrents et les rivières torrentielles (OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU 2004)

On trouve pour le charriage les mêmes principes de mesures que pour les suspensions: la mesure par échantillons, la mesure globale et la mesure en continu. Le piégeage des sédiments est la manière la plus simple. Elle consiste à mesurer les dépôts sédimentaires dans une fosse à sédiments ou une plage de dépôts avec un barrage filtrant en travers du lit (barrage souterrain). La méthode permet de connaître les apports solides en un point, leur volume et leur granulométrie. Cependant elle devient plus longue et laborieuse lorsque la charge en sédiments devient plus grande (FAO, 1993).

L'évaluation du charriage au moyen de nasses est de loin l'idée la plus ancienne. Il existe différents modèles de nasses plus ou moins performants hydrauliquement. Citons à titre d'exemple la nasse Helley-Smith, USA et la nasse BTMA (Bedload Transport Mètre Arnhem) de conception hollandaise, utilisées toutes deux pour les charriages de sables (Granier, 1983).



Figure 11: Nasse Type Helley-Smith (Camenen et al, 2012)

Hors des parcelles et des petits bassins versants dont les exutoires peuvent être équipés de pièges ou de fosses à sédiments, la mesure du transport de fond reste imprécise. Les dispositifs communément utilisés perturbent en effet de manière non négligeable le régime du transport de fond. (<http://hydram.epfl.ch/hydrologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> 2004)

Le principe de mesure est simple : la nasse est immergée, laissée sur le fond du lit pendant un temps (t) très variable, puis remontée; les matériaux prélevés sont séchés et pesés (poids p). Le débit solide dans l'emprise de la nasse est donné simplement par $Q = p/t$. La mesure peut être répétée plusieurs fois en chaque point. Mais, elle est impraticable pour des vitesses de courant supérieures à 3 ou 4 m/s.

Une autre technique basée sur l'utilisation de traceurs colorés ou radioactifs, et permette d'effectuer les mesures lors des crues violentes. Elle trouvera son application exclusivement dans l'étude du charriage des cours d'eau à fonds caillouteux ou graveleux. Avant la crue un endroit précis du lit, des graviers ou galets marqués de diamètres différents sont injectés à des espacements réguliers sur toute la largeur de la section. Leur marquage se fait soit à la peinture, soit à l'aide d'une matière fluorescente, soit par irradiation. Donner des explications pour les trois termes. Après le passage de la crue leur position est repérée visuellement pour les traceurs colorés et à l'aide d'une sonde de large emprise pour les traceurs radioactifs. Cependant, Cette méthode ne peut s'appliquer que sous forme de campagne et les sédiments doivent représenter les différentes classes granulométriques présentées dans le cours d'eau(Granier, 1983).

Les capteurs de pression acoustique (hydrophones) joue le rôle l'enregistrement des mesures (vitesse, débit) et l'analyse du bruit émis par les matériaux en mouvement au fond du lit (Belleudy, 2010). Qui exprimer le charriage, les résultats obtenues à un laboratoire transcrire vers le milieu naturel. (Demmak 1982, Mano2008).

I-3 Ampleur de l'érosion au bassin méditerranéen et en Algérie :

La zone méditerranéenne a Une superficie de 202.000 km² et un risque très élevé d'érosion dans les pays méditerranéens de l'Union européenne (Giordano et Marchisio, 1991). En Turquie, 22,3% des terres sont gravement érodées (FAO, 1990). En Syrie, les pertes en terre par érosion hydrique varient de 50 à 200 tonnes/ha/an et de 50 à 70 tonnes/ha/an dans les montagnes du Liban (Bou Kheir et al.2001)

L'érosion spécifique annuelle variant plus de 2000 t/km², l'Algérie se classe parmi les pays les plus érodables du monde (Demmak, 1982).

En Algérie beaucoup de travaux sont menées dans cet aspect. En effet, le bassin versant de Sebdou, donne une valeur annuelle maximum en (1990-91) qui atteint 4283 t/km²/an (Megnounif et al 2003), elle est de 5876 t/km²/an en (1995-96) (Ghenim ; 2008)

D'après une étude de Bourouba,M. (2002) à travers 24 stations de mesures, les valeurs annuelles maximales peuvent varier entre 164 t/km²/an en (1977-78) à l'Oued Soubelle dans le bassin versant de Chott Hodna à 10375 t/km²/an à Oued Djendjen dans le bassin versant des côtières Constantinois.(BOUKLIKHA Z. & BERRICHI M. 2017)

Dans le Nord-est algérien , une grande partie des terres est touchée par l'érosion(Berkane et Yahiaou, 2007).Les sédiments obtenues par les oueds ont réduire la capacité de stockage

barrages Foug El Gueiss et Foug El Guerza. Ces ouvrages sont comblés à plus de 70% de leur capacité totale (Remini et Hallouche 2005).

I-4 Quelques données chiffrées sur l'érosion et le transport solide en Algérie :

Les bassins versants du Tell algérien dominés par un climat semi-aride sont caractérisés par une pluviométrie saisonnière et interannuelle irrégulière. Cette irrégularité a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Ce dernier dépend de plusieurs facteurs dont l'agressivité des averses, l'état du sol et la turbulence de l'écoulement. Les valeurs de la dégradation spécifique varient d'un bassin à un autre et d'une région à l'autre.

Nous citons par exemple, 1160 t/km²/an pour l'oued Mazafran (côtiers algérois), 2300 t/km²/an pour l'Isser à Lakhdaria, 490 t/km²/an pour oued Soummam à Sidi Aïch, 680 t/km²/an pour oued Medjerda à Souk Ahras (Bourouba, M. 1997) et 150 t/km²/an pour la Macta au barrage Cheurfa (Bourouba, M. 1998).

Les crues de l'automne et du printemps sont responsables de l'essentiel du transport solide. En effet, pendant l'été connu pour ces chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et voit son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ces éléments fins détachés. Pendant le printemps qui succède à la saison hivernale froide et pluvieuse, les crues coïncident avec des versants saturés et déblayés. (BOUANNANI 2004)

L'activité érosive dépend alors des mouvements de masses et des sapements de berges qui se produisent dans les zones mal protégées au bas des versants. On assiste alors pendant ces crues à une croissance rapide du volume ruisselé et de la turbidité. Pour la crue du 17 avril 1979 à oued Medjerda supérieur, le débit liquide et la concentration enregistrés sont 8 fois supérieurs aux valeurs moyennes mensuelles (Bourouba, M. 1998).

Ces périodes de crues de l'automne et du printemps représentent une courte période de forte érosion qui dure entre 2 et 4 mois mais responsable de la majeure partie du transport solide.

Le reste de l'année est à érosion faible (Terfous, A. et al. 1999); (Bourouba, M. 1997, 1998). Annuellement, le comportement morphologique irrégulier des bassins versants algériens passerait d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement (Bourouba, M. 1998).

Les chiffres exposés ci-dessous illustrent l'ampleur du phénomène érosif en Algérie et ces conséquences :

-le taux d'érosion spécifique atteint en Algérie, les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord, il dépasse 2000t/km².an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien(Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser, Soummam...). Ce taux atteint 4000t/km².an sur la chaîne côtière de Dahra, et 5000 t/km².an sur le bassin très dégradé de l'Oued Agrioum(Demmak 1982).

-Les concentrations des sédiments sont très élevées suivant les cours d'eau, et l'importance des crues. Elles varient de 50 à 150 g/l et peuvent atteindre ou même dépasser les 500 voire 600 g/l (Remini W.,Remini B.2003). Selon Demmak (1982), une valeur de 674 g/l a été enregistrée sur le Leham à Rocade Sud (Hodna).

-L'érosion par ravinement est la forme d'érosion la plus grave en Algérie. Elle peut représenter à elle seule plus de 50 % de l'apport solide annuel (Touaibia et al., 2010).

-Plus de 20 millions d'hectares de terres sont touchés par l'érosion ; particulièrement dans les zones montagneuses où sont implantés plus de 90% des barrages (Mazour. et Roose E. 2002).

-L'érosion hydrique affecte 28 % des terres de l'Algérie du Nord (Touaibia et al., 2010).La partie ouest de l'Algérie est la plus érodée, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, suivie du Centre (27%) et de l'Est (26%),(Achite Met al., 2006).

-85% des sols cultivables, soit 6 millions d'hectares, sont situés dans les zones les plus sensibles à l'érosion,(Chebbani et al., 1999).

-On estime que 40.000 ha de sols cultivables sont perdus chaque année (Lekfir et al., 2006)-L'érosion touche 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares(Chebbani et al., 1999).Les terres à fortes pentes sont les plus touchées(Touaibia et al., 2010).

-Une quantité moyenne de 120 millions de tonnes de sédiments, arrachée aux bassins exoréiques, est rejetée en Méditerranée chaque année. Tandis que, le réseau endoréique qui draine les hautes plaines transporte annuellement quelques20 millions de tonnes de sédiments ver les lacs salés (Demmak 1982).

-la réduction des potentialités hydrauliques par suite de l'envasement est estimée en moyenne à près de 20millions de m³/an (Errih et al, 1992; Errih et Bendahou, 1997), ce qui réduire de 0,3 % par an les capacités de stockage de l'eau estimées à 6,2 milliards de m³ (Fandiet al. 2009)

- plus de 560. 106 m3 de dépôt de vase dans plus de 110 barrages algériens en 1995, soit un taux de comblement de 12,5 % (Bouchelkia et Remini 2003).

| Barrage | Superficie de bassin versant Km2 | Capacité initiale Mm3 | Période du calcul | Envasement moyen Mm3 /an | Perte en capacité % |
|--------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|
| Boughzoul | 19740 | 55 | 1934/1986 | 0,570 | 62,94 |
| Gfirib | 23 300 | 280 | 1939/1986 | 2,490 | 50,51 |
| O. Fodda | 790 | 228 | 1932/1986 | 2,246 | 41,97 |
| Bakhadda | 1 275 | 56 | 1963/1986 | 0,082 | 18,85 |
| SMBA | 6 100 | 235 | 1978/1985 | 1,170 | 3,23 |
| Hamiz | 137 | 21 | 1935/1986 | 0,155 | 59,57 |
| Egtiilmada | 650 | 154 | 1954/1974 | 1,832 | 22,07 |
| Zardezas | 346 | 31 | 1977/1986 | 0,450 | 52,32 |
| Cheffia | 575 | 171 | 1965/1986 | 0,124 | 1,52 |
| Ksob | 1 470 | 31 | 1977/1986 | 0,395 | 59,90 |
| BournElgerza | 1 300 | 47 | 1950/1986 | 0,590 | 45,19 |
| FoumElgneiss | 153 | 3 | 1939/1986 | 0,030 | 46,66 |
| Sarno | 264 | 22 | 1954/1986 | 0,414 | 1,95 |
| Cheurfa | 4015 | 14 | 188Z/1967 | 0,061 | 35,71 |
| Bouhnifia | 7 850 | 73 | 1944/1967 | 0,013 | 28,76 |
| Fergoug | 8 274 | 18 | 1970/1986 | 0,881 | 78,33 |
| DjorfEhorba | 22 000 | 360 | 1967/1986 | 2,290 | 12,11 |
| Beni Bahdel | 980 | 63 | 1944/1986 | 0,107 | 10,47 |
| Maffrouche | 85 | 15 | 1940/1986 | 0,017 | 2,66 |

Tableau 01 : Risque de transport solide à quelque barrage en Algérie (Envasement)

Source :(Rapport du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE 2013 Ouargla)

I-5 Énoncé de quelques études faites sur l'érosion et le transport solide en Algérie :

Un effort louable a été entrepris en Algérie depuis les années 1945 pour reforester les têtes de vallées les « badlands », fixer les ravines et corriger les oueds, aménager les terres cultivées en banquettes (Roose.1994)

Depuis 1978, La construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout aux difficultés économiques.

La lutte antiérosive a été en suite restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages : il ne reste que la R.T.M. (restauration des terrains en montagne) en faveur de la qualité des eaux, des périmètres irrigués et des besoins des citoyens des grandes villes (ROOSE ,1994).

Parmi les travaux concernant l'érosion et le transport solide effectués en Algérie, on trouve :

-Medinger (1960) qui a procédé aux premières séries des mesures sur une trentaine de bassins versant Algériens durant la période de 1946-1957, il estimé les débits solides et les concentrations moyennes et maximales de 30 stations observées. Dans cette même année et après homogénéisation, comblement des lacunes et extension des séries hydrométriques de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie

-Tixeront (1960) qui a basé ses travaux sur les données de 32 bassins Algériens et l'estimation de la charge solide en mettant en évidence l'effet relatif des différents facteurs érosifs en jeu.

-capolini (1965-196) : à réaliser une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Cheliff, afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides des principaux affluents de l'oued Cheliff.

-sogreah (1969) ; cette étude est basée sur des données d'observation recueillies au niveau de 09 barrages et 18 stations hydrométrique, totalisant 282 années stations, Les résultats sont représentés sous forme d'abaque donnant des courbes de dégradation spécifique pour 5 catégories de bassins en fonction de la perméabilité

-Demmak (1982), qui a fondé son étude sur les données observées, durant la période 1972/1979, sur trente bassins versant de l'Algérie du Nord, Recherche d'une relation empirique entre les apports solides et les paramètres physico-climatiques des bassins, Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale.

L'étude de l'érosion, du transport solide et de l'envasement des barrages a fait l'objet d'autres travaux effectués par de nombreux auteurs Capolini 1965-1969 ;Meddi, 1992;

Saidi, 1991). Ils ont tenté de montrer l'influence des différents paramètres (pluviométrie, ruissellement, lithologie, couvert végétal) sur le phénomène du transport solide.

En effet, les données de mesure du transport solide en Algérie dont la durée d'observation varie de 8 à 24 ans.(MEDDI, M. 2002) ont été analysées et critiquées par de nombreux chercheurs tels que

- 1986-1995 : Ouzera/Médéa, Ain Fares/Mskara, Tlemcen, et O. Mina, (Algérie NW), Contribution a Synthèse des mesures de ruissellement, d'érosion en nappe et de production de biomasse sur un réseau de 50 parcelles réparties dans quatre régions algériennes montagneuses.(Snoussi, 1993)

- 1975-1985 : O. Reboa,O. Lougmène, O. Leham(Algérie NE), Quantification et analyse des variations des écoulements solides en relation avec les débits liquides.(BeninaTouaïbia , Abdellah Aïdaoui , Dieter Gomer&Mohamed Achite (2001)

- 1972-1976 : O. Seybouse, O. Djendjen, (Algérie NE) ; Analyse comparative du transport solide de deux bassins-versantsprésentant des comportements hydrologiques différents et des bilans d'érosion dissemblables (Bourouba.M 1994) .

- 1972-1982 : O. Reboa,O. Boudouaou,(Algérie NE) ; Étude comparative de transports solides en suspension, précipitations et débits(Bourouba.M 1994) .

- 1975-1985 : O. Medjerda supérieur (Algérie NE) ; Analyse graphique des variations des transports solides et leurs relations avec les précipitations et les débits.(Bourouba.M 1994))

- 1992-1993 : O. Isser (Algérie NW) ; Analyse de l'érosion et du ruissellement à différentes échelles spatiales en reliant les données expérimentales aux caractéristiques hydro morphologiques et analytiques des sols.(Bouannani 2004)

- 1989-1992 : O. Mina ; Quantification de l'érosion hydrique au sens de la méthode Wischmeier, de la simulation de pluies sur 1et 87m, de micro-bassins expérimentaux, de retenues collinaires, et d'un barrage en exploitation.(BeninaTouaïbia , Sylvia D'autre bande , Dieter Gomer&Abdallah Aidaoui (1999).

- 1977-1993 : O. Mouilah, (Algérie NW) ; Evaluation de la variabilité temporelle du transport solide en suspension.(Abderrahmane Ghenima , Abdelali Seddina&AbdelaliTerfous 2010)

- 1972-1979 : Algérie septentrionale ; Étude des variations spatio-temporelles des transports solides en suspension et leurs relations avec les précipitations et l'écoulement (M. Achite et M. Meddi 2005)

-1972-1989 : Wahrane (Algérie NW) ; Analyse qualitative de la constante a et de l'exposant b de la loi puissance $Q_s=aQ^b$.(MEDDI, M.2002)

En somme, l'ampleur de l'érosion hydrique en Algérie a suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs qui ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes de ce phénomène et de quantifier les volumes des sédiments transportés et déposés dans les retenues des barrages.

Ces travaux constitués sans conteste une référence incontournable et présente des informations significatives sur l'érosion des bassins versants algériens et les flux des matières transportées par les réseaux hydrographiques drainant ces bassins.

I-6 Conclusion :

L'érosion hydrique des sols ne correspond pas à une quantité facilement mesurable. Il est a priori plus facile d'estimer cette quantité qui dépend de plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques. Une approche qui considère certaines grandeurs facilement mesurables liées à ce phénomène permet une quantification des pertes en sol par l'érosion hydrique. L'intérêt pour l'étude des transports solides se manifeste à cause de leurs répercussions sur les infrastructures économiques : envasement des retenues de barrages, des ports, rehaussement des lits des oueds, colmatage des réseaux d'irrigation.

Dans les différentes études, des chiffres alarmants concernant à la fois la perte en terres exprimées en tonnes ou en hauteur de sols perdus (cm) sont cités.

Finalement, à notre travail Il est intéressant d'étudier le phénomène de l'amont à l'aval aussi bien sur le plan spatial que plan des facteurs en lien avec le déroulement du phénomène.



Chapitre II
Généralités sur les bassins
versants étudiés

Introduction

Ce chapitre, tente de définir le comportement des trois bassins étudiés, et de préciser comment les différents facteurs naturels interfèrent dans la genèse de l'écoulement de l'érosion et du transport solide.

I.1. Présentation des bassins versants :

Répartis sur trois grands ensembles hydrographiques distincts (la Seybouse, les hauts plateaux constantinois, et Chott Melrhir), les quatre bassins étudiés se situent dans le Nord-est algérien entre 34°49' et 36° 57' latitude nord, et 5° 31' et 7° 59' de longitude. Il s'agit des bassins d'Oued Bouamdane sur le versant méridional de l'atlas Tellien, Oued El Gueiss, Oued El Hai et Oued El Arab situés sur les versants de la chaîne montagneuse des Aurès (figure 12).

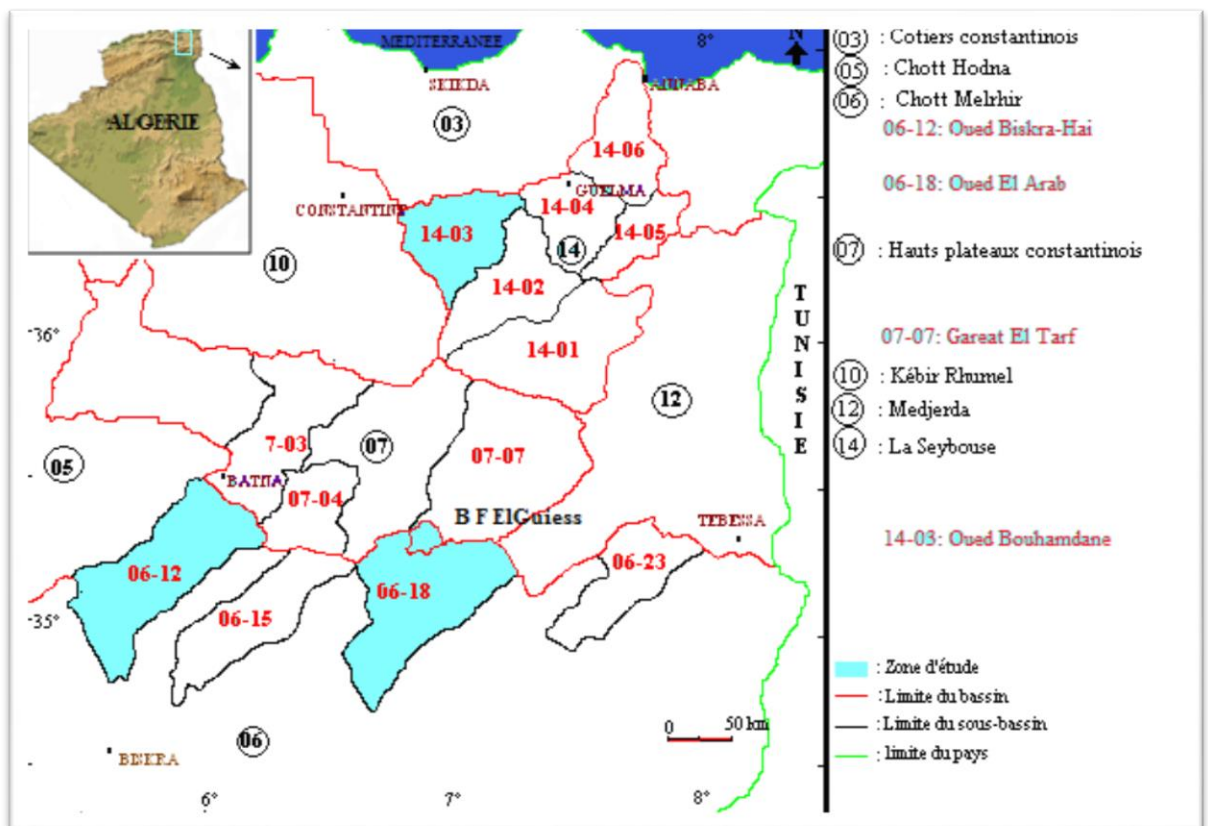


Figure 12 : Situation géographique de la zone d'étude

II.2 Relief et Morphométrie :

Le relief de la zone d'étude dans son ensemble se caractérise, du Nord au Sud, par son organisation en éléments quasiment parallèles, que l'hydrographie a souvent entrecoupés de façon perpendiculaire.

Les différents paramètres morpho métriques d'un bassin versant notamment, la surface, le périmètre, la forme, les altitudes caractéristiques, la pente, et le relief, interviennent et souvent

de façon combinée dans les modalités de l'écoulement liquide et solide, donc il convient de les préciser dès le début de toute étude :

- La surface et le périmètre d'un bassin versant sont des dimensions importants à connaître car elles sont à la base de tous les calculs hydraulique, ces paramètres sont déterminées par digitalisation des limites sur les cartes topographiques à l'aide du programme SIG »MAPINFO «.

- L'indice de compacité de Gravelius est défini comme le rapport du périmètre stylisé du bassin au périmètre d'un cercle ayant la même surface exprime la forme du bassin versant il est en fonction de la surface du bassin et son périmètre a été déterminée par la relation suivante :

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

P : périmètre du bassin versant (km)

A : superficie du bassin versant (km²)

Si : Kc=1 ;le bassin versant est ramassé

Kc>1 ;le bassin est allongé

Le rectangle équivalent correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant .il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique.

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

Avec : K_C, indice de compacité de Gravelius

A, surface du bassin versant (km²)

P, périmètre du bassin versant (km)

L'altitude moyenne est donnée par l'équation suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A}$$

Avec : A_i , aire comprise entre deux courbes de niveau (km²)

h_i , altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A, superficie totale du bassin versant (km²)

- L'altitude max et min obtenues directement à partir des cartes topographiques .l'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

- La longueur du cours d'eau principale est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a embranchement de dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant.

-L'indice de pente de roche déterminé par la formule suivante :

$$\left| i_p = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^n \left(x_i \times \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right) \right|$$

Avec : i_p , indice de pente (%)

L, longueur du rectangle (m)

x_i , distance qui sépare deux courbes sur la rectangle (m)

d, distance entre 2 courbes de niveau successives (peut être variable) (m)

d/ x_i , pente moyenne d'un élément (%).

- La densité de drainage est le rapport de la longueur totale des cours d'eau contenus dans un bassin versant à la surface de ce dernier.la mesure de ce paramètre suppose la reproduction de tous les affluents du bassin quel que soit leur ordre est donnée par la formule suivante :

$$Dd=L/A$$

L : longueur totale des cours d'eau (km)

A : Surface du bassin (km²)

- Le temps de concentration c'est le temps mis par une particule d'eau tombée sur le point le plus éloignée du bassin versant pour arriver à l'exutoire.

La récapitulative de ces différents paramètres morfo métriques et hydrographiques des bassins étudiés aux stations hydrométriques est représentées dans le tableau02.

| Caractéristique | Paramètre | unité | symbole | Valeurs | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------|---------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| | | | | Bouhamdane | El Hai _(st) | AlArab _(st) | ElGeiss _(st) |
| Morphologie du bassin versant | Superficie | Km ² | A | 1105 | 1170 | 2083 | 144 |
| | Périmètre | Km | P | 140 | 150 | 258 | 48 |
| | Indice de compacité | - | KC | 1.23 | 1,23 | 1.58 | 1.12 |
| | Longueur du rectangle équivalent | Km | L | 46 | 52,9 | 110,08 | 19 |
| Relief | Altitude maximale | M | Hmax | 1281 | 2150 | 2326 | 2160 |
| | Altitude minimale | M | Hmin | 270 | 520 | 190 | 980 |
| | Altitude moyenne | M | Hmoy | 785 | 1209 | 1054 | 1305 |
| | Indice de pente de roche | % | Ip | 0.13 | 0,16 | 1.15 | 0.28 |
| Réseau hydrologique | Longueur du thalweg Principale | Km | Lp | 90 | 66 | 123 | 19 |
| | Densité de drainage | Km/km ² | Dd | - | - | 4.8 | 2.7 |
| | Temps de concentration | Heurs | TC | 14.73 | 11.23 | 15.61 | 5.3 |

⁽¹⁾: valeur calculée pour une superficie de 1103 km² contrôlée par le barrage de Bouhamdane

⁽²⁾: valeur calculée par l'ANRH pour une superficie de 1777 KM² contrôlée par le barrage Fontaine des gazelles

Tableau 02 : caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins d'étude aux stations hydrométriques

Dans notre région d'étude une différence superficie et périmètre des sous bassins. Les valeurs de l'indice de compacité (tableau 02) montrent que les bassins des oueds Bouhamdene, Al Arab, El Hai et El Guieess sont les plus compactes ($Kc > 1$), alors que les bassins sont des formes allongées, ce qui traduit un temps de parcourt assez long favorisant une érosion linéaire et régressive.

L'indice de pente dans les quatre sous bassins est faible ($< 6\%$) à vitesse faibles, elles se localisent au niveau des plaines et des vallées.

Les résultats de la Densité de drainage indiquent que nos sous bassins versants sont en général assez bien drainés.)

II-3) Réseau hydrographiques

La zone d'étude appartient à trois grands domaines hydrographiques différents du point de vue : organisation et orientation des chevelus hydrographiques, densité de drainage, exutoire, alimentation et réponse hydrologique du milieu récepteur : Le bassin exoréique de la Seybouse, Le bassin endoréique des hauts plateaux constantinois et le bassin endoréique de Chott Melrhir.

II-3-1) Le bassin de l'Oued Bouhamdene

L'Oued Bouhamdene résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'Oued Sabath et l'Oued Zenati, dont la confluence lui donne naissance à l'Oued Bouhamdene et reçoit en aval sur sa rive gauche l'Oued El Hamira.

L'Oued Zenati, naît de la confluence de l'Oued M'leh qui prend sa source à Djebel Oum Settas, et Chaâbet Touifsa qui prend sa source à Kef Ed Deb. Cet Oued reçoit sur sa rive gauche Oued Skoum, Oued Terba, Oued El Gloub et Chaâbet Mrassel (Benchaiba, 2006).

L'Oued Sabath résulte aussi de la jonction de deux Oueds : El Aria qui prend sa source à Djebel El Aria et Oued Derdar qui prend naissance à partir de la confluence de l'Oued Mergoum et Chaâbet Es Sekek (Mansouri, 2009).

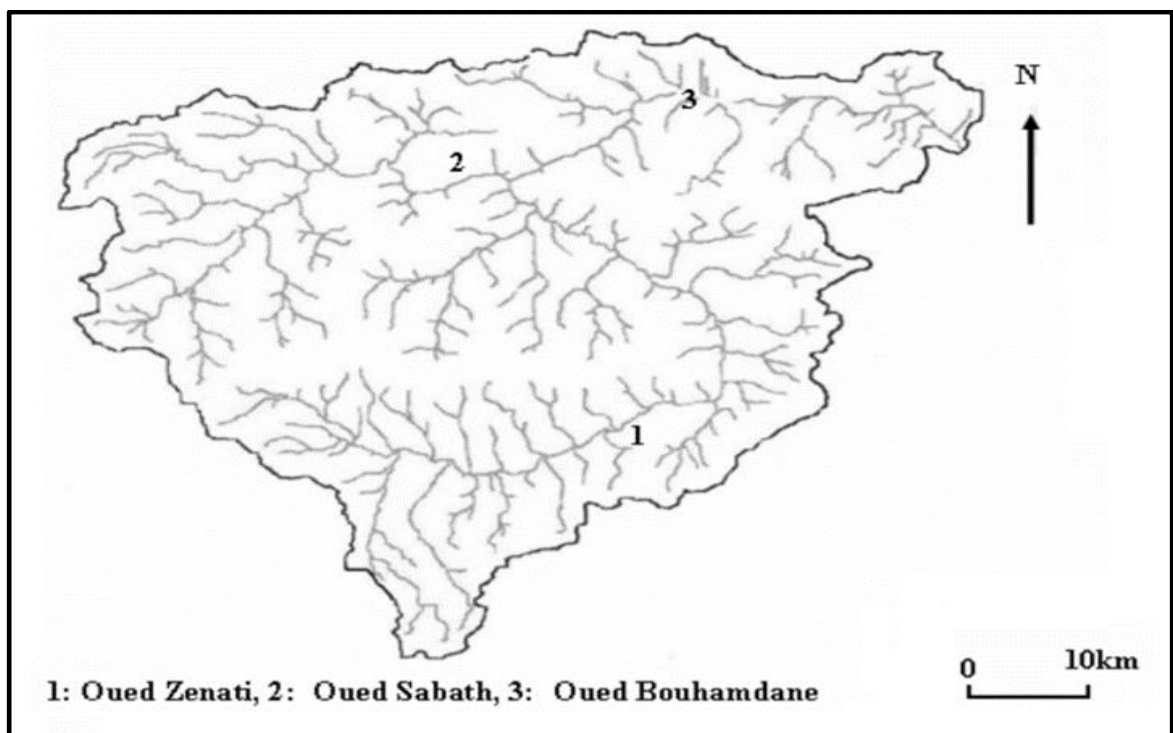


Figure 13 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued Bouhamdene (Mansouri, 2009).

II-3-2) Le bassin de l'Oued El Gueiss

Le bassin de l'Oued El Gueiss fait partie du système hydrographique endoréique de Gareat El Tarf . l'Oued El Gueiss est l'un des principaux Oueds constituant le réseau hydrographique de ce bassin (ElGueiss, Innfifen, El Hammam, Baghai, El Aimer,Alissaour, Nini, Oulmene et El Hassi) qui se déversent tous dans Gareat et Tarf ;tandis que d'autres cours d'eau aboutissent sur des surface planes au niveau du bassin versant. C'est un oued permanent qui sort du djebel Noughiss, traverse ensuite un massif montagneux boisé et entre dans la plaine au défilé de Foum El Gueiss au moment où il est traversé par la route de Khenchela pour se jeter dans la Gareat El Tarf sous le nom d'oued Marouf. Les oueds qu'il reçoit sont nombreux (Dali, 2009).

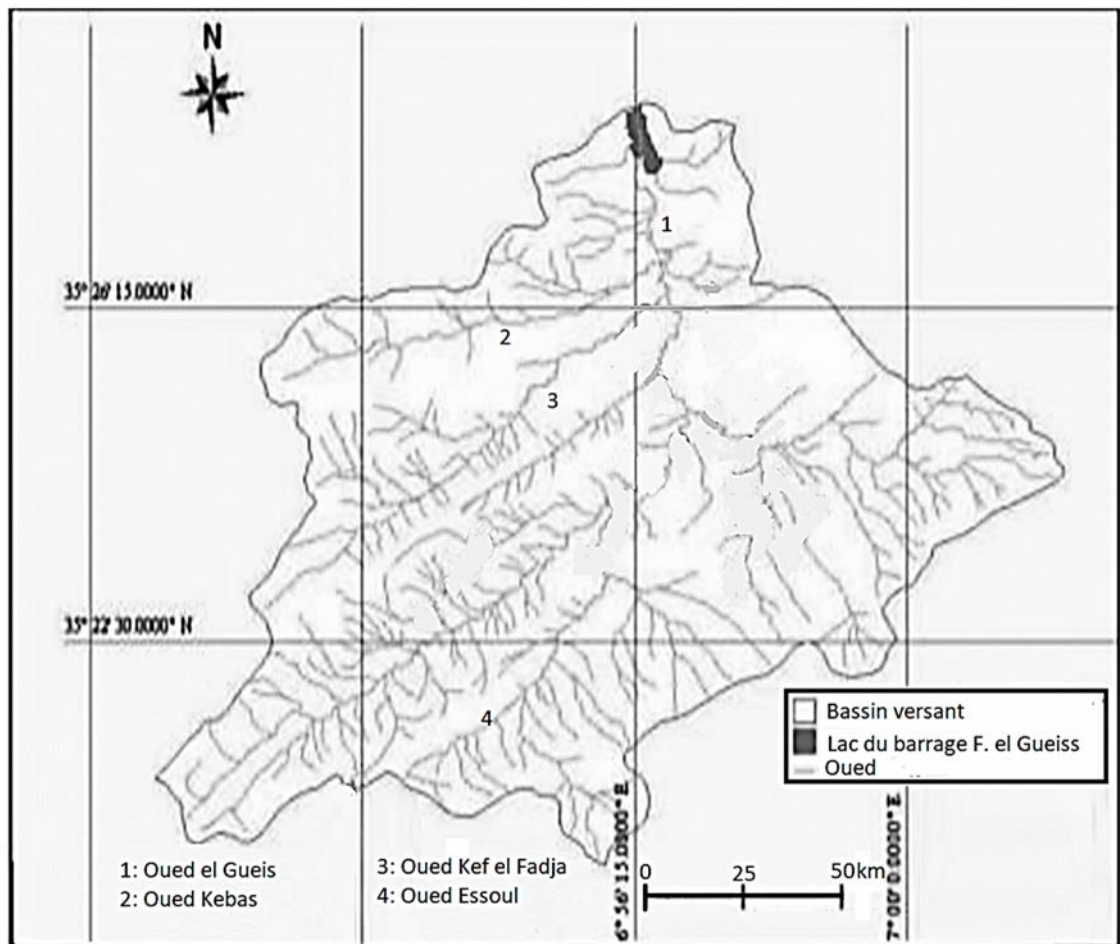


Figure 14 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued El Gueiss (Lakhdari et al., 2013)

II-3-3) Le bassin de l'Oued El Arab

C'est un réseau dendritique dont l'Oued El Arab résulte de la confluence de l'Oued Mellagou et de l'Oued El Abiod - À ne pas confondre avec l'Oued El Abiod qui traverse Arris - qui prennent leurs sources respectivement au Djebel Chélia et au Djebel Aïdel. Son tracé à l'Est, est la limite exacte du massif qui le délimite des monts des Nememchas. Il draine pratiquement tout le flanc est du massif. Cet Oued à écoulement permanent qui a justifié d'ailleurs la construction du barrage de Babar (Meharzi, 2010).

Les affluents d'Oued El Arab présente une grande déclivité à déclivité a sa partie amont (Oued Tamagra, Oued el Tatiba).

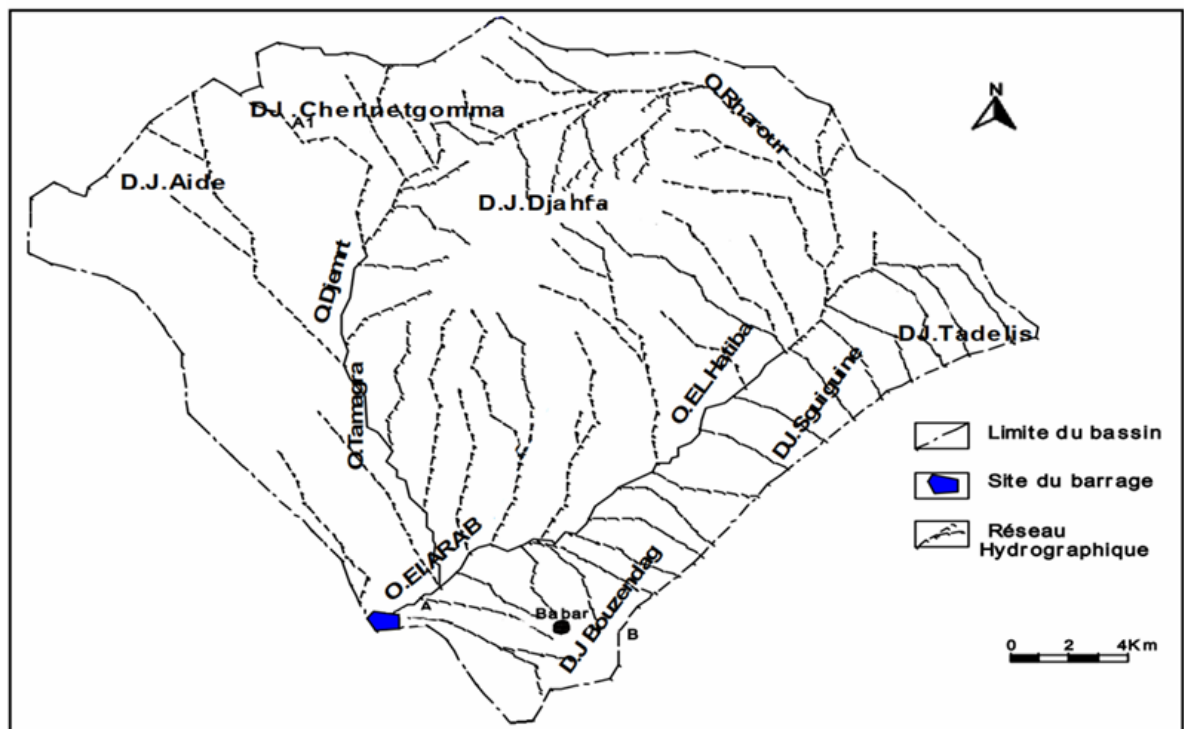


Figure 15 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued El Arab (Aouachria, 2008)

II-3-4) Le bassin de l'Oued El Hai

Le réseau hydrographique de ce bassin est caractérisé par deux principaux affluents forment plus bas Oued El Hai. Il s'agit de l'Oued Fedhala caractérisé par des affluents (Oued Bouaioun et Oued Tafrent) alimentés par des sources naturelles et Oued Tilatouqui prene sa sources au Djebels Ich Ali et Tuggrut.

En général le réseau hydrographique l'Oued El Hai dans sa plus grande partie est caractérisé par un écoulement périodique durant la saison pluvieuse (Kerboub., 2012).

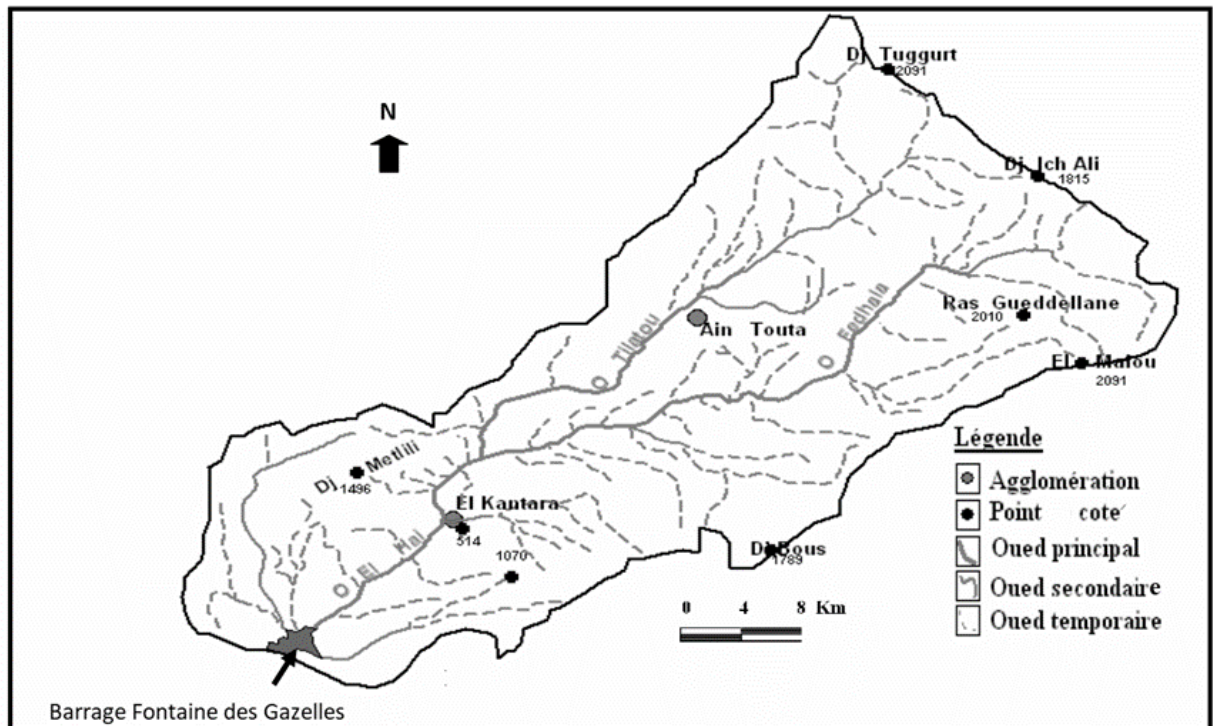


Figure 16 : Réseaux hydrographique du bassin versant de l'Oued El Hai (Kerboub., 2012)

II.4 Caractéristiques climatiques :

Plus que d'autres facteurs, le climat est le facteur le plus déterminant des ressources en eau d'une région. Les **caractéristiques** climatiques dans leur ensemble permettent d'expliquer quantitativement l'intensité et la variabilité des composantes du régime hydrologique, dans le temps et dans l'espace, en interaction avec les conditions physico-géographiques de l'écoulement. (BOUKLIKHA Z.BERRICHI M.2017) .

En effet, les températures et les précipitations constituent les deux facteurs prépondérants dans la caractérisation climatique d'une région , L'effet combiné de ces conditions climatiques et des paramètres physiques (oro hydrographiques, morphologiques, lithologiques et

biogéographiques) commande le comportement hydrologique des cours d'eau (oueds) et l'alimentation des nappes d'eau souterraines.. (BOUKLIKHA Z.BERRICHI M.2017).

II.4. 1 La pluviométrie :

La pluviométrie, constitue le facteur essentiel car générateur de l'écoulement superficiel à toutes les échelles de temps ,elle est l'une des variables climatiques fondamentales à prendre en compte pour toute étude traitant de la gestion des ressources en eau, et demeure le facteur le plus important dans la détermination de l'abondance fluviale (Loumari A.2013).Elle conditionne le maintien de la répartition du couvert végétal une part, et la dégradation du milieu naturel par le phénomène d'érosion hydrique d'autre part.

Il est important donc de caractériser ce facteur de manière aussi précise et détaillée que possible. Toute étude climatique ou hydrologique est basée sur l'exploitation des séries de données pluviométriques recueillies pendant des périodes plus ou moins longue et communes à toutes les stations.

Ceci nous a conduits à retenir 14 postes pluviométriques représentatifs de l'ensemble de notre zone étude.

| Bassin | Station | Code ANRH | équipement | Coordonnées Lambert (km) | | Altitude (m) |
|------------------|--------------------|-----------|------------|--------------------------|--------|--------------|
| | | | | X | Y | |
| El Hai | Ain touta | 61203 | PV | 790 ,10 | 235,9 | 917 |
| | Oued chelih | 61211 | PV | 799,4 | 252,6 | 1180 |
| El Arab | Boudella | 61802 | PV | 877,9 | 203,9 | 750 |
| | Bou hamama | 61803 | PV | 867,00 | 228,5 | 1140 |
| | Babar | 61804 | PV /PG | 901,1 | 217,0 | 1100 |
| | Kheirane | 61805 | PV /PG | 870,55 | 197,1 | 560 |
| | Kh Sidi Nadji | 61806 | PV | 866,3 | 175,8 | 105 |
| El Guiness | Tizi Ala | 70703 | PV | 887,2 | 241,4 | 1345 |
| | Ain Mimoun M F | 70704 | PV /PG | 886,35 | 243,6 | 1180 |
| | F.El Guiness BGE | 70720 | PV /PG | 884,5 | 250,15 | 950 |
| Bouham- -dane | Bordj Sabath | 140302 | PV | 889,1 | 355,1 | 525 |
| | Elaria (B.Badiss) | 140304 | PV | 870,85 | 343,1 | 807 |
| | Ras El Akba | 140309 | PV /PG | 905,7 | 350,9 | 740 |
| | Medjez Ammar PV | 140313 | PV | 913,4 | 359,1 | 295 |

Tableau 03 : Stations pluviométriques des bassins étudiés (ANRH)

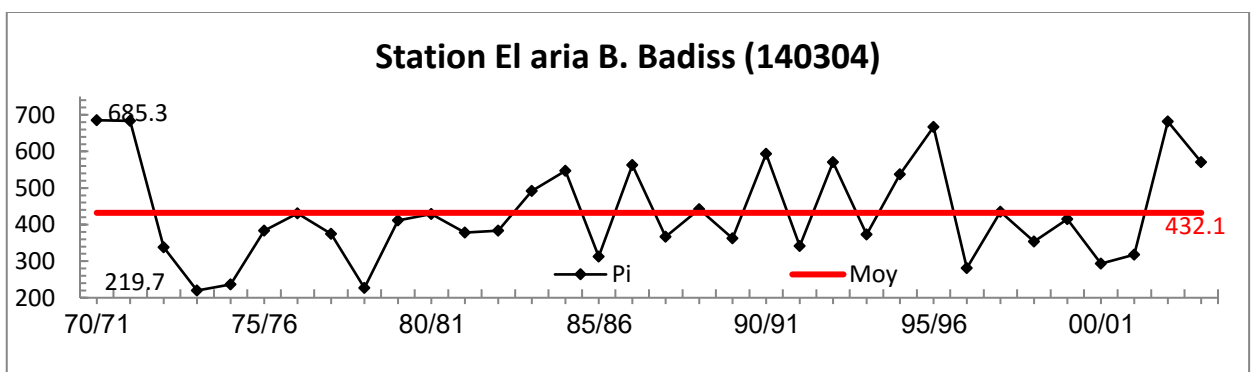
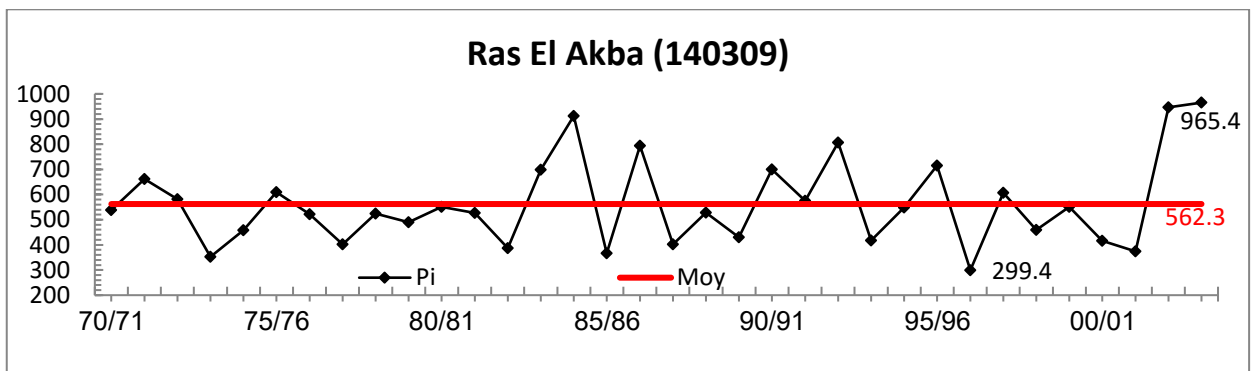
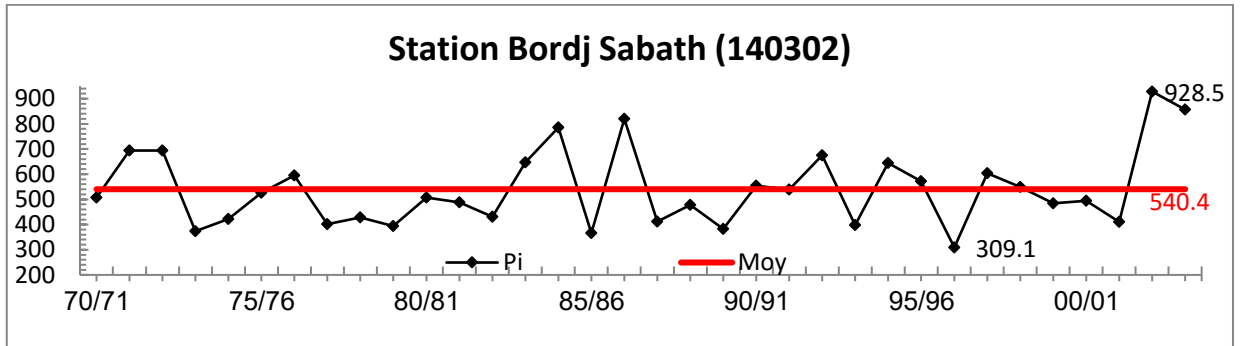
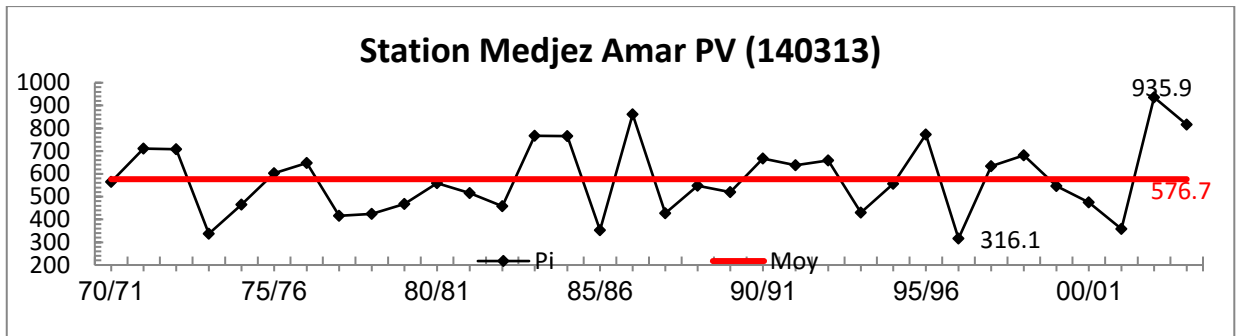


Figure 17 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued Bouhamdane (1970-2004)

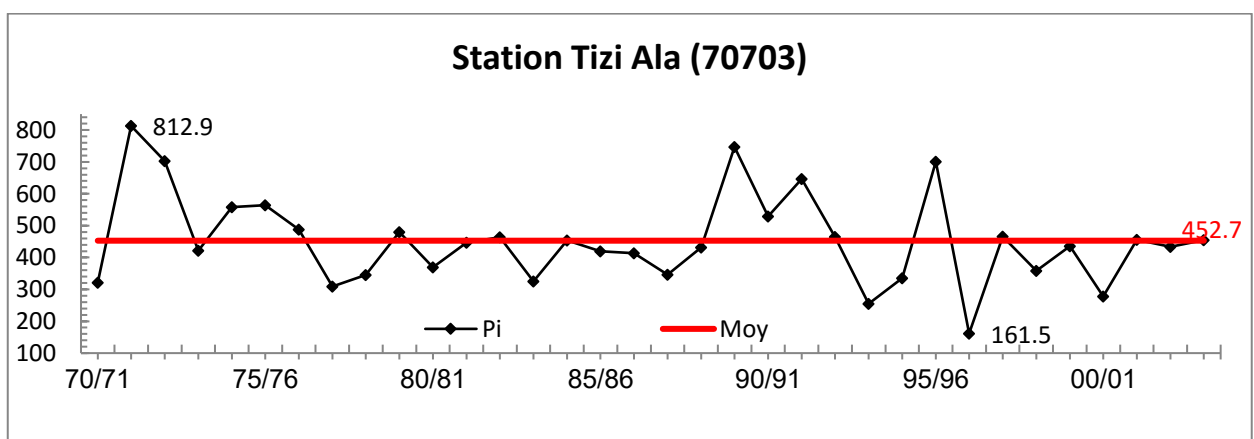
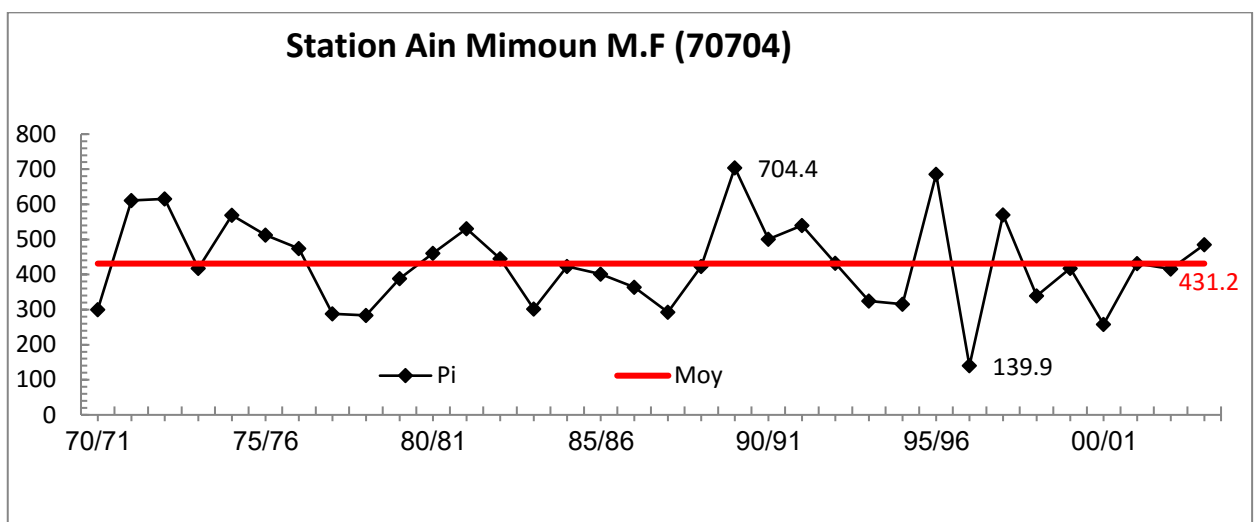
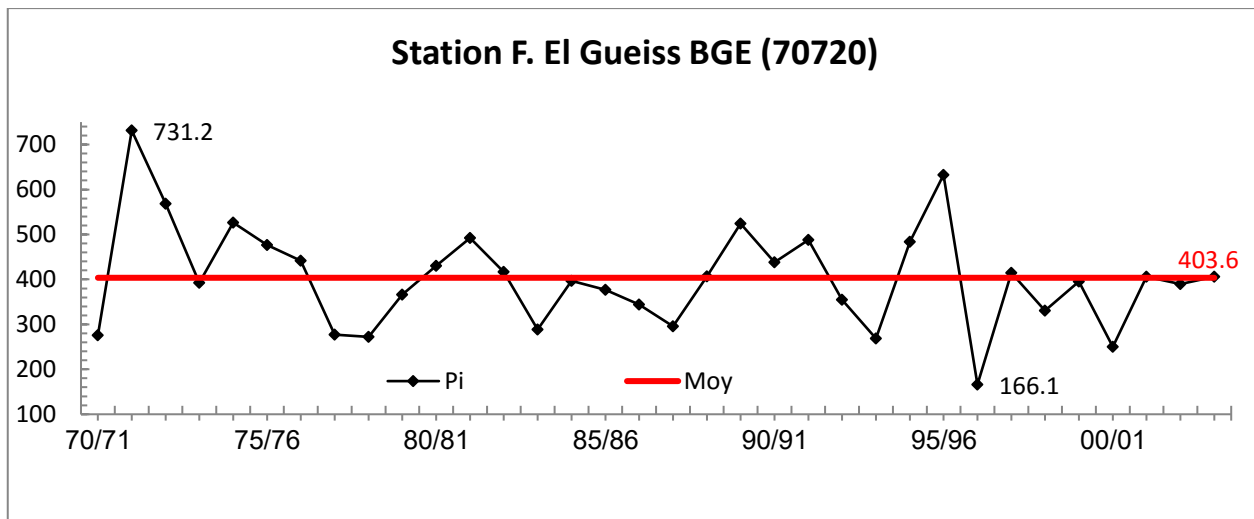


Figure 18 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued El Gueiss (1970-2004)

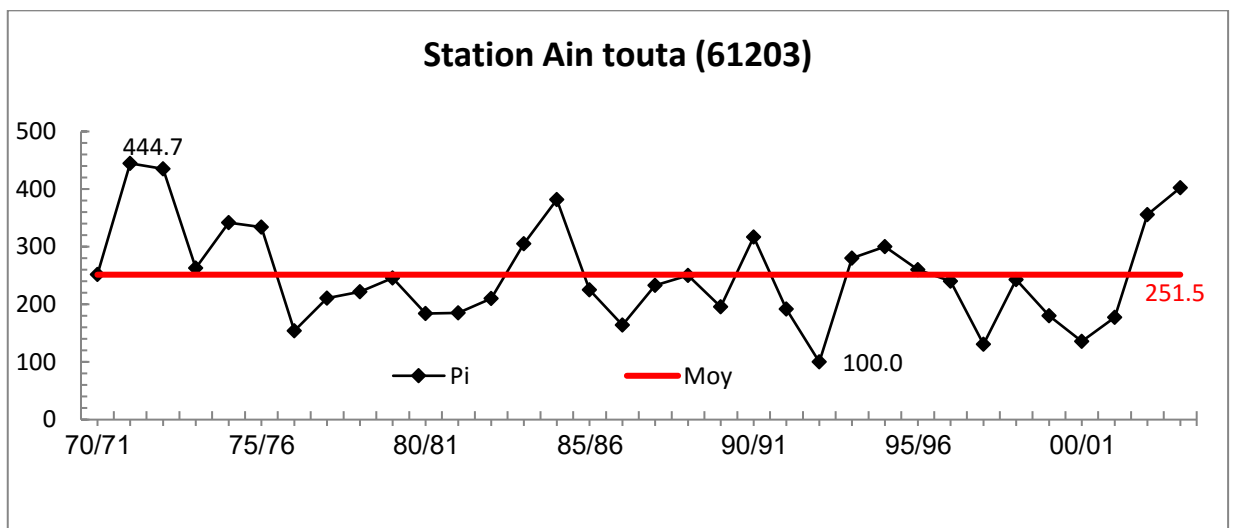
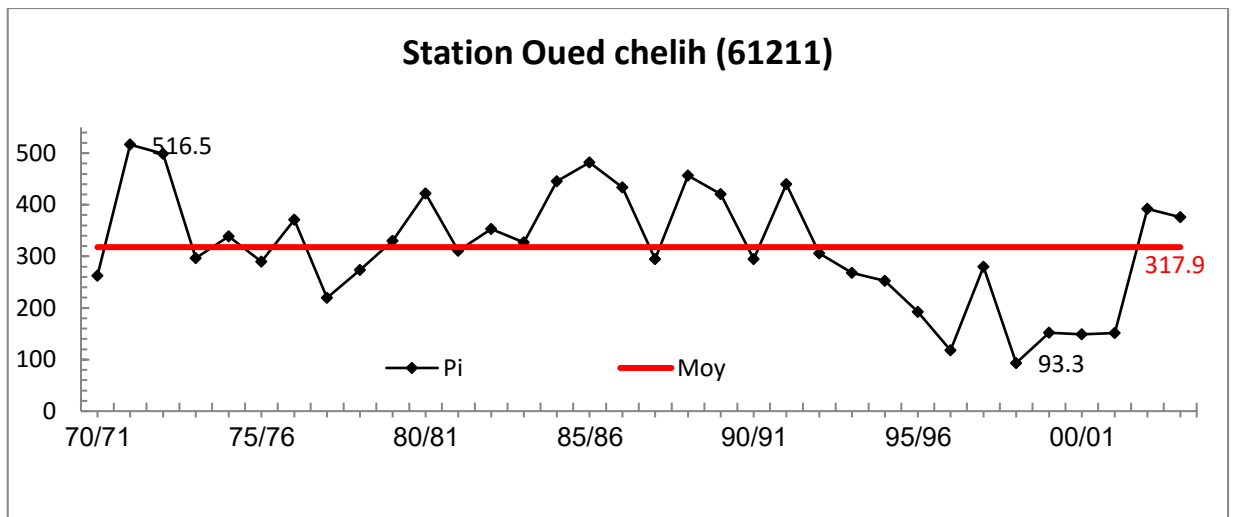
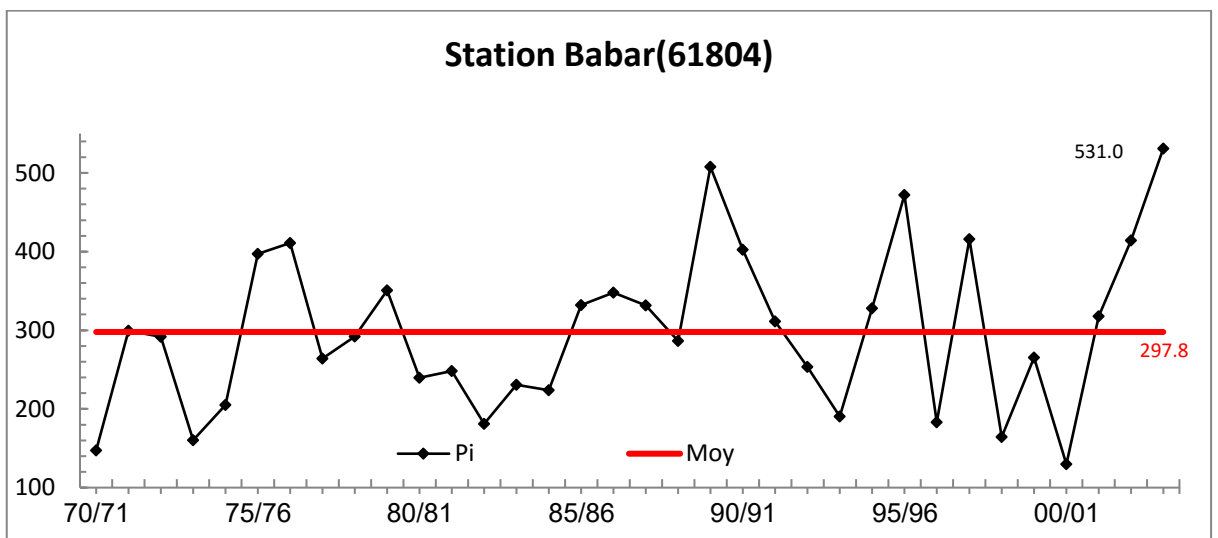
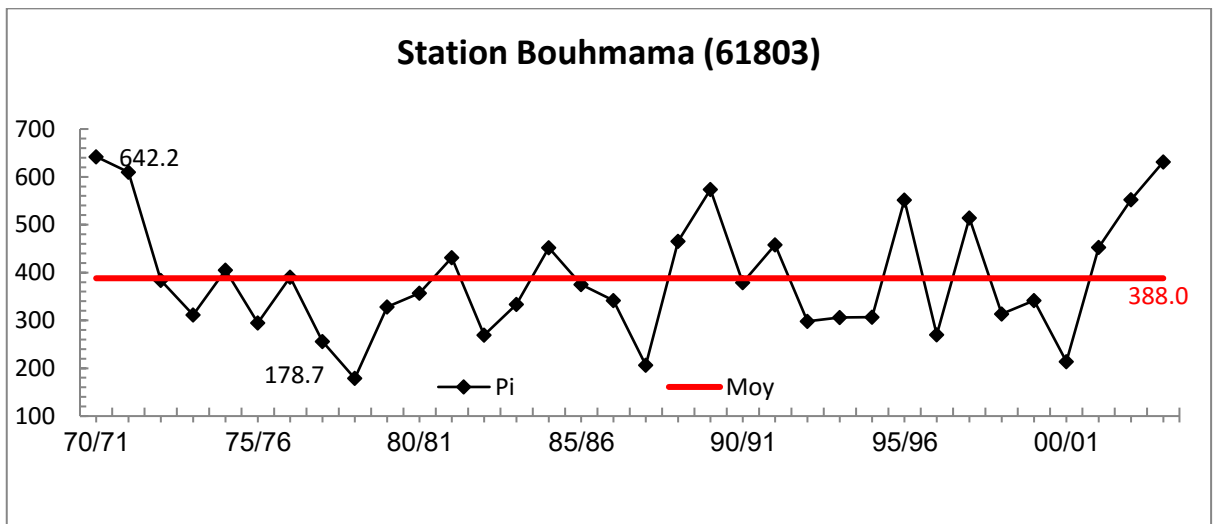
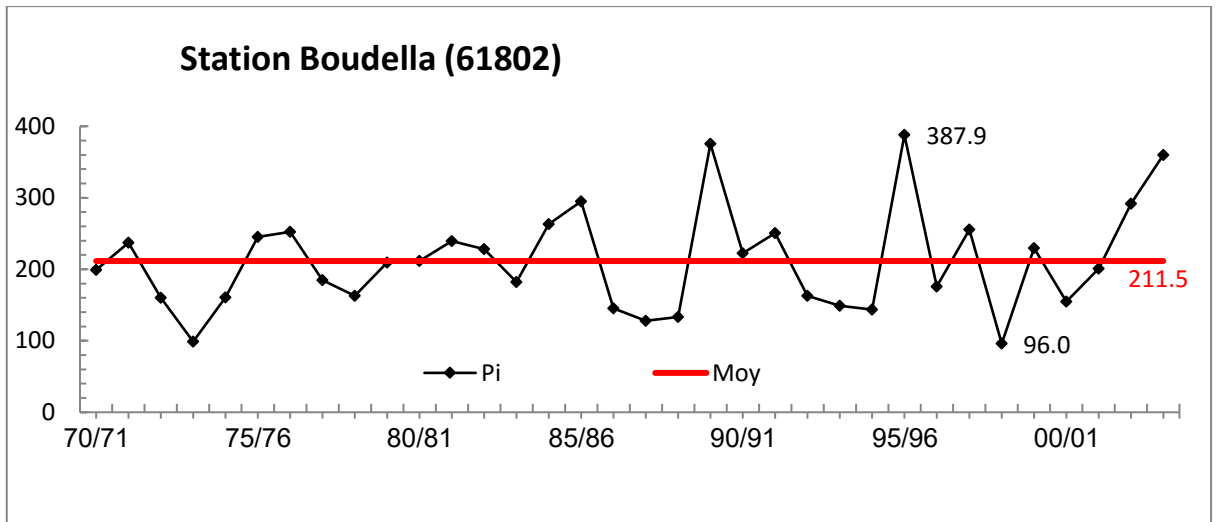


Figure 19 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued El Hai (1970-2004)



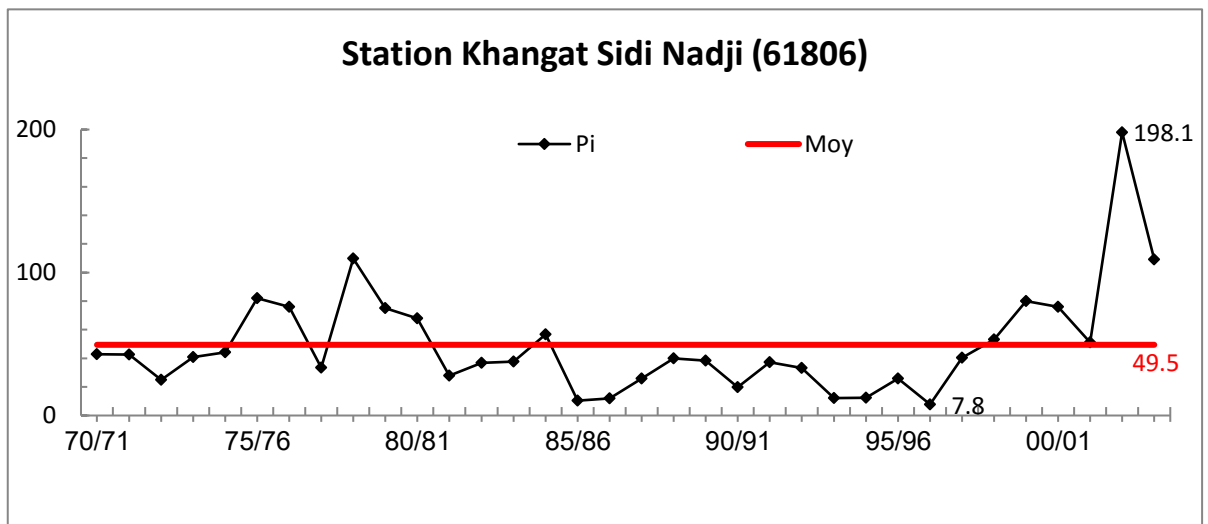
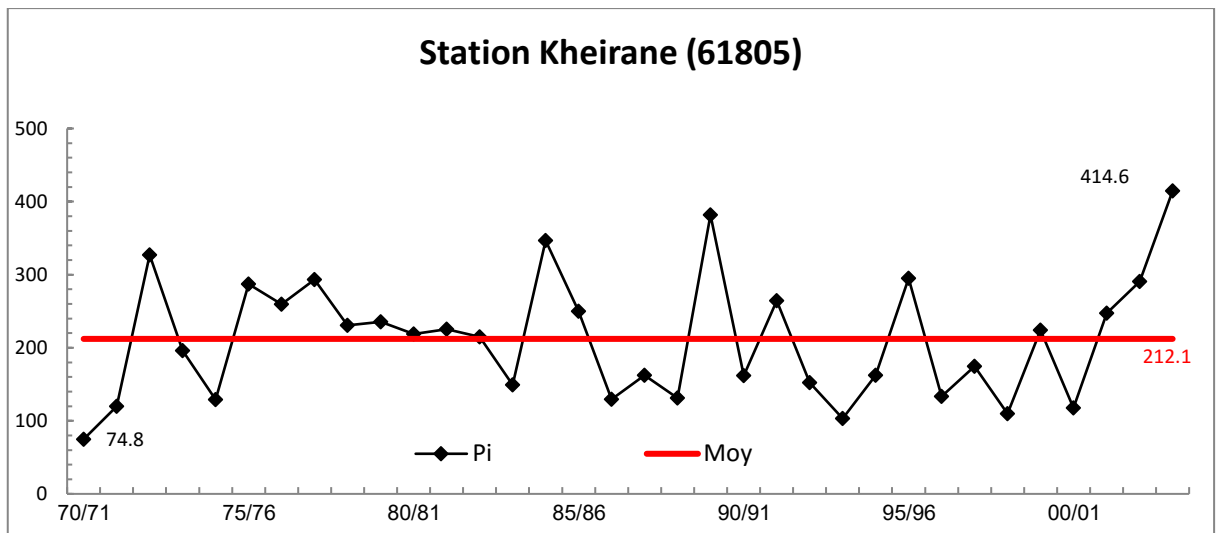


Figure 20 : Variations interannuelles des précipitations, bassin versant Oued El Arab (1970-2004)

La connaissance de la moyenne pluviométrique annuelle est nécessaire pour effectuer une étude d'abondance, de variabilité et d'évolution. L'observation minutieuse des figures 17, 18 et 19 de la variation interannuelle des précipitations nous permet de dégager les tendances générales de la variation et l'évolution de la pluviométrie annuelle. Ceci met avant tout en évidence la très grande variabilité pluviométrique. Autre élément notable de cette chronique, la succession totalement aléatoire et à très peu d'intervalle de temps, d'années très contrastées (figures 17, 18, 19 et 20)

Les valeurs du coefficient de variation annuelle de (14) stations du bassin, oscillent entre 0,3 et 0,8, en fonction du domaine climatique (tableau 04).

| Station | | sep | oct | nov | dec | jan | fev | mar | avr | mai | jui | juil | aou | année |
|------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Ain touta | P | 24.2 | 28 | 32.6 | 27 | 26.1 | 14, | 20,5 | 18,6 | 27 | 20,5 | 8,4 | 4,7 | 251,5 |
| | & | 16,9 | 42 | 26,1 | 16,2 | 23,5 | 11,9 | 16,4 | 11,2 | 27 | 20,5 | 13,4 | 5,2 | 86,5 |
| | c.v | 0.7 | 36.4 | 1.5 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 1 | 1 | 1.6 | 1.1 | 0.3 |
| Oude chelih | P | 36.4 | 26.2 | 33.9 | 36.8 | 29.6 | 28.8 | 33.3 | 32.8 | 26.8 | 13.3 | 4.7 | 15.4 | 317.9 |
| | & | 28.5 | 26 | 30.1 | 30.1 | 23.9 | 23.7 | 25.6 | 25 | 27.7 | 14.8 | 9 | 20.5 | 111.9 |
| | c.v | 0.8 | 1 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1 | 1.1 | 1.9 | 1.3 | 0.4 |
| boudelh | P | 21.6 | 25.2 | 20.5 | 13.1 | 13.1 | 15.7 | 27.3 | 24.5 | 25.4 | 10.3 | 4.6 | 10.2 | 211.5 |
| | & | 19.2 | 22.8 | 20.3 | 12.4 | 15.8 | 15.8 | 24.8 | 23.3 | 26.3 | 10.2 | 7.9 | 10.5 | 72.4 |
| | c.v | 0.9 | 0.9 | 1 | 1 | 1.2 | 1 | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1.7 | 1 | 0.3 |
| bouhmam | P | 37.6 | 31.9 | 40.4 | 33.8 | 37.8 | 34.2 | 42.8 | 32.8 | 34.1 | 25.5 | 16.3 | 22 | 388 |
| | & | 37.2 | 23.6 | 33.1 | 33 | 39.4 | 29.4 | 27.8 | 31.5 | 26.9 | 26 | 27.3 | 27.5 | 123.6 |
| | c.v | 1 | 0.7 | 0.8 | 1 | 1 | 0.9 | 0.7 | 1 | 0.8 | 1 | 1.7 | 4.2 | 0.3 |
| Babar | P | 35.8 | 28.2 | 26.6 | 18.4 | 19.3 | 23.4 | 33.6 | 24.7 | 30.4 | 22.6 | 13.9 | 21 | 297.8 |
| | & | 33.9 | 25.1 | 25.1 | 15.9 | 19.6 | 22.9 | 28.3 | 19.6 | 31.8 | 22.2 | 18.5 | 24.5 | 103.5 |
| | c.v | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1 | 1 | 0.8 | 0.8 | 1 | 1 | 1.3 | 1.2 | 0.3 |
| kheirane | P | 25.8 | 25.1 | 25.1 | 13.6 | 13.4 | 16.5 | 23 | 17.8 | 26.5 | 13.6 | 3.9 | 7.8 | 212.1 |
| | & | 23.4 | 23.8 | 28.9 | 17.5 | 20.1 | 16.6 | 25.1 | 15.9 | 34.5 | 161 | 7.7 | 13.3 | 84.8 |
| | c.v | 0.9 | 0.9 | 1.2 | 1.3 | 1.3 | 1 | 1.1 | 0.9 | 1.3 | 1.2 | 2 | 1.7 | 0.4 |
| Kh.S .Nadji | p | 6.1 | 9.5 | 4.9 | 4 | 6.2 | 3 | 2.4 | 4.5 | 4.7 | 1.7 | 0.3 | 2.2 | 49.5 |
| | & | 7.9 | 11.2 | 6.7 | 6.8 | 19.2 | 5.3 | 3.6 | 6.8 | 7.8 | 3.2 | 1.4 | 6.4 | 37.2 |
| | c.v | 1.3 | 1.2 | 1.4 | 1.7 | 3.1 | 1.8 | 1.5 | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 4.5 | 2.9 | 0.8 |
| Tizi Ala | p | 47.6 | 34.7 | 46.8 | 47.2 | 35.7 | 40.8 | 44.7 | 46.3 | 42.6 | 26.1 | 14.6 | 20.6 | 452.7 |
| | & | 32.9 | 24.1 | 21.8 | 20 | 17.9 | 16.5 | 15.5 | 14.8 | 14.3 | 14.1 | 15 | 14.9 | 143.1 |
| | c.v | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 1 | 0.7 | 0.3 |
| Ain.Mimoun M .F | p | 35.2 | 38.6 | 42.6 | 38.6 | 35.8 | 37.2 | 55.1 | 43.2 | 45.9 | 22.3 | 11.6 | 25.1 | 431.2 |
| | & | 27 | 30.2 | 31.8 | 39.5 | 36.9 | 30.7 | 40 | 35.5 | 35.3 | 24 | 13.7 | 28.5 | 127.3 |
| | c.v | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 1 | 1 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 0.3 |
| F . ElGueiss B E G | p | 38 | 36 | 38.8 | 43.2 | 32.5 | 34.3 | 46.9 | 38.3 | 40.4 | 28.6 | 9.7 | 16.8 | 403.6 |
| | & | 27.6 | 22 | 19.4 | 18.1 | 16.2 | 14.9 | 14.8 | 13.9 | 13.3 | 12.8 | 14.2 | 14.3 | 114.6 |
| | c.v | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 1.5 | 0.8 | 0.3 |
| Borj sabath | p | 35.3 | 40.3 | 55 | 85.8 | 80.4 | 65.6 | 57.6 | 53 | 40.9 | 14.3 | 3.7 | 8.5 | 540.4 |
| | & | 29.5 | 28.9 | 49.1 | 79.9 | 67.2 | 52.6 | 39.8 | 34.4 | 31.8 | 18.5 | 5.9 | 9.9 | 152.7 |
| | c.v | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 1.3 | 1.6 | 1.2 | 0.3 |
| El Aria (B.Badiss) | p | 12 | 34.7 | 35.3 | 53.5 | 78.7 | 53.3 | 46.4 | 52.1 | 42.2 | 13.4 | 4.4 | 6.1 | 432.1 |
| | & | 20.2 | 22.9 | 26.4 | 47.4 | 63 | 40.6 | 23.2 | 44.2 | 37.4 | 19.5 | 6 | 8 | 134.5 |
| | c.y | 1.7 | 0.7 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 0.3 |
| Ras el akba | p | 25 | 41.8 | 68.3 | 88.5 | 80.8 | 66.4 | 51.7 | 50.5 | 48.1 | 23.2 | 7.3 | 10.7 | 562.3 |
| | & | 25.6 | 41.8 | 55.1 | 99.8 | 64.4 | 56.5 | 30.4 | 34.4 | 40.4 | 35 | 12.1 | 16.1 | 172.7 |
| | c.v | 1 | 0.8 | 0.8 | 1.1 | 0.8 | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 0.3 |
| Medjez Amar P V | p | 40.5 | 46.9 | 64.1 | 81.8 | 85.4 | 67.2 | 54.9 | 56.2 | 43.5 | 21.6 | 4.8 | 9.9 | 576.7 |
| | & | 31.8 | 34.9 | 57.8 | 70.9 | 57.7 | 53.2 | 28.8 | 36.7 | 33.4 | 24.6 | 8.3 | 12.6 | 158.2 |
| | c.v | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 1.1 | 1.7 | 1.3 | 0.3 |

Tableau 04 : Moyenne, écart-type, et coefficient de variation de la série Pluviométrique (1970-2004).

Afin de caractériser la pluviosité propre à chaque année, il convient de tenir compte de " l'écart à la moyenne " correspondant à l'excédent ou au déficit de précipitations de l'année considérée, rapporté à la moyenne interannuelle ; Nous avons relevé toutes les années pluviométriques extrêmes humides et sèches (tableau 04).

A titre d'exemple, l'année la plus pluvieuse de la série est 2003/04 à Babar avec un écart à la moyenne de 78% et à Ras El Akba avec un écart à la moyenne de 72%, et 1971/72 à Foum El Gueiss avec un écart à la moyenne de 81%. Par contre, l'année 2000/01 est l'année la plus sèche à Babar, son déficit pluviométrique par rapport à la moyenne est de -56% ; A Ras El Akba et Foum El Gueiss à fut l'année 1976/77 avec un déficit pluviométrique respectivement de -47% et -59%.

L'écart à la moyenne de ces années extrêmes sèches et humides est très élevé (-84% à 301%) dans la partie sud du bassin de l'Oued el Arab (station de Khangat Sidi Nadji, il est moins atténué dans le bassin de l'Oued Bouhamdane à la station Medjez Amar (-43% à 92%).

| | El aria | Ras el akba | Bordj sabath | Medjez amar | Babar | Khe iran e | Oue d cheli h | Boude lla | Khsi di Nadji | Ain mimou nm.f | Tizi Ala | F.elG ueissB ge | Bouh mam ma | Ain touta |
|--------------------|---------|-------------|--------------|-------------|-------|------------|---------------|-----------|---------------|----------------|----------|-----------------|-------------|-----------|
| Min | 219,7 | 299,4 | 309,1 | 316,1 | 129,7 | 74,8 | 93,3 | 96,0 | 7,8 | 139,9 | 161,5 | 166,1 | 178,7 | 100,0 |
| Max | 685,3 | 965,4 | 928,5 | 935,9 | 531,0 | 414,6 | 516,5 | 387,9 | 198,1 | 704,4 | 812,9 | 731,2 | 642,2 | 444,7 |
| Moy | 432,1 | 562,3 | 540,4 | 576,7 | 297,8 | 212,1 | 317,9 | 211,5 | 49,5 | 431,2 | 452,7 | 403,6 | 388,0 | 251,5 |
| écart à la moy_min | -49 | -47 | -43 | -45 | -56 | -65 | -71 | -55 | -84 | -68 | -64 | -59 | -54 | -60 |
| écart à la moy_max | 59 | 72 | 72 | 62 | 78 | 95 | 62 | 83 | 301 | 63 | 80 | 81 | 66 | 77 |
| année(min) | 73/74 | 96/97 | 96/97 | 96/97 | 00/01 | 70/71 | 98/99 | 98/99 | 96/97 | 96/97 | 96/97 | 96/97 | 78/79 | 92/93 |
| année(max) | 70/71 | 03/04 | 02/03 | 02/03 | 03/04 | 03/04 | 71/72 | 95/96 | 02/03 | 89/90 | 71/72 | 71/72 | 70/71 | 71/72 |
| max-min | 465,6 | 666,0 | 619,4 | 619,8 | 401,3 | 339,8 | 423,2 | 291,9 | 190,3 | 564,5 | 651,4 | 565,1 | 463,5 | 344,7 |
| max/min | 3,12 | 3,22 | 3,00 | 2,96 | 4,09 | 5,54 | 5,54 | 4,04 | 25,40 | 5,04 | 5,03 | 4,40 | 3,59 | 4,45 |

Tableau 05 : Écart à la moyenne des précipitations annuelle extrêmes (1970-2004)

On relève aussi une amplitude importante des valeurs pluviométriques, entre les même mois de la série étudiée, ceci est mis en évidence par le coefficient de variation. En effet, les coefficients les plus élevés sont ceux des mois d'été, avec un maximum en juillet de 1,6 à la station Ras El Akba, ce maximum s'élève à 4,5 à Khangat Sidi Nadji .Ces coefficients extrêmement élevés, s'expliquent par l'indigence pluviométrique d'une part, et le caractère orageux des précipitations (averse) de la fin d'été d'autre part.

Les valeurs moyennes mensuelles pluviométriques, relative à la période 191970/2004 (tableau 04), traduisent clairement les variations mensuelles et saisonnières de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle, et permet de distinguer deux grandes périodes :

- Une période sèche où les précipitations sont inférieures à la moyenne mensuelle de l'année. Or il s'avère d'après le graphique que les mois dits secs ne sont pas consécutifs dans plusieurs stations ; Cependant les mois de juin, juillet, août, sont secs dans toutes les stations, ils représentent la saison sèche et chaude de l'été, et le minimum est atteint en juillet ;
- Une période humide où les précipitations sont supérieures à la moyenne mensuelle de l'année, elle débute en septembre et s'achève en mai. Le maximum peut être enregistré en septembre-mai selon la station (domaine climatique). Le minimum est enregistré en février.

La répartition saisonnière des pluies, en pourcentage, dans les stations du bassin (Tableau 05) permet de distinguer le régime pluviométrique de chaque station. En effet Musset (1935) a une notion de régime saisonnier qui consiste à calculer la somme des précipitations par saison et à effectuer le classement saisonnier par ordre de pluviosité décroissante en désignant chaque saison par son initiale (A : Automne, H : Hiver, P : Printemps, E : Eté). L'importance des totaux pluviométriques saisonniers par rapport au total annuel de chaque station, ainsi que leur indicatif saisonnier, sont résumés sur le tableau 05.

| Station | Automne (sep.oct.Nov) | Hiver (déc.jan.fév) | Printemps (mar.avr.mai.) | Eté (juil.juil.aout) | |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|------|
| Ain touta | 33.6 | 26.9 | 26.2 | 13.3 | AHPE |
| Oued chelih | 30.3 | 29.9 | 29.2 | 10.5 | AHPE |
| Boudella | 31.8 | 19.8 | 36.5 | 11.9 | PAHE |
| Bou hamama | 28.3 | 27.0 | 28.3 | 16.4 | APHE |
| Babar | 30.4 | 20.5 | 29.8 | 19.3 | APHE |
| Kheirane | 35.8 | 20.5 | 31.7 | 11.9 | APHE |
| Kh Sidi Nadji | 41.3 | 26.7 | 23.5 | 8.5 | APHE |
| Tizi Ala | 28.5 | 27.3 | 30.6 | 13.5 | PAHE |
| Ain Mimoun M F | 27.0 | 25.9 | 33.4 | 13.7 | PAHE |
| F.El Guieiss BGE | 27.9 | 27.3 | 33.1 | 13.7 | PAHE |
| Bordj Sabath | 24.2 | 42.9 | 28.0 | 4.9 | HPAE |
| Elaria (B.Badiss) | 19.0 | 42.9 | 32.6 | 5.5 | HPAE |
| Ras El Akba | 24.0 | 41.9 | 26.7 | 7.3 | HPAE |
| Medjez Ammar PV | 26.3 | 40.6 | 26.8 | 6.3 | HPAE |

Tableau 06 : Répartition saisonnière des pluies dans les stations des bassins

Le régime saisonnier pluviométrique dominant dans le bassin versant de l'Oued El Guieiss est de type PAHE. Ce régime continental est caractérisé par une lame d'eau tombée en automne équivalent à peu près à la quantité de pluie printanière, et une proportion de pluie hivernale

relativement moindre. Alors que la saison d'été est caractérisée par une faiblesse quantitative des précipitations.

II.4. 2 Les autres paramètres climatiques

La température de l'air est un paramètre important qui régit les déperditions d'eau qui s'opèrent par le phénomène de l'évapotranspiration. Les bassins d'étude ne disposent pas de stations climatiques en leur sein, de ce fait nous avons utilisé trois stations situées à leur voisinage, contrôlées par l'O.N.M, pour lesquelles on dispose des données d'une série homogène (1990/2004) : Guelma, Batna et Biskra (tableau 06).

Le paramètre température de notre zone d'étude est fonction de l'altitude, de la distance à la mer, et de la position topographique. Les températures moyennes mensuelles maximales sont atteintes en juillet et août, elles varient entre 27°C et 34°C. Alors que les températures moyennes mensuelles minimales s'observent en janvier atteignant parfois 6°C. Les températures moyennes annuelles varient entre 14,6°C (Batna : station la plus froide) et 22,3°C (Biskra : station la plus chaude). Les variations interannuelles sont faibles (le coefficient de variation est inférieure à 1%).

| | | sep | oct | nov | déc | jan | fév | mar | avr | mai | juin | juil | août | ann |
|--|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------------|
| Guelma Latitude : 36°28 Longitude : 7°28 Altitude : 227m | Max | 45,0 | 41,0 | 31,2 | 28,0 | 27,3 | 29,2 | 34,7 | 35,2 | 41,3 | 46,9 | 47,4 | 46,9 | 37,8 |
| | min | 9,4 | 6,2 | 0,0 | -2,7 | -3,5 | -4,2 | -1,8 | -0,5 | 1,6 | 6,0 | 10,02 | 11,5 | 2,5 |
| | M | 31,4 | 26,7 | 20,3 | 16,5 | 15,4 | 16,7 | 18,7 | 21,2 | 26,3 | 31,6 | 35,5 | 36,2 | 24,7 |
| | m | 17,3 | 13,9 | 9,2 | 6,2 | 4,8 | 4,6 | 6,1 | 8,1 | 11,5 | 15,5 | 18,2 | 19,4 | 11,2 |
| | (M+m)/2 | 24,4 | 20,3 | 14,8 | 11,4 | 10,1 | 10,7 | 12,4 | 14,7 | 18,9 | 23,6 | 26,9 | 27,8 | 18,0 |
| | M-m | 14,1 | 12,8 | 11,1 | 10,3 | 10,6 | 12,1 | 12,6 | 13,1 | 14,8 | 16,1 | 17,3 | 16,8 | 13,5 |
| Batna Latitude : 35°43 Longitude : 6°21 Altitude : 827m | Max | 39,1 | 35,5 | 26,9 | 24,8 | 22,4 | 24,7 | 31,6 | 33,4 | 40,5 | 41,1 | 42,3 | 41,7 | 33,7 |
| | min | 3,4 | -0,2 | -6,2 | -8,3 | -8,4 | -9,0 | -7,3 | -5,5 | -2,5 | 4,2 | 7,8 | 8,3 | -2,0 |
| | M | 28,4 | 22,5 | 15,9 | 11,9 | 10,9 | 12,9 | 15,8 | 8,9 | 24,5 | 30,8 | 34,3 | 33,8 | 20,9 |
| | m | 14,1 | 9,7 | 4,8 | 1,7 | 0,3 | 0,8 | 2,9 | 5,5 | 9,9 | 14,5 | 17,1 | 17,3 | 8,2 |
| | (M+m)/2 | 21,3 | 16,1 | 10,4 | 6,8 | 5,6 | 6,9 | 9,4 | 11,4 | 17,2 | 22,7 | 25,7 | 25,6 | 14,6 |
| | M-m | 14,3 | 12,8 | 11,1 | 10,2 | 10,6 | 12,1 | 12,9 | 3,4 | 14,6 | 16,3 | 17,2 | 16,5 | 12,7 |
| Biskra Latitude : 34°48 Longitude : 5°44 Altitude : 89m | Max | 44,4 | 40,2 | 29, | 24,3 | 24,5 | 29,1 | 35,7 | 38,1 | 45,3 | 47,0 | 47,5 | 47,2 | 37,7 |
| | min | 12,9 | 9,0 | 2,5 | -0,4 | -1,8 | -0,8 | 3,9 | 4,4 | 10,3 | 14,8 | 19,9 | 17,2 | 7,7 |
| | M | 34,2 | 28,7 | 21,6 | 17,6 | 16,7 | 19,2 | 22,6 | 26,1 | 31,0 | 36,8 | 40,2 | 39,5 | 27,9 |
| | m | 23,3 | 17,9 | 12,1 | 8,2 | 7,0 | 8,6 | 11,4 | 14,6 | 19,5 | 24,4 | 27,3 | 27,7 | 16,8 |
| | (M+m)/2 | 28,8 | 23,3 | 16,9 | 12,9 | 11,9 | 13,9 | 17, | 20,4 | 25,3 | 30,6 | 33,8 | 33,5 | 22,3 |
| | M-m | 10,9 | 10,8 | 9,5 | 9,4 | 9,7 | 10,6 | 11,2 | 11,5 | 11,5 | 12,4 | 12,9 | 12,1 | 11,0 |

Max : températures maximale absolue ; min : température minimale absolue ; M : température moyenne maximale ; m : températures moyenne minimale ; (M+m)/2 : température moyenne mensuelle ; (M-m) : amplitude thermique. Source : Office National de la Météorologie ONM), Constantine

Tableau 07 : Régime thermique mensuel aux stations climatiques de la zone d'étude (1990-2004)

Les données d'observation de quelques autres paramètres climatiques, sont fournis par les stations météorologiques de Batna (1975-1984), Guelma (1987-2000) et Biskra (1990-2000). Les tableaux 07, 08 et 09 résument ces principales données qui complètent l'analyse climatique de notre zone d'étude.

| Station | Nombre de jours où il y à neigé | Nombre moyen de jours d'enneigement |
|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Batna (altitude = 1050 m) | 14,4 | 8,3 |
| Arris (altitude = 1100 m) | - | 15,0 |
| F. Toub(altitude = 1220 m) | 3,5 | 2,2 |

Source : SELTZER

Tableau N° 08 : Données d'observation des autres paramètres climatiques (Station batna).

| St | | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev | mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aou |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|
| Batna | Le vent en (m/s) | 3.1 | 3.5 | 3.5 | 4.5 | 4.1 | 4.2 | 4.1 | 4.0 | 4.0 | 3.8 | 4.2 | 3.8 |
| | Humidité en (%) | 58.6 | 64.2 | 72.4 | 72.9 | 71.3 | 71.4 | 63.3 | 63.2 | 59 | 49.9 | 39.7 | 44.4 |
| | Fréquence de gelée | 00 | 0.3 | 5.7 | 8.7 | 8.2 | 7.5 | 4.7 | 2.1 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| | Fréquence sirocco | 2.0 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 00 | 0.4 | 1.9 | 2.3 | 1.5 | 2.8 | 5.1 | 5.2 |
| | Insolation (heure) | 327.5 | 263 | 197.5 | 160.5 | 162.6 | 148.8 | 217.3 | 250.9 | 382.4 | 403.7 | 480. 4 | 402. 7 |
| | Evaporation (mm) | 364 | 229.4 | 189 | 179.8 | 189.1 | 168 | 223.2 | 237 | 272.8 | 318 | 350. 3 | 322. 4 |
| | Fréquence moyenne de neige | 00 | 00 | 1.1 | 2.4 | 2.9 | 2.6 | 1.7 | 0.6 | 0.1 | 00 | 0.1 | 0.1 |
| Guelma | Le vent en (m/s) | 1.74 | 1.54 | 1.72 | 1.83 | 1.43 | 1.67 | 1.84 | 2.0 | 1.76 | 1.96 | 1.94 | 1.8 |
| | Humidité en (%) | 63.92 | 68.46 | 73.38 | 76.07 | 76.69 | 76.61 | 74.23 | 72.46 | 69.0 | 62.84 | 54.3 | 55.8 4 |
| | Insolation (heure) | 244.7 | 203.1 | 164.3 | 151.2 | 160.5 | 175.5 | 210.4 | 222.9 | 277.9 | 292.6 | 357. 3 | 319 |
| | Précipitations solide nombre de jour de grêle | 0.15 | 0.3 | 0.25 | 0.1 | 0.23 | 0.3 | 0.35 | 0.3 | 0.2 | 0.25 | 00 | 0.15 |
| | Précipitations solide nombre de jour de gelée | 00 | 0.1 | 1.7 | 4.85 | 6.65 | 4.7 | 3.8 | 1.45 | 0.1 | 00 | 00 | 00 |
| Biskra | Température (C°) | 28.9 | 23.1 | 16.8 | 12.5 | 11.6 | 13.7 | 17.3 | 20.5 | 26.7 | 30.8 | 34.1 | 34.0 |
| | Le vent en (m/s) | 4.7 | 4.2 | 4.7 | 4.3 | 8.8 | 4.6 | 4.7 | 6.2 | 6.0 | 5.7 | 4.5 | 4.3 |
| | Humidité en (%) | 38 | 44 | 53 | 58 | 57 | 46 | 41 | 35 | 30 | 27 | 240 | 28 |
| | Tension de vapeur (mbar) | 15 | 12.7 | 10.1 | 8.4 | 7.8 | 7.2 | 7.9 | 8.3 | 10.2 | 11.9 | 130. 6 | 14.5 |
| | Insolation (heure) | 267 | 267 | 204 | 230 | 228 | 252 | 284 | 300 | 327 | 335 | 357 | 326 |
| | Evaporation (mm) | 500 | 205 | 143 | 103 | 123 | 147 | 202 | 271 | 344 | 390 | 427 | 403 |

Source : O.N.M (1975-1984) in (Guidoum, 2004)

Source : Office national de la météorologie (1987-2000) in (Benchaiba , 2006)

Source : Office national de la météorologie (1975-84) in (Belagoune ,2012)

Tableau 09 : Quelques paramètres climatiques de la zone d'étude

I.5 La végétation

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

II.5.1 le bassin de l'Oued Bouhamdane

La forêt de chêne-liège présente uniquement au nord du bassin sur les montagnes de la chaîne numidique, elle occupe les versants à pente forte à moyenne (Béni Seline, Béni M'djedel, Ben Ahmed et Merméra). Le maquis est de type méditerranéen, et occupe les piémonts des monts boisés de la chaîne numidique et les deux versants à forte pente de l'oued Bouhamdane. Les terrains de maquis arboré avec des sujets clairsemés de chêne-liège occupent une partie dans nord-ouest du bassin (Djebel Mermera et la forêt d'ouled Atti sur le Djebel Méliani-Hadjar). Les reboisements (Pins d'Aleps) sont effectués sur des terrains complètement dénudés des Hauts plateaux pour la protection des sols contre l'érosion.

Les zones de la céréaliculture, couvrent environ 60% de la surface du bassin et correspondent aux anciens territoires de colonisation (Oued Zenati, Ras el Akba et Bordj Sabath). Les terrains de l'arboriculture sont répandus en petites surfaces, sur les terrasses le long des oueds. Les terrains nus occupent environ 4.5% de la surface du bassin et s'étendent sur des surfaces rocheuses, perdues à l'agriculture ou difficile à mettre en valeur. Enfin, les parcours qui sont constitués essentiellement de formations touffues occupent les parties sommitales de la quasi-totalité des monticules des hauts plateaux (Benchaiba, 2006).

II.5.2 le bassin de l'Oued El Gueiss

Le petit bassin de l'Oued el Gueiss dispose en altitude de belles forêts constituées essentiellement par le pin d'Alpes, de genévriers, et à partir de 1500 m des forêts de cèdres occupant la zone la plus humide du bassin (Ouled Yakoub et Béni Oudjana). Le reste de la forêt étant occupé par un maquis à dominance de chêne vert et de terrains agricoles. Les prairies sont bien représentées (Bentouati, 2006).

II.5.3 le bassin de l'Oued El Arab

Les forêts se localisent à l'extrémité Nord-Ouest du bassin (Dj. Aidel, Dj. Chennte gomma et au Sud Est sur Dj. Bouzendag. Elles ne présentent qu'environ 4% de la surface totale. Parmi les principales espèces végétales on trouve : le pin d'Alep, le chêne vert, le genévrier et le cèdre. Les Maquis occupent juste le massif du Dj Djahfa et présentent moins de 4% de la surface totale du bassin.

Les parcours steppiques sont formés en majorité des nappes alfatières (environ 7 % de la surface totale) qui se situent aux piedmonts Nord-Ouest des montagnes de Dj. Aidel et Dj. Chennte gomma. Ils jouent un rôle prépondérant au niveau du secteur de l'élevage extensif.

La céréaliculture représente plus de 84% de la surface totale du bassin et se localise dans les vallées ce qui donne à la zone l'aspect agropastorale. Ce qui favorise l'accélération des effets érosifs par la démolition des particules du sol par l'élevage et l'action de labour dans le sens des pentes (Aouachria, 2008).

II.5.4 le bassin de l'Oued El Hai

La forêt occupe une partie du nord-est du bassin au niveau de Dj. Ich Ali et se développe aussi à l'Est au niveau de Dj. Elmalou, Dj. Bous et Dj. Tuggrut. Elle est en bon état et constituée de Cèdre, pin d'Alep, Chêne vert et Genévriers. Cependant son extension est relativement réduite (13% de la superficie du bassin). Le maquis en état dégradé, l'Alfa et les parcours occupent 58% du total du bassin. Alors que les sols nus, les parcours sahariens et les affleurements rocheux présentent 11% du total.

Les cultures annuelles sont essentiellement des céréales et occupent la plaine de Ain Touta. L'arboriculture se présente autour des Oueds principaux, El Kantara et quelques parcelles au fond de la forêt, avec une superficie d'environ 17% du total (Rerboudj, 2005).

II.6 Description lithologique

La géologie des terrains influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement des surfaces. Dans ce dernier cas, le caractère géologique principal à considérer est la lithologie. En effet, la définition de contexte lithologique donne aussi des indications sur l'érodabilité du terrain, indication indispensable à l'évaluation de transports solides et l'envasement des ouvrages hydrauliques. Les descriptions lithologiques qu'on abordera ci-après, sont inspirées en grande partie des notices des cartes géologiques aux 1/50.000 couvrant les bassins d'étude.

II.6.1 le bassin de l'Oued Bouhamdane

La lithologie dominante du Bouhamdane est composée de formations argilo-gréseuses du Numidien. Ces formations affleurent au secteur de l'Oued Zenati, à Djebel Ouahch, et au sud-est de Djebel Taya. Les marnes noires d'âge Paléocène moyen à supérieur, surmontées par une barre de calcaire noir de l'Eocène inférieur, constituent la formation la plus épaisse du bassin, elles affleurent largement alentour de l'Oued Zenati.

Les séries lithologiques de la nappe néritique Constantinoise sont représentées par les Djebels d'Oum Settas et Taya. Les formations Mio-pliocène continentales sont discordantes sur toutes les séries antérieures, et sont constituées de conglomérats et d'argile sableuse rouge.

Les terrains d'âge Sénonien supérieur, avec deux barres calcaires d'âge Campanien et Maastrichtien, sont développés au nord-ouest de l'Oued Zenati. Enfin, les dépôts Quaternaires sont constitués essentiellement d'alluvions des fonds des vallées étagées en différents niveaux de terrasses.

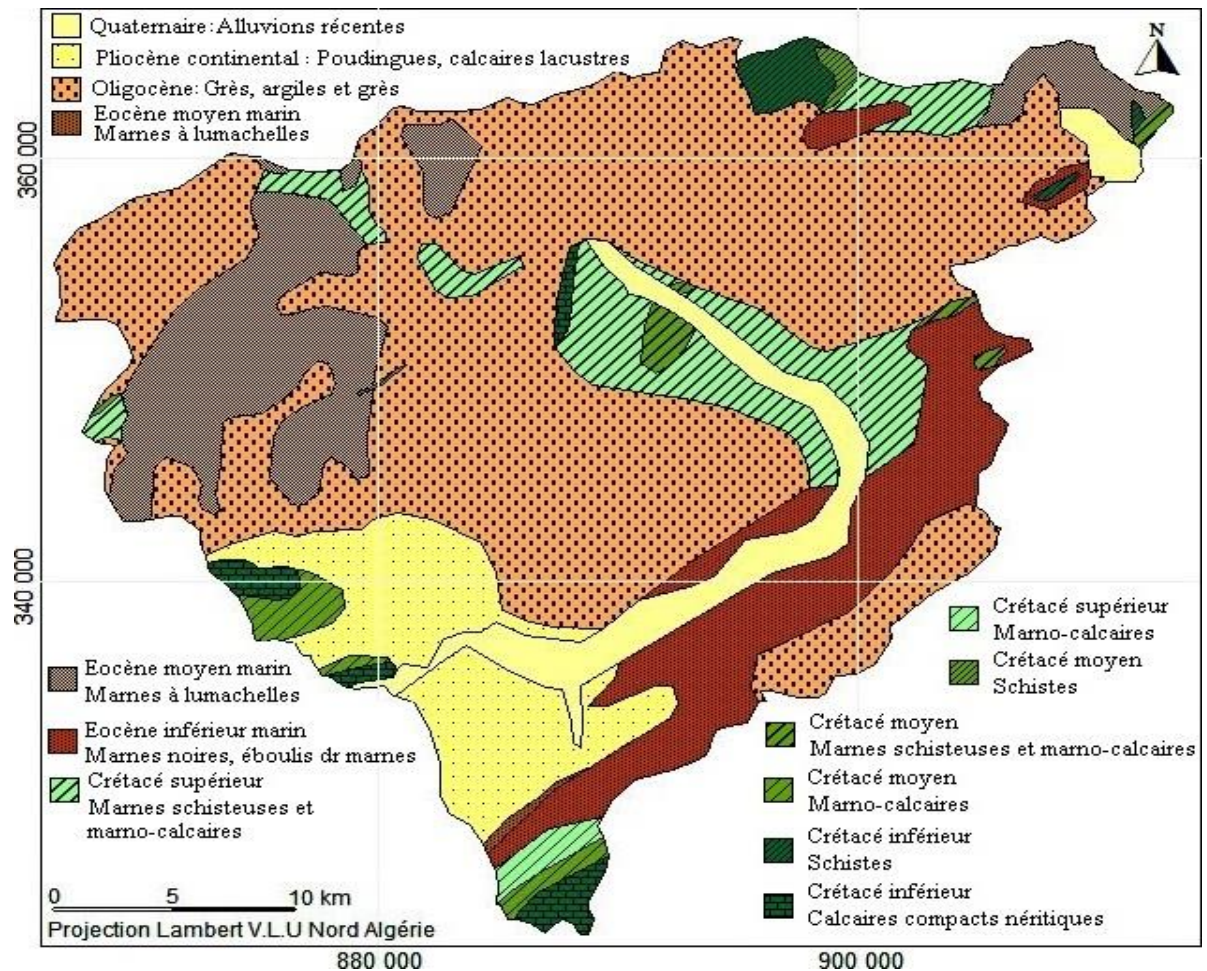


Figure 21 : Lithologie du bassin versant de l'Oued Bouhamdane (Guidoum, 2017)

II.6.2 le bassin de l'Oued El Gueiss

Le bassin de l'Oued El Gueiss repose sur le Crétacé moyen et supérieur (marin ou lagunaire). Il est dominé par les marno-calcaires du Crétacé moyen (Turonien, Cénomaniens). Le Crétacé supérieur se prolonge dans le synclinal de Djebel Aourès et la vallée de Tazma au sud, avec un faciès à prédominance calcaire alterné de marne. Les formations du Crétacé inférieur (marnes, grès, et calcaires marneux) marquent la limite sud-est du bassin sous forme d'une bande plus ou moins régulière longeant l'anticlinale de Khanchela (Djebel Faraoun, Djebel Aïdel et Kef El Abiod), (Laffitte, 1939).

Les terrains Quaternaires (Glacis polygéniques nappant le relief et les éboulis à blocs) affleurent sous forme de terrasses alluviales le long de l'Oued El Gueiss et ces principaux affluents, de cône de déjection au pied des monts de Khenchela, et de vastes étendus au niveau des hauts plateaux.

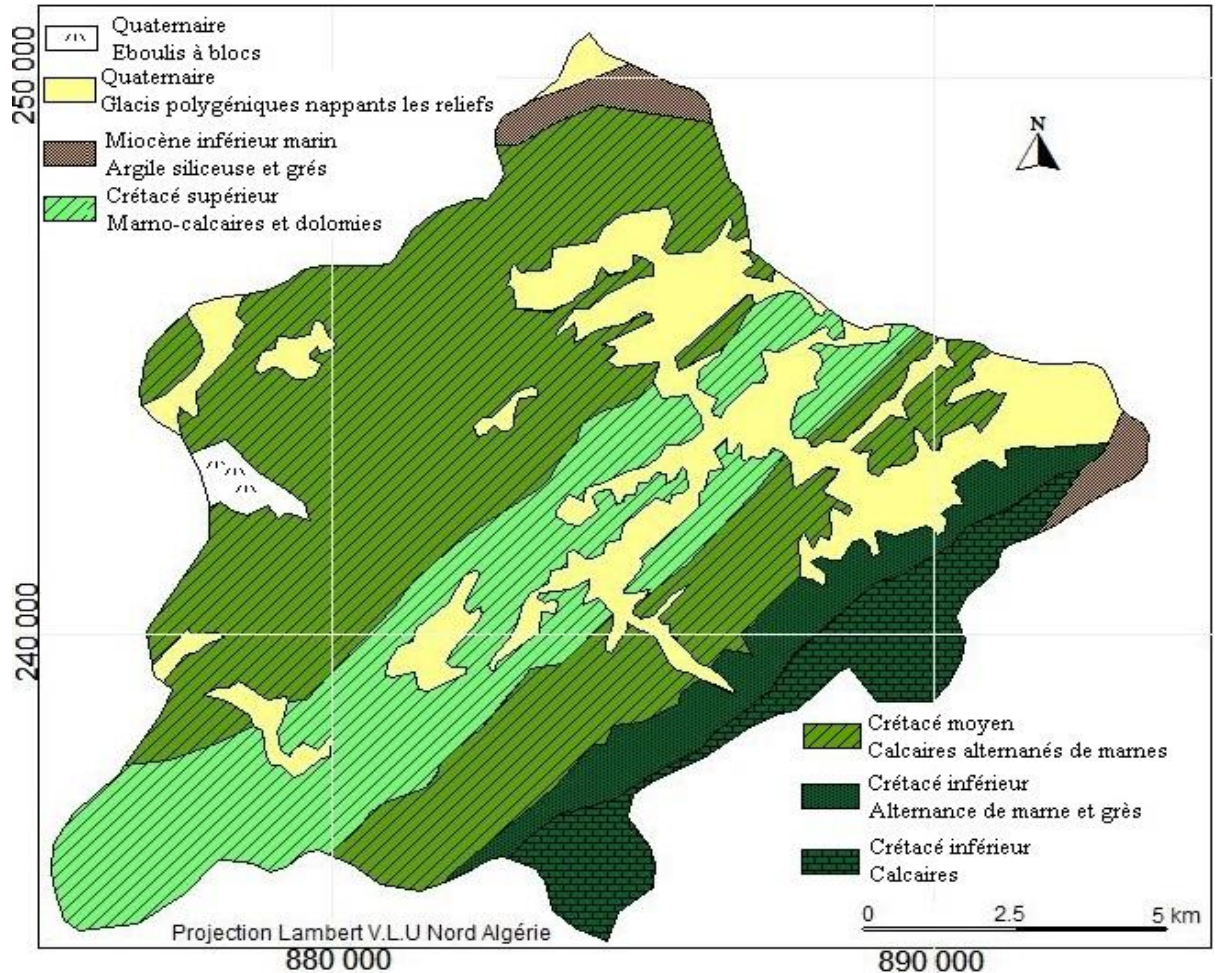


Figure 22 : Lithologie du bassin versant de l'Oued El Gueiss(Guidoum, 2017)

II.6.3 le bassin de l'Oued El Arab

Les couches lithologiques dominantes de ce bassin sont essentiellement composées de calcaires récifaux et de marno-calcaires du Crétacé moyen (Turonien, Cénomanién). Ces formations résistantes occupent la partie occidentale du bassin (Djebels Fourhel, Taourirt, et Toubount).

Les marnes et les calcaires avec lentilles de gypse, formations peu résistantes d'âge Crétacé supérieur, longent le bassin sur sa partie orientale (Djebel Chechar, Tardjelt, Tadelist, Djahfa, et Tadinart). Au nord-ouest, les calcaires marneuses du Crétacé inférieur de Djebels Chélia et Aidel, affleurent.

Le nord-est est occupé surtout par les alluvions et les terrasses du Quaternaire (galets, gravier, blocs avec des sables, et limon).

Les formations de l'Eocène inférieur (calcaire et gypse) affleurent au Djebel Bergua et Khanguet Sidi Nadji dans le sud-est, et à Djebel Chetara dans le nord-est. Enfin, les lambeaux de terrains triasiques (sel gemme, couches gypso-salines) affleurent à Djebels Aidel, et près du confluent des Oueds El Abiod et Melaguou.

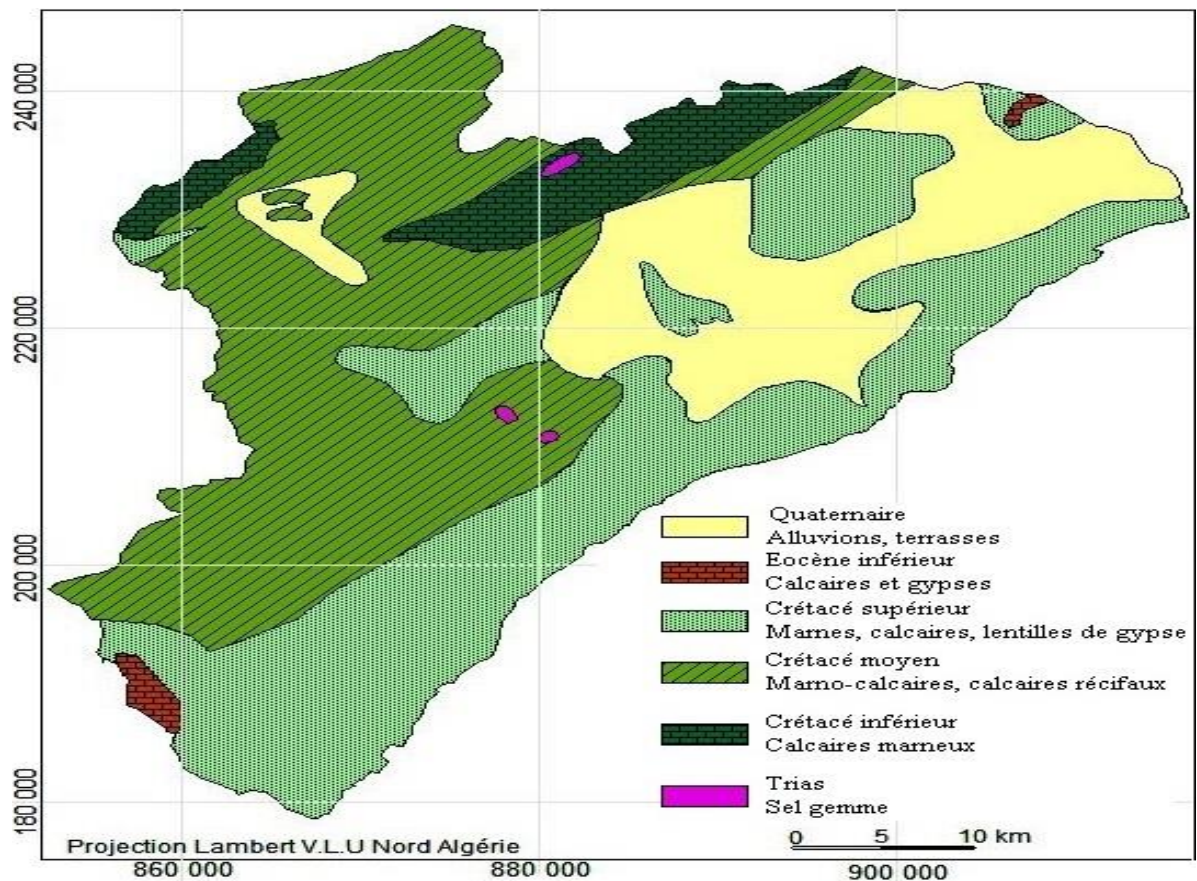


Figure 23 : Lithologie du bassin versant de l'Oued El Arab(Guidoum, 2017)

II.6.4 le bassin de l'Oued El Hai

On découvre dans ce bassin des roches sédimentaires allant de calcaires plus ou moins durs parfois dolomitiques aux roches marneuses fortement altérées en surface. Les différentes unités géologiques qu'on rencontre s'étalent du Quaternaire au Trias, dont les principales formations appartiennent au Crétacé (Mekaoussi, 2003).

Les terrains à alternance de marne grise et verte et de calcaire massif clair, affleurent aux Djebels Tuggurt, Ich Ali et Metlili. Les calcaires massifs occupent la demi-cluse d'El Kantara, Djebels Bouss, Etbag et El Malou. Les grès durs et les marnestendres contenant des cristaux de gypse, affleurent à l'extrême nord du bassin (DjebelTichao).

Le synclinale d'El Kantra est entouré par des formations de l'Eocène (marnes et des conglomérats rougeâtres surmontant des marnes gypseuses). Les formations marines du Miocène affleurent à Djebels EchCheffa, Etbag, Metlili et les ynclinale d'El Kantara. Il s'agit d'un faciès formé de marnes à gypse et de calcaire parfois conglomératiques, ainsi que des grés et de marnes rougeâtres.

Les formations Quaternaires se sont développés dans les synclinales d'El Kantara, Ain Touta, et le long des vallées des oueds. Elles sont constituées par des mélanges alluvionnaires caillouteux de limon et de sable, d'éboulis et de terrasses. Les terrains de Trias affleurent au niveau de Djebel Groun, et formés par un mélange de gypse, d'argiles et de dolomies noires.

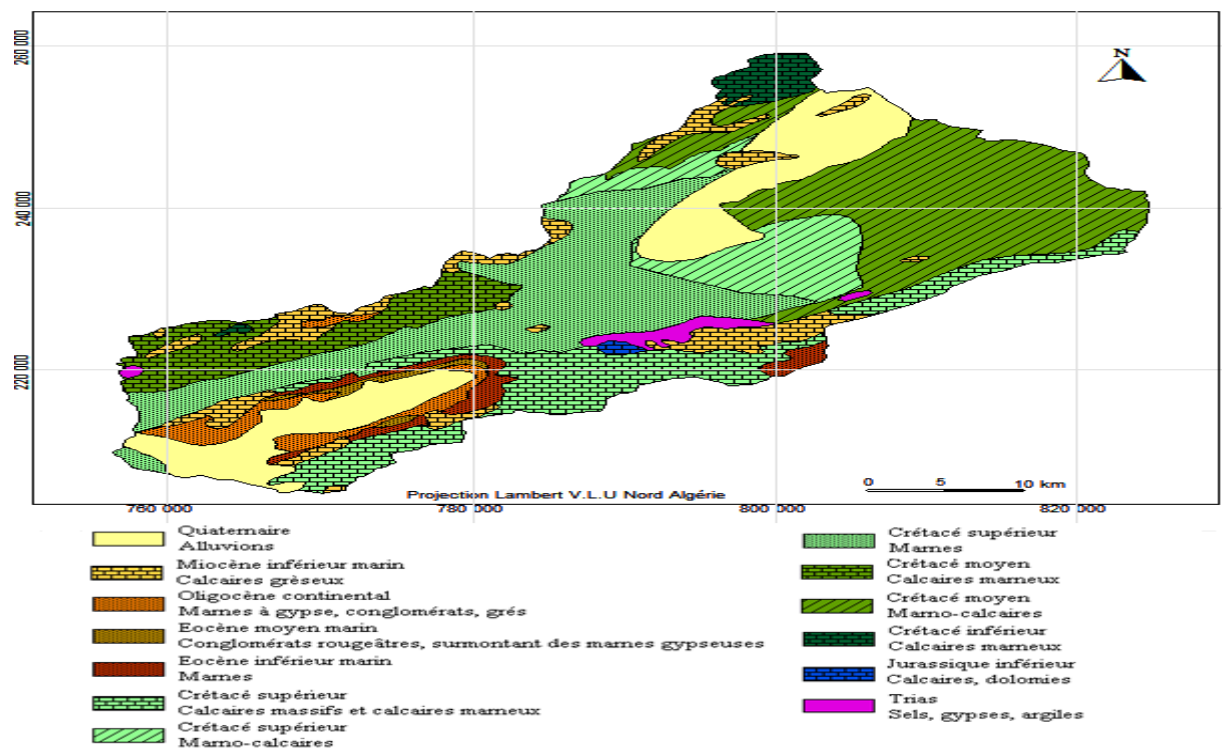


Figure 24 : Lithologie du bassin versant de l'Oued El Hai (Guidoum, 2017).


Conclusion

Les bassins versants étudiés présentent des ensembles morpho-structuraux bien tranchés, des caractères morpho métriques déterminant des différences sensibles dans l'aptitude des terrains au ruissellement, des facteurs lithologiques donnant lieu à des possibilités d'infiltration très nuancées sur le plan spatial.

Le climat des bassins est étroitement lié à leur position géographique, et à leur relief. Marquée par l'influence des précipitations et des températures. Ce climat présente une forte variabilité spatiale et surtout temporelle.

L'évolution annuelle de ces deux paramètres, permet de distinguer une période chaude et sèche, et une période froide et humide.

Le couvert végétal est dégradé dans son ensemble et très discontinu dans le temps et dans l'espace.

A decorative frame resembling a scroll, with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved. There are two grey, semi-circular elements on the left side, one at the top and one at the bottom, which look like the ends of the scroll's binding.

Chapitre III
Bilan et modélisation
statistique du transport
solide en suspension

III.1 Mesures des transports solides en suspension en Algérie

Selon Medinger (1960) et Demmak (1982) et Ghachi, (1986), Les premières mesures systématiques des transports des sédiments en suspension pour l'Algérie ont commencé en 1946 sur le haut bassin de l'Oued Isser à la station hydrométrique de la Traille. Elles ont par la suite été étendues aux bassins des Côtiers constantinois, les Côtiers Algérois, le Cheliff, la Tafna, la Macta, El Hodna, la Soummam, la Seybouse (1948) et le Bouhamdane (1949). Après une interruption d'une dizaine d'années, ces mesures ont été reprises en 1970 et étendues à l'ensemble du réseau hydrométrique national installé par l'agence nationale des ressources hydrauliques.

La technique opérationnelle utilisée par l'ANRH est la suivante :

- Le prélèvement en un point unique soit sur bord, soit au milieu, au moyen du récipient (1litre) qui sert à stoker les échantillons. Ce procédé s'effectue chaque jour à midi : 12h :00, pour les jours d'écoulement normal. En période de crues, l'échantillonnage est échelonné dans le temps, suivant des intervalles de temps variables en fonction de la vitesse de l'accroissement des débits.

L'échelonnement des prélèvements, lors d'une crue, suivant des intervalles de temps variables en fonction de régime de l'Oued étudié.

- Le traitement des échantillons au laboratoire (décantation et siphonnage filtrage, séchage à l'étuve et pesée).

III.2 Qualité et fiabilité des données.

Nous disposons d'un ensemble de données brutes remises par l'ANRH, comportant les valeurs de hauteurs d'eau, de débit liquide instantané, de débit liquide moyen journalier et de concentration en matière en suspension enregistrées aux quatre (04) stations hydrométriques contrôlant les bassins étudiés (tableau 10). En outre, il a été possible d'obtenir une série de quelques crues, permettant de tracer les hydrogrammes de crues et les turbidigrammes (figure 25).

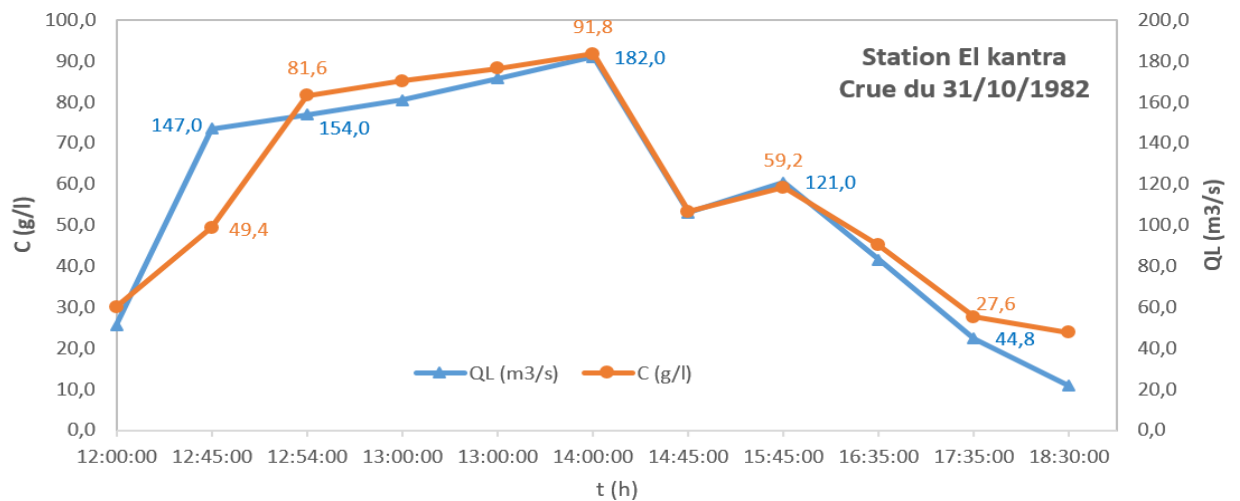


Figure 25 : Exemples de variabilité des concentrations en MES à l'échelle de la crue

La collecte de ces données conduit inévitablement à un grand nombre de données de concentrations basses et insignifiantes. Les concentrations élevées n'étant mesurées qu'en de rares occasions, en raison de la discontinuité du phénomène de transports solides en suspension qui dépend de l'état initial du bassin versant :

- une faiblesse du transport des sédiments dû simplement à la faiblesse voire l'absence de l'écoulement en saison estivale
- les premières pluies souvent torrentielles d'automne qui arrivent sur un sol dénudé, après une longue période chaude, entraînent des masses considérables d'argiles et de limons déjà préparés sur place. Aussi, une forte quantité de terre est apportée par le ruissellement de surface au début de campagne de labours où le sol est remanié, aéré et fragilisé.
- Le transport en suspension est faible en hiver quand les versants ont déjà lessivé par les premières pluies de la saison humide (Guidoum, 2004).

Cette situation se traduit par des lacunes inévitables au niveau des séries d'observation, et nécessite de faire appel aux courbes d'étalonnage de sédiments et d'établir des relations qui peuvent servir de base pour le comblement de ces lacunes.

| | Code ANRH | Période d'observation | Nbre valeurs observées | Concentration max | | | | Cmin (g/l) | Cmoy (g/l) | E-Type |
|-----------------------|-----------|-----------------------|------------------------|-------------------|------------------------|--------|-----------|------------|------------|--------|
| | | | | C (g/l) | date | H (cm) | Ql (m³/s) | | | |
| Medjez Amar II | 140301 | 1969-2000 | 2411 | 105,7 | 23/10/1969 (07 :30) | 128 | 6,5 | 0,01 | 1,47 | 5,67 |
| Kh Sidi Nadji | 061801 | 1972-1990 | 1484 | 359,7 1 | 05/10/1975 (16 :15) | 100 | 42,8 | 0,1 | 23,17 | 32,15 |
| F.ElGueiss | 070702 | 1971-1996 | 1038 | 141,5 7 | 31/07/1994 (18 :45) | 221 | 39,11 | 0,01 | 12,78 | 22,19 |
| El kantra | 061201 | 1969-1993 | 1258 | 233 | 15/07/1969 (23 :00) | 128 | 6,5 | 0,01 | 15,22 | 23,66 |

Source (ANRH)

Tableau 10 : Statistiques sur les séries de données de concentration en MES (g/l) collectées

III.3 Méthode opérationnelle pour l'évaluation de la charge solide (Méthode opérationnelle) :

Notre approche pour l'estimation de la charge en sédiments fins est inspirée de celle élaborée par Demmak (1982). Nous avons procédé de la façon suivante (figure 26) :

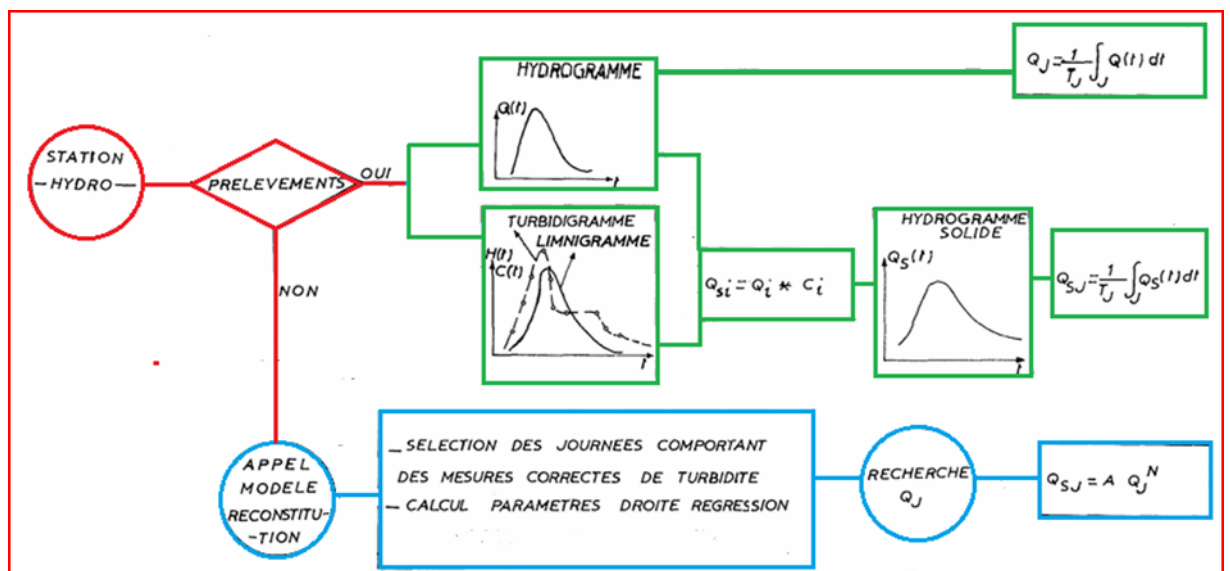


Figure 26 : Approche adoptée pour le calcul du débit solide moyen journalier (Demark, 1982)

- Pour une station donnée, on sélectionne les journées des crues pour les quelles un nombre suffisant de prélèvement a été effectué permettant une bonne reconstitution du turbidigramme (courbe d'évolution au cours du temps, de concentration en MES), (figure 27).

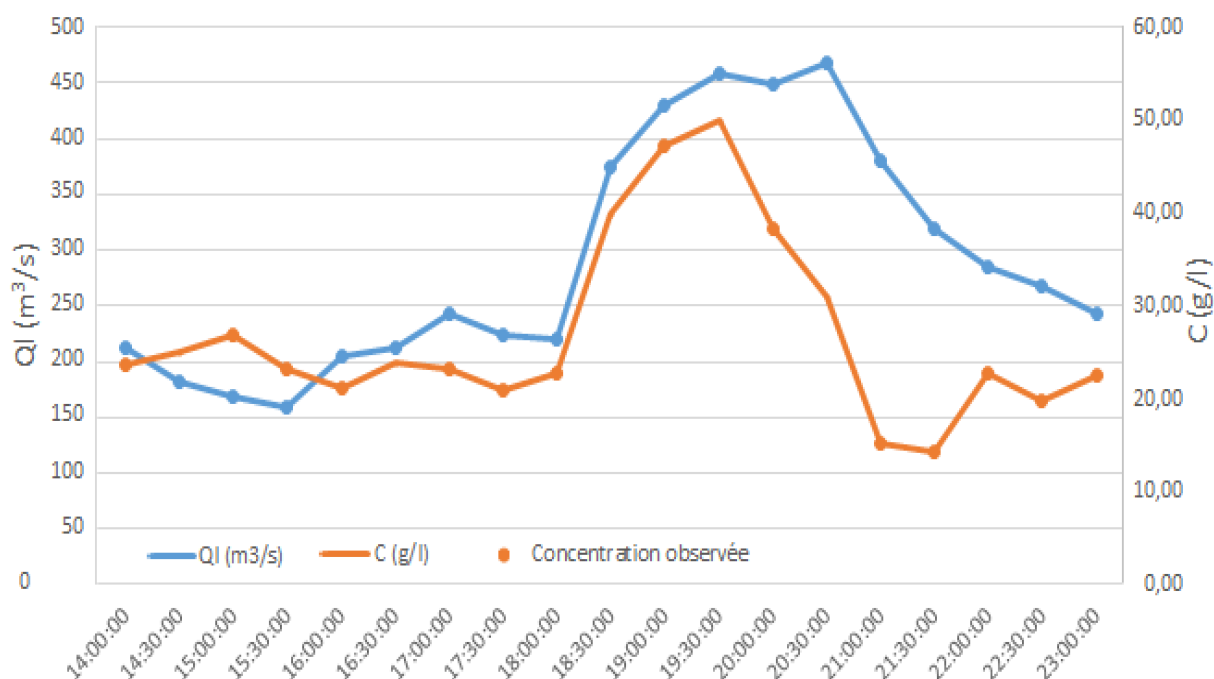


Figure 27 : Reconstitution du turbidigramme correspondant à la crue du 04/09/1972 à Kh Sidi Nadji

Les crues ont été sélectionnées sur la base d'un certain nombre de critères, notamment : la réalisation d'un hydrogramme complet et non complexe, la prise en compte des fortes et faibles crues, la fréquence d'échantillonnage pour la concentration en MES et le débit maximal atteint.

- Pour les journées où les débits sont restés constants (jours d'écoulement normal) les données instantanées sont directement applicables à l'élaboration de la courbe d'étalonnage.
- La connaissance de la variation de la concentration en matière en suspension et des débits liquides en fonction du temps nous permet d'obtenir le débit solide instantané ($Q_s = C \cdot Q_l$).
- Les relations $Q_s = f(Q_l)$ sont établies à partir d'ajustement de droites sur les nuages de points débits solides-débits liquides (figure 28 (a)). Le traitement statistique de l'information disponible permet de trouver un modèle régressif $Q_s = f(Q_l)$, d'homogénéiser d'une manière satisfaisante les données et d'une quantifier l'apport en MES au droit des stations étudiées.
- Compte tenu de l'influence saisonnière sur le phénomène des transports solides, nous avons cherché à établir des relations saisonnières, afin d'éviter les trop fortes dispersions. Pour les séries d'observations sélectionnées, des regroupements effectués suivant 4 saisons (figure 28).
- Le calcul du débit solide journalier en suspension se fait par intégration (détermination de la surface de l'épure solidogramme : $Q_s = f(t)$).

$$Q_{sj} = \frac{1}{T_j} \int_j Q_{si}(t) \cdot dt$$

avec

Q_{si} : Débit solide instantané (kg/s) ; T_j : durée de la crue dans la journée (s) ; t : le pas du temps choisi.

III.4 Modélisation statistique : Concentrations – débits liquides instantanés.

Le traitement statistique de l'information disponible permet de trouver un modèle régressif $Q_s = f(Q_l)$, d'homogénéiser d'une manière satisfaisante les données et d'une quantifier l'apport en MES au droit des stations étudiées.

Vu sa complexité Le transport solide en suspension est un phénomène difficile à mettre en équation.

Dans le cadre de cette contribution, nous avons cherché à trouver un modèle régressif significatif reliant le débit solide au débit liquide, pour évaluer l'apport solide en suspension des quatre oueds sélectionnés. Ce modèle doit d'être également validé.

Le modèle "courbe du transport solide : $Q_s = a \cdot Q_l^b$ " proposé dès 1895 par Kenedy(Lefort, 1992) a été adopté (tableau 11). Ce modèle est largement appliqué sur les oueds algériens (Elahcene et Remini 2009, Achite et Ouillon 2007, Terfous et al. 2001, Touaïbia et al. 1999). La justification du choix de ce type de modèle se fait en examinant la variance expliquée (figure 28). Les valeurs du coefficient de corrélation pour un risque d'erreur de 5% justifient le choix du modèle (tableaux 11).

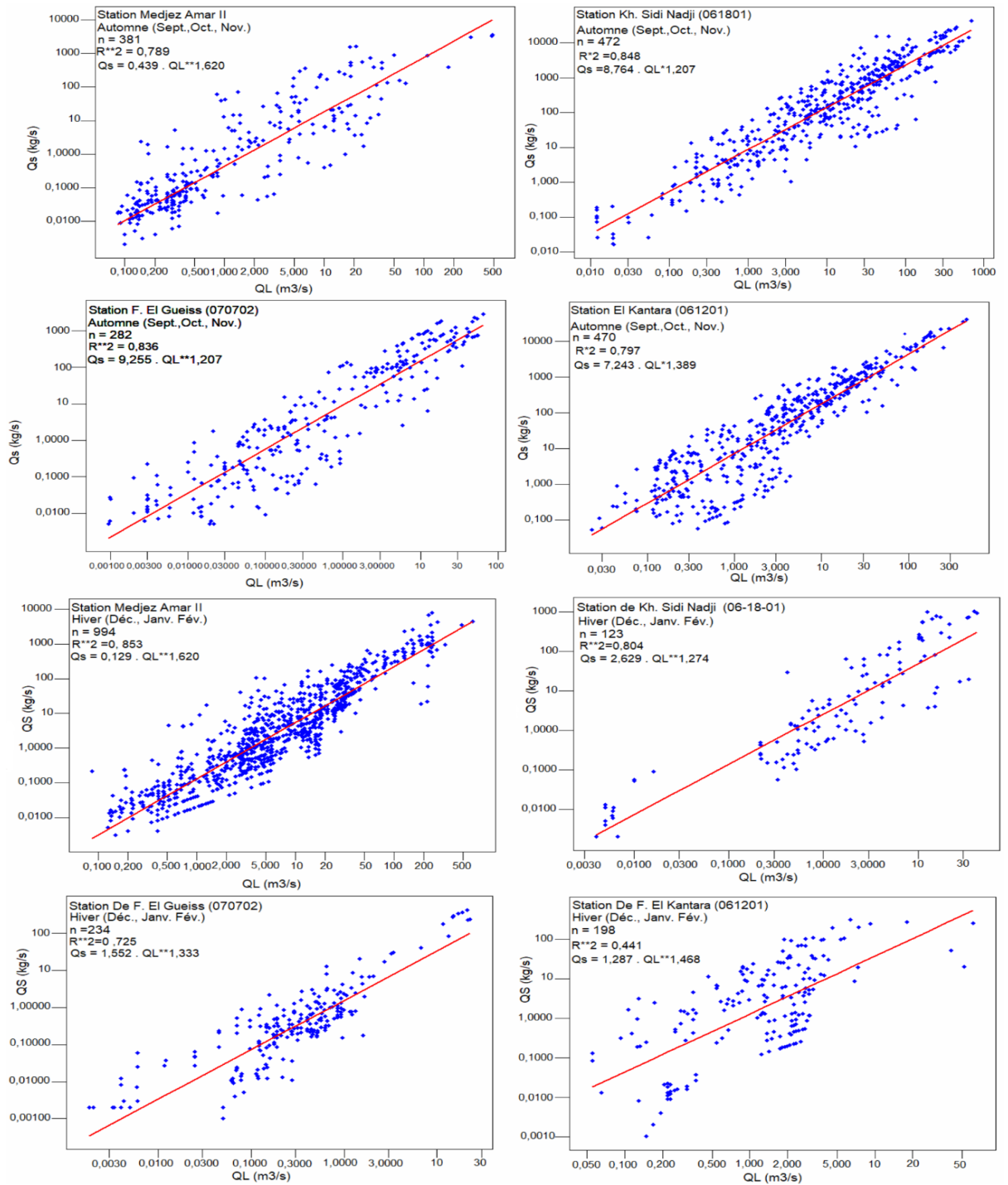


Figure 28 (a) : Recherche d'une relation saisonnière débit liquide-débit solide $Q_s=f(Q_L)$ (Saisons : Automne et Hiver)

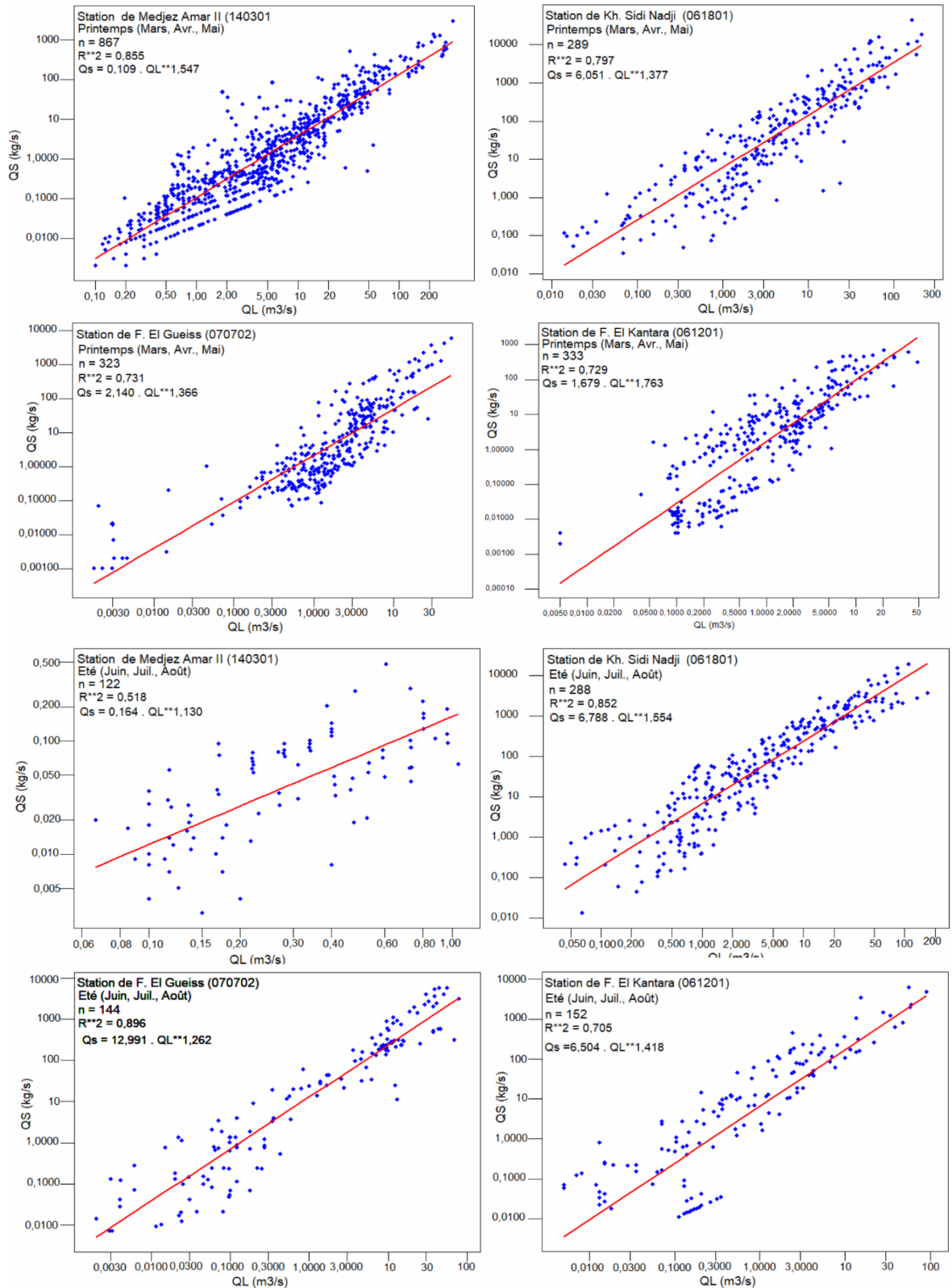


Figure 28(b) : Recherche d'une relation saisonnière débit liquide-débit solide $Q_s=f(Q_L)$ (Saisons : Printemps et Été)

| station | Saison | Mois | N ^{br} | Regroupement par saison | |
|---------------|-----------|------|-----------------|-------------------------|--|
| | | | | r ² | Qs=a.Ql ^b) |
| MedjezAmarII | Automme | sep | 95 | 0,789 | Qs = 0,439. Q _L ^{1,620} |
| | | oct | 144 | | |
| | | nov | 139 | | |
| | Hiver | déc | 220 | 0,853 | Qs = 0,129. Q _L ^{1,620} |
| | | jan | 320 | | |
| | | fév | 449 | | |
| | Printemps | mar | 348 | 0,855 | Qs = 0,109. Q _L ^{1,547} |
| | | avr | 325 | | |
| | | mai | 192 | | |
| | Été | jui | 91 | 0,518 | Qs = 0,164. Q _L ^{1,130} |
| | | juil | 25 | | |
| | | aou | 6 | | |
| Kh. SidiNadji | Automme | sep | 239 | 0,848 | Qs = 8,764 . Q _L ^{1,207} |
| | | oct | 152 | | |
| | | nov | 76 | | |
| | Hiver | déc | 32 | 0,804 | Qs = 2,629. Q _L ^{1,274} |
| | | jan | 54 | | |
| | | fév | 33 | | |
| | Printemps | mar | 67 | 0,797 | Qs = 6,051. Q _L ^{1,377} |
| | | avr | 58 | | |
| | | mai | 164 | | |
| | Été | jui | 116 | 0,852 | Qs = 6,788. Q _L ^{1,554} |
| | | juil | 44 | | |
| | | aou | 128 | | |
| F. El Gueiss | Automme | sep | 117 | 0,836 | Qs = 9,255. Q _L ^{1,207} |
| | | oct | 121 | | |
| | | nov | 48 | | |
| | Hiver | déc | 58 | 0,725 | Qs = 1,552. Q _L ^{1,333} |
| | | jan | 107 | | |
| | | fév | 69 | | |
| | Printemps | mar | 165 | 0,731 | Qs = 2,140. Q _L ^{1,366} |
| | | avr | 84 | | |
| | | mai | 67 | | |
| | Été | jui | 84 | 0,896 | Qs = 12,991. Q _L ^{1,262} |
| | | juil | 36 | | |
| | | aou | 28 | | |
| El kantara | Automme | sep | 164 | 0,797 | Qs = 7,243 . Q _L ^{1,389} |
| | | oct | 174 | | |
| | | nov | 133 | | |
| | Hiver | déc | 67 | 0,441 | Qs = 1,287. Q _L ^{1,468} |
| | | jan | 59 | | |
| | | fév | 72 | | |
| | Printemps | mar | 127 | 0,729 | Qs = 1,679. Q _L ^{1,763} |
| | | avr | 113 | | |
| | | mai | 93 | | |
| | Été | jui | 84 | 0,705 | Qs = 6,504. Q _L ^{1,418} |
| | | juil | 29 | | |
| | | aou | 39 | | |

Tableau 11 : Modèle courbe du transport solide (puissance) : Qs=a.Ql^b

III.5 Bilan du transport solide en suspension des bassins versants étudiés.

III -5-1 Évaluation des résultats de la modélisation statistique

Il est connu que le suivi de l'évolution bathymétrique des retenues intègre l'ensemble des phénomènes du transport solide, y compris le charriage du fond. En effet, les mesures bathymétriques effectuées dans les retenues des quatre (4) barrages contrôlant les bassins d'étude, sont adéquates pour justifier le modèle statistique établi. Les apports en t/km²/an en sédiments fournis par ces bassins peuvent être déduits, en connaissant la densité sèche des sédiments déposés dans les retenues des barrages. Selon Demmak,(1982),la valeur moyenne de la densité sèche des sédiments varie généralement entre 1,2 et 1,4 t/m³.

Au vu de l'écart relatif variant entre -59 et -487 % (tableau 12) le modèle régressif établi n'a pu être justifié. En effet, il existe plusieurs raisons pour les quelles il nous paraît difficile d'interpréter clairement les résultats et de tirer des conclusions nettes concernant le choix de ce type de modèle :

- le grand nombre de concentrations basses et in significantes figurant séries d'observation disponibles
- les concentrations élevées ne sont mesurées qu'en rares occasions.
- les échantillons généralement prélevés à la surface de l'oued, auront une concentration en MES moindre que la concentration moyenne de la vertical
- l'incertitude sur la densité des dépôts et sur les volumes des sédiments déversé ou soutirés

III.5 -2 Les valeurs annuelles moyennes et leur variation spatiale.

L'examen du tableau 12 résumant les caractéristiques annuelles moyennes des écoulements liquide et solide de 22 ans d'observation, révèle clairement que les transports des matières en suspension des bassins étudiés sont variables dans l'espace. Ces variations sont dues aux différents facteurs déterminants du processus érosion-transport solide (lithologie, relief, climat, couvert végétal, et activité anthropique).

La concentration moyenne annuelle est de 0,36 g/l à Medjez Amar II (station du minimum). Elle passe à 6,56 g/l à Kh.SidiNadji (station du maximum), soit une différence de 6,2 g/l.

La dégradation spécifique annuelle varie entre 141,5 tonnes/km² sur l'Oued El Hai à 212,9 tonnes/km² à l'Oued El Guiness pour la période commune.

La différence qui existe entre les apports solides de ces bassins, est probablement liée à la dissemblance du contexte géomorphométrique et lithologique, et à la différence du rôle protecteur de la forêt. L'intervention de l'homme par le biais des activités agricoles a également son influence. Cependant, ces écarts importants ne peuvent être expliqués que par la forte variabilité du phénomène. Dans l'espace et dans le temps, mais aussi par l'imprécision des techniques de mesures et d'évaluation.

| | Estimation à partir des Mesures bathymétriques | | | | | Estimation à partir des mesures de concentration en MES | | | | |
|------------|--|-----------------------------|---------------------|--|---------|---|----------------------|----------|---|--|
| | Barrage | Capacité (Hm ³) | | Envasement moyen annuel (AS_{bb}) ⁽¹⁾ | | Apport moyen annuel à la station hydrométrique (AS_{st}) en tonne | | (Sst/Sb) | Apport moyen annuel au site du barrage (AS_{bc}) en tonne | Ecart relatif ⁽³⁾ (Er) en % |
| | | initiale | Dernier levé (2004) | (Hm ³) | (tonne) | En suspension | Total ⁽²⁾ | | | |
| Bouhamdane | H. Debagh | 200 (1987) | 184,35 | 0,92 | 1196000 | 169865 | 203838 | 1,00 | 203838 | -487 |
| El Gueiss | F. El Gueiss | 3 (1944) | 0,43 | 0,043 | 55900 | 30669 | 36802,8 | 0,954 | 35110 | -59 |
| El Arab | Babar | 41 (1995) | 38,01 | 0,33 | 429000 | 370676 | 444811,2 | 3,673 | 1633791 | 73 |
| El Hai | F. Des Gazelles | 55,5 (2000) | 54,74 | 0,19 | 247000 | 163970 | 196764 | 0,750 | 147573 | -67 |

(1) : Envasement moyen annuel estimé par l'ANB en 2004.
(2) : Le taux de charriage a été estimé d'une façon approximative, à environ 20 % du transport solide en suspension.
 AS_{st} : Apport moyen annuel à la station hydrométrique estimé à partir de concentrations en MES

(3) : L'Ecart relatif : $Er = \frac{AS_{bc} - AS_{bb}}{AS_{bc}}$

AS_{bc} : Apport moyen annuel au site du barrage estimé à partir des mesures de concentration en MES à la station hydrométrique, en tonne ;
 AS_{bb} : Envasement moyen annuel estimé à partir des mesures bathymétriques
Sst : superficie du bassin à la station hydrométrique ;
Sb : superficie du bassin au site du barrage ;

Tableau 12 : Bilan des Apports solides dans quatre bassins

| Bassins | Station | Caractéristiques hydro-pluviométriques | | | Transport solide | | |
|----------------|----------------|--|------------------------------------|---------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | | P (mm) | Q _L (m ³ /s) | Le (mm) | C _{moy} (g/l) | Q _s (kg/s) | D.S (t/km ² /an) |
| OuedBouhamdane | Medjez Amar II | 533 | 2,254 | 64,5 | 0,36 | 5,38 | 154,0 |
| Oued El Arab | Kh Sidi Nadji | 293 | 0,715 | 10,8 | 6,56 | 11,75 | 178,0 |
| Oued El Gueiss | F.ElGueiss | 391 | 0,241 | 52,8 | 3,62 | 0,97 | 212,9 |
| Oued El Hai | El kantra | 361 | 0,416 | 11,3 | 4,3 | 5,2 | 141,5 |

P : pluie moyenne annuelle en mm, Q_L : débit liquide moyen en m³/s, Le : lame d'eau écoulée moyenne en mm, C_{moy} : concentration moyenne en MES en g/l, Q_s : débit liquide moyen en kg/s, D.S : dégradation spécifique moyenne en t/km²/an.

Tableau 13 : Concentration, débit solide, et dégradation spécifique pour les bassins d'étude

III.5 -3 Les variations interannuelles de l'apport solide en suspension.

Les variations interannuelles montrent une grande irrégularité (tableau 14) pour les différents bassins montrent une grande irrégularité des apports en transports en MES. Ces variations sont liées principalement à l'irrégularité des précipitations et donc des apports liquides.

Des volumes considérables de matériaux solides en suspension ont été évacués par les oueds étudiés lors de l'année 1972/73. Lors de cette année caractérisée par une forte hydraulité sur l'ensemble des bassins, l'apport solide de l'Oued El Arab (1715662 tonnes, soit 824 t/km²/an) est largement supérieur à ceux des autres oueds : El Hai (949034 tonnes, soit 811 t/km²/an), l'Oued Bouamdane (385965 tonnes, soit 349 t/km²/an), l'Oued El Gueiss (128582 tonnes, soit 893 t/km²/an).

L'année 1984/85 a été exceptionnelle sur le Bouamdane avec un apport solide de 1216578 tonnes, soit 1101 t/km²/an. Lors de l'année 1979/1980, la station d'El Kantara sur l'oued El Hai a enregistré une valeur importante de l'apport solide (750446 tonnes, soit 641 t/km²/an).

En somme, les variations interannuelles des apports solides suivent celles de l'hydraulité (apports liquides) avec des tonnages considérables caractérisant les années à fréquence élevée des épisodes de fortes crues (Figure 29).

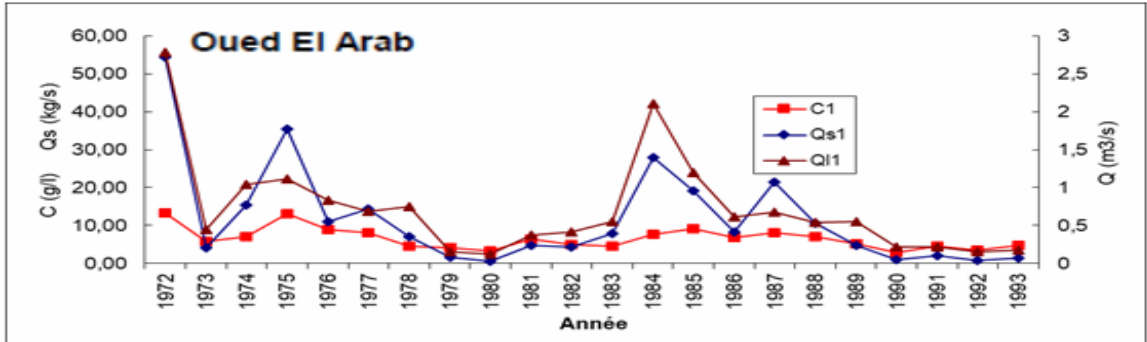
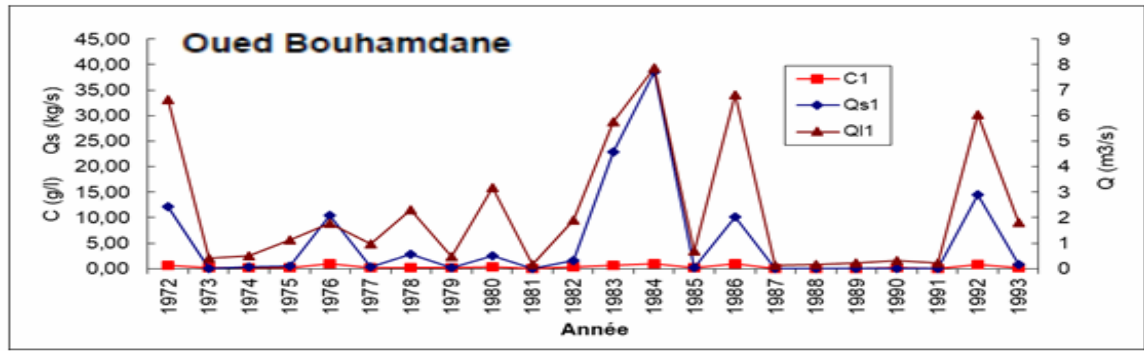


Figure 29 (a) Variations interannuelles des débits solides, débits liquides et des concentrations en MES

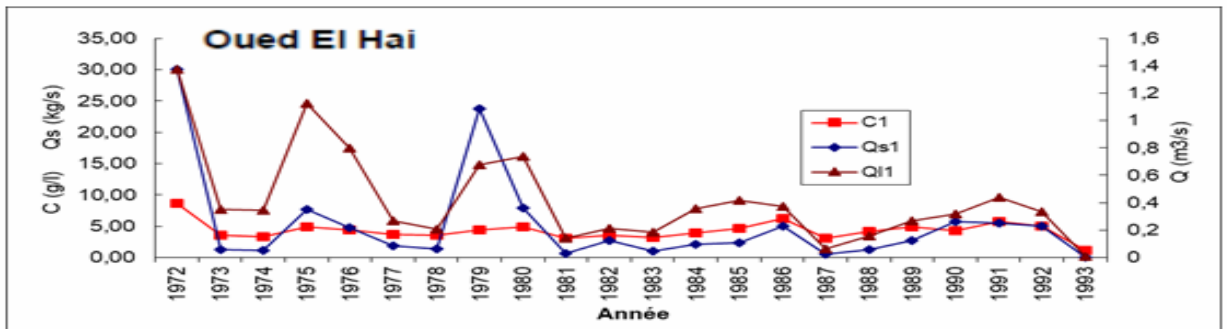
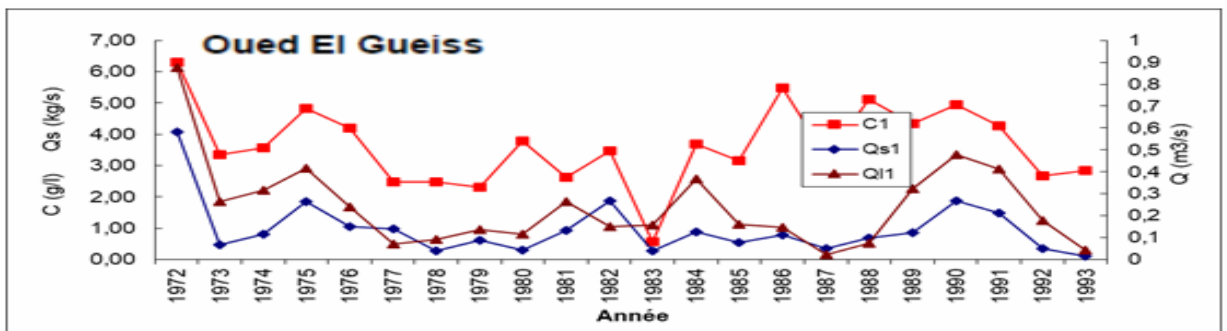


Figure 29 (b) Variations interannuelles des débits solides, débits liquides et des concentrations en MES

| | Oued Bouamdane (t/km2) | Oued El Arab (t/km2) | Oued El Gueiss (t/km2) | Oued El Hai (t/km2) |
|-------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| 72-73 | 385965 | 1715662 | 128582 | 949034 |
| 73-74 | 1824 | 127611 | 15010 | 40557 |
| 74-75 | 10236 | 487178 | 25363 | 34392 |
| 75-76 | 17394 | 1118624 | 58461 | 240211 |
| 76-77 | 330252 | 345284 | 32990 | 151438 |
| 77-78 | 13164 | 453160 | 30943 | 59931 |
| 78-79 | 87311 | 221753 | 8698 | 42860 |
| 79-80 | 4015 | 53951 | 19297 | 750446 |
| 80-81 | 77395 | 19526 | 9550 | 249923 |
| 81-82 | 1259 | 149668 | 29582 | 21963 |
| 82-83 | 48937 | 136399 | 58885 | 86797 |
| 83-84 | 723863 | 249505 | 8887 | 30659 |
| 84-85 | 1216578 | 879427 | 27838 | 67661 |
| 85-86 | 4436 | 607139 | 16871 | 75366 |
| 86-87 | 321651 | 259338 | 24394 | 156862 |
| 87-88 | 385 | 675701 | 10902 | 14784 |
| 88-89 | 578 | 337800 | 21406 | 38132 |
| 89-90 | 704 | 150447 | 27213 | 85228 |
| 90-91 | 3722 | 31272 | 58918 | 179830 |
| 91-92 | 835 | 63876 | 46593 | 173827 |
| 92-93 | 458516 | 25459 | 10746 | 156764 |
| 93-94 | 28001 | 46088 | 3593 | 680 |
| Moy | 169865 | 370676 | 30669 | 163970 |

Tableau 14 : Apports annuels en matières en suspension

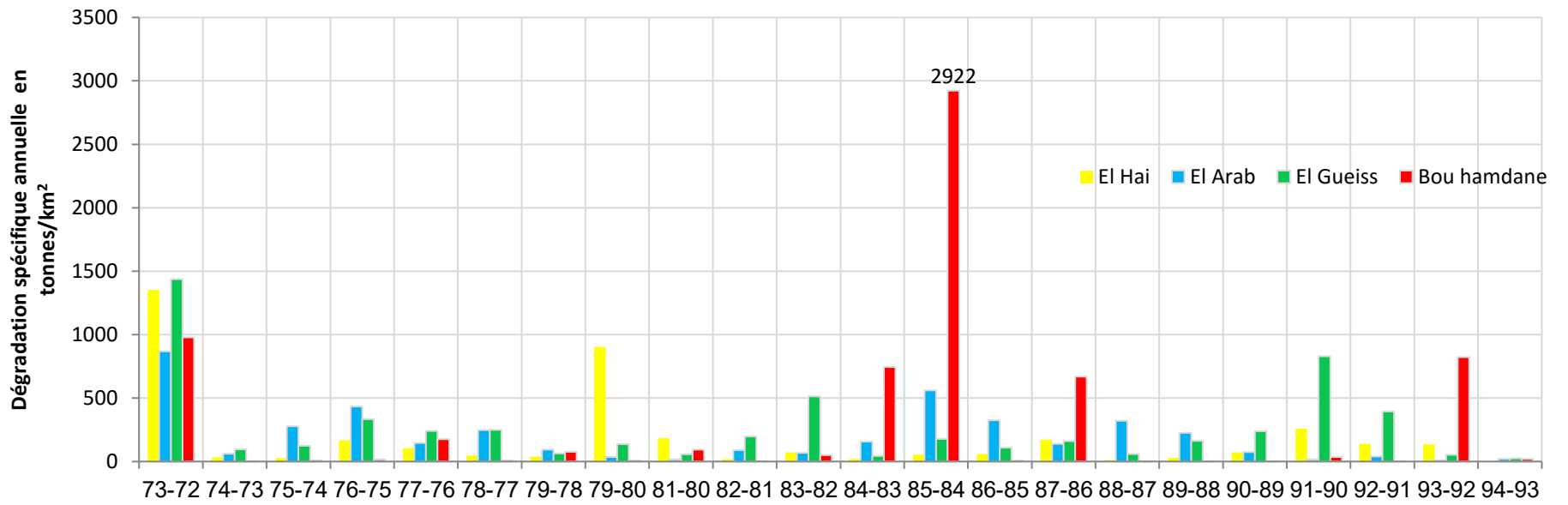


Figure 30 : Dégradation spécifique moyenne annuelle en Tonnes/km²

III.5 -4 Les variations saisonnières et mensuelles.

Le tableau 15, donne en g/l la concentration moyenne mensuelle en MES des quatre oueds étudiés en transports solides en suspension. Les enregistrées pour ces concentration présentent des variations saisonnières reflètent bien la différence d'alimentation des oueds.

Les oueds El Arab, El Gueiss situé sur les deux versants des Aurès se caractérise par un accroissement de la concentration en MES en Automne avec un maximum en septembre (12,9 g/l pour l'Oued El Hai, 10,8 à Oued El Arab et 6 à Oued El Gueis), puis une chute en hiver avec un minimum en décembre (1,6 g/l pour l'Oued El Arab et 0,7 à Oued El Gueis) ou janvier (2,9g/l à Oued El Hai) , et une reprise en mars-avril (Tableau 15, Figure 32).

Sur le Bouhamdane, les concentrations en MES sont relativement faibles et révèlent une certaine régularité mensuelle avec un maximum en novembre-décembre (0,8g/l) et un minimum en mai-aout (0.1 g/l). Ceci est dû principalement à la régularité de la répartition saisonnière des précipitations, leur intensité moyenne voire faible et d'une agressives limitée.

| | | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Aou | Année |
|------------|----|-------------|-----|------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|------|-----|-------|
| Bouhamdane | M1 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,4 |
| El Arab | M1 | 10,8 | 9,8 | 9,1 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 5,2 | 4,6 | 9,7 | 11,8 | 5,5 | 7,1 | 6,6 |
| El Gueiss | M1 | 6,0 | 5,0 | 5,8 | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 2,0 | 1,7 | 1,7 | 7,9 | 5,6 | 5,3 | 3,6 |
| El Hai | M1 | 12,9 | 6,3 | 7,0 | 3,3 | 2,9 | 3,7 | 1,7 | 2,8 | 1,0 | 4,0 | 3,2 | 2,7 | 4,3 |

Tableau 15 : Valeurs mensuelles de la Concentration en g/l

Nous avons également tracés des graphiques à secteurs qui mettent en évidence les variations mensuelles des apports solides en représentant le pourcentage de contribution de chaque mois pour les quatre oueds étudiés (Figure 31).

L'apport moyen mensuel en MES atteint son maximum en septembre pour l'Oued El Hai (69 % de l'apport moyen annuel) et l'Oued El Arab (25%). Il représente 55% de l'apport annuel pour l'Oued Bouhamdane en décembre et 23% en mai pour pour l'Oued El Gueiss.

III.5 -5 La relation saisonnière entre le débit liquide et le débit solide.

L'Oued Bouhamdane a été pris comme exemple pour montrer l'évolution de la charge mensuelle en suspension sur la période (1972/1994). Ceci en traçant un graphique qui met en relation la concentration en sédiments et le débit liquide enregistrés à la station Medjez Amar II.

Dans l'ensemble, les variations saisonnières et mensuelles des concentrations en MES suivent assez fidèlement celles des débits liquides sans qu'il y ait une véritable proportionnalité entre ces deux éléments hydrologiques. On peut remarquer aussi que ce sont les crues qui sont responsables de l'essentiel des transports solides.

Le max du débit estimé à environ $57\text{m}^3/\text{s}$ a été observée en décembre 1984, pour $20,8\text{ g/l}$ de concentration moyenne. Alors que cette dernière atteint en novembre 1986 son maximum de $26,7\text{ g/l}$, largement avant le pic de débit $33,5\text{ m}^3/\text{s}$ enregistré en février. Cette situation Cette situation s'est répétée en 1992 avec un max de concentration ($23,5\text{ g/l}$) enregistré en novembre pour $1,98\text{ m}^3/\text{s}$. Le pic de débit liquide a été de $37,2\text{ m}^3/\text{s}$ en janvier pour une concentration de $2,6\text{ g/l}$. en janvier. Par contre, en Mars 1972, le maximum de concentration a été de $8,3\text{ g/l}$ qui coïncide avec celui du débit liquide ($39,2\text{m}^3/\text{s}$).

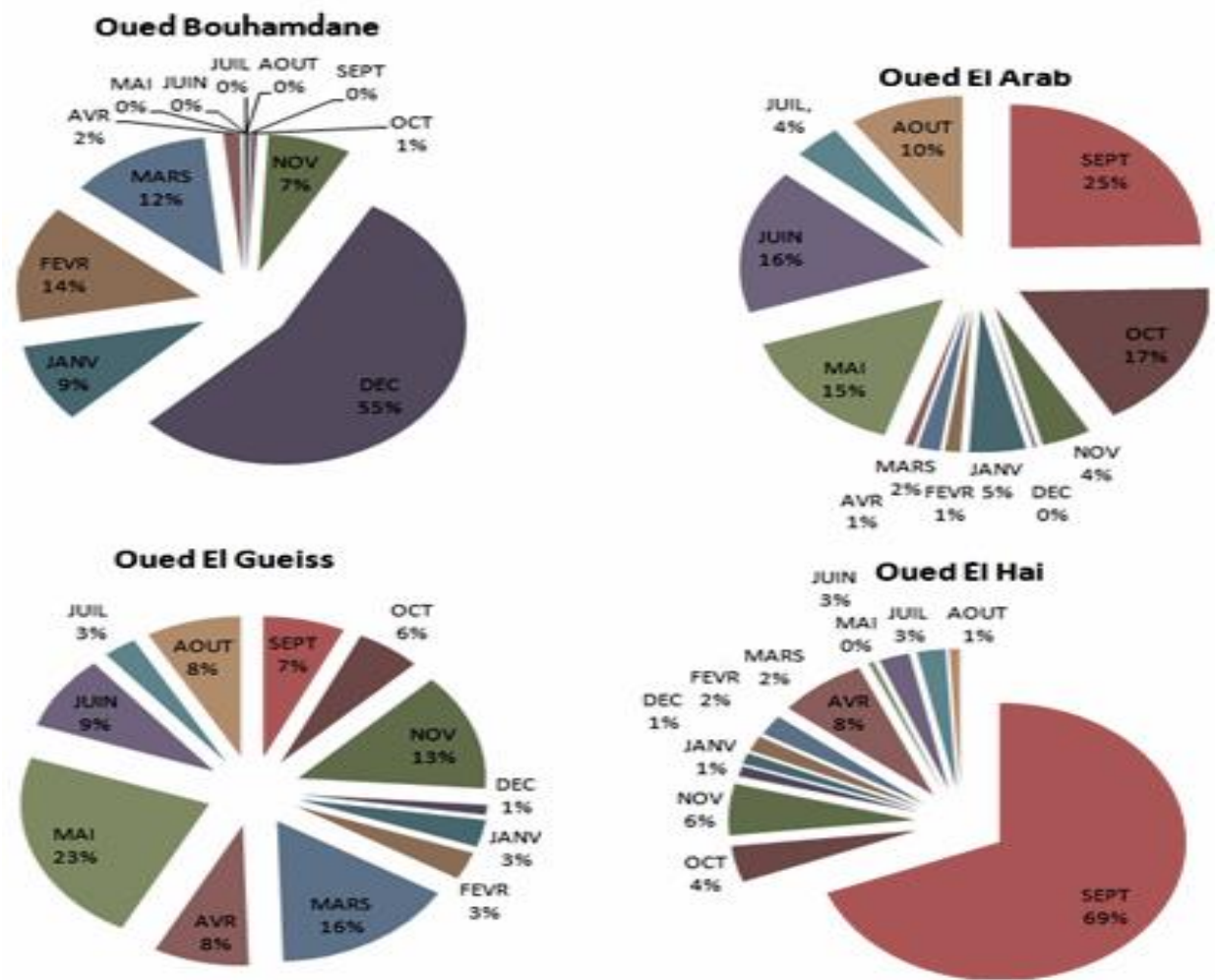


Figure 31 : Répartition mensuelle des Apports solides en %

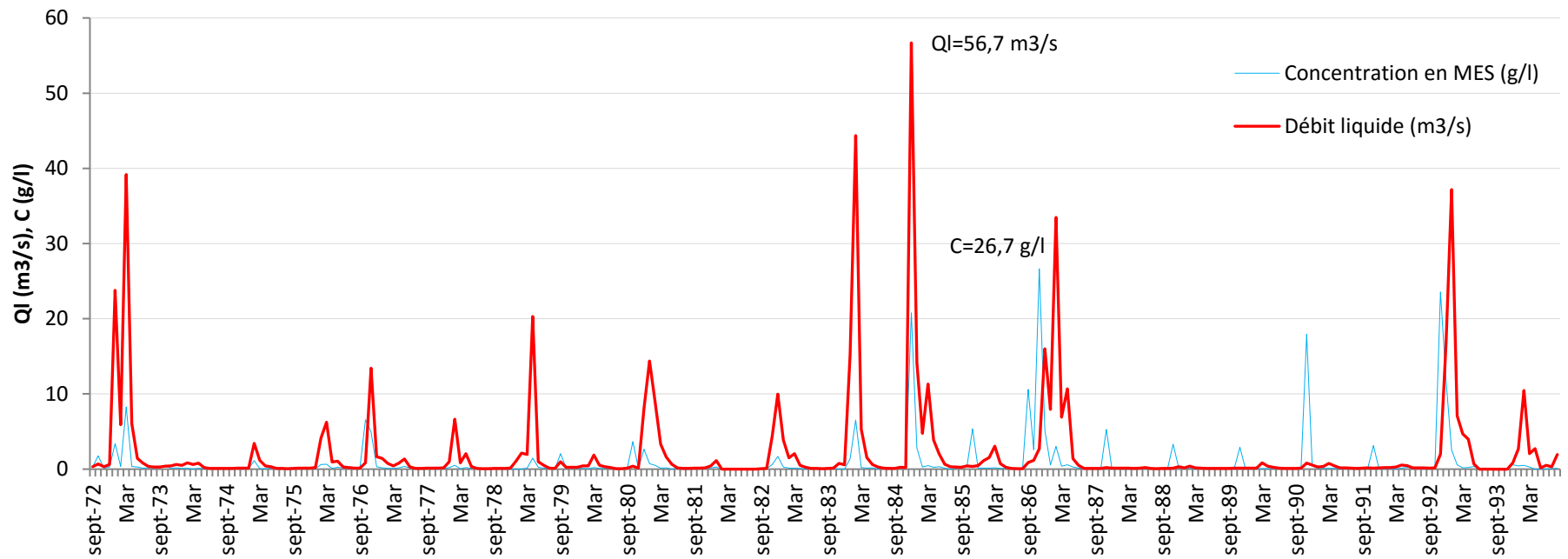


Figure 32 : Relation concentration-débit liquide sur le Bouhamdane à Medjez Amar II

III.5 -6 Les variations journalières et la contribution des crues dans le bilan annuel des apports solides.

Le phénomène du transport solide dans les bassins d'étude semble prendre tout son ampleur lors du déclenchement de crues brutales, à la suite d'averse intense. Afin de mettre en lumière la contribution de ces évènements extrêmes dans le bilan annuel des transports solides, nous avons pris comme exemples l'oued Bouhamdane et celui d'El Gueiss. Le tableau 16 présente quelques valeurs extrêmes de la concentration journalière et instantanée enregistrés au niveau des stations contrôlant ces oueds

| | Date | N ^{re} de Prél. | C moyj (g/l) | Q moyj (m ³ /s) | C max. (g/l) | Q _c max. (m ³ /s) | Heures | A _{sj} .10 ³ (tonnes) | A _{sj} /A _{sm} (%) | A _{sj} /A _{sa} (%) |
|-----------------|------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|--|--------|--|---|---|
| Oued Bouhamdane | 31/12/1972 | 7 | 0,80 | 6,30 | 6,96 | 11,70 | 12:00 | 0,44 | 90 | 0,04 |
| | 23/01/1973 | 8 | 5,00 | 38,51 | 7,07 | 69,00 | 14 :30 | 16,64 | 8 | 2 |
| | 25/01/1973 | 14 | 8,80 | 225,42 | 33,76 | 244,40 | 6 :00 | 171,39 | 80 | 16 |
| | 17/02/1975 | 3 | 5,72 | 16,91 | 8,82 | 0,52 | 8 :00 | 8,36 | 90 | 78 |
| | 08/02/1976 | 4 | 1,39 | 39,24 | 6,56 | 34,58 | 7 :30 | 4,71 | 77 | 25 |
| | 04/05/1976 | 2 | 2,37 | 1,80 | 28,42 | 2,00 | 06:20 | 0,37 | 53 | 2 |
| | 19/05/1976 | 3 | 3,96 | 0,74 | 26,64 | 1,80 | 16 :05 | 0,25 | 36 | 1 |
| | 18/11/1976 | 6 | 6,32 | 233,76 | 10,38 | 296,00 | 12:15 | 127,64 | 74 | 66 |
| | 19/11/1976 | 3 | 1,99 | 67,10 | 2,78 | 57,00 | 12 :00 | 11,54 | 7 | 6 |
| | 06/03/1980 | 3 | 0,81 | 13,60 | 15,94 | 5,60 | 15 :45 | 0,95 | 86 | 14 |
| | 29/12/1984 | 10 | 4,55 | 200,30 | 6,65 | 157,50 | 17 :30 | 78,74 | 2 | 2 |
| | 31/12/1984 | 2 | 7,38 | 624,10 | 7,45 | 489,06 | 15 :30 | 397,95 | 13 | 12 |
| | 30/09/1986 | 5 | 5,65 | 23,27 | 29,66 | 18,50 | 08 :00 | 11,36 | 48 | 2 |
| | 25/11/1986 | 6 | 13,55 | 26,15 | 17,76 | 50,30 | 14 :40 | 30,61 | 16 | 4 |
| | 11/01/1987 | 8 | 2,90 | 13,98 | 5,85 | 38,00 | 06:00 | 3,50 | 30 | 0,5 |
| 05/02/1987 | 7 | 2,90 | 36,56 | 7,31 | 50,30 | 10 :15 | 9,16 | 4 | 1 | |
| 06/02/1987 | 6 | 6,09 | 167,10 | 8,91 | 246,25 | 12:00 | 87,92 | 36 | 12 | |
| 15/11/1990 | 2 | 10,55 | 2,02 | 10,99 | 2,45 | 12:00 | 1,84 | 5 | 5 | |
| El Gueiss | 04/09/72 | 11 | 34,28 | 8,80 | 42,12 | 19,70 | 12 :30 | 11,940 | 12 | 09 |
| | 08/09/72 | 10 | 37,18 | 12,80 | 45,1 | 28,46 | 16 :45 | 11,99 | 13 | 10 |
| | 06/10/72 | 12 | 28,54 | 41,77 | 45,72 | 65,00 | 18 :30 | 11,80 | 41 | 10 |
| | 05/03/80 | 05 | 27,71 | 10,17 | 27,09 | 17,30 | 15 :30 | 05,07 | 52 | 17 |
| | 08/06/88 | 24 | 21,63 | 10,26 | 20,79 | 15,73 | 16 :30 | 20,11 | 22 | 56 |
| | 20/06/89 | 18 | 79,53 | 12,42 | 105,18 | 56,00 | 14 :15 | 39,11 | 97 | 56 |
| | 22/01/90 | 10 | 15,67 | 15,69 | 19,16 | 22,70 | 16 :30 | 08,85 | 93 | 09 |
| | 25/05/92 | 09 | 12,06 | 05,53 | 14,64 | 06,95 | 08 :30 | 02,16 | 87 | 18 |

C moyj : concentration moyenne journalière ; Q moyj : débit liquide moyen journalier.

C max. : concentration maximale journalière ; Q_c max. : débit liquide correspondant à la concentration maximale journalière. A_{sj} : Apport solide moyen journalier ; A_{sm} : Apport solide moyen mensuel ; A_{sa} : Apport solide moyen annuel.

Tableau 16 : Potentialité de la turbidité journalière et instantanée (Oueds : El Gueiss et Bouhamdane)

L'examen des valeurs de transport solide de quelques évènements de crues, rapportées dans le tableau 16, montre que les fortes concentrations ne sont pas obligatoirement le signe d'un apport quantitatif élevé de sédiments, celui-ci étant conditionné par l'importance du débit liquide.

A titre d'exemple, le Bouhamdane a évacuée un volume 397950 tonnes de sédiment seulement pour une concentration de 7,4 g/l, le 31/12/1984. Alors qu'un volume moins important (30610tonnes) a été charrié par le même Oued le 25/11/1986 avec 13,6 g/l de concentration.

En général, la quasi-totalité des apports solides annuels est due aux quelques plus fortes crues de l'année, comme le montre le tableau ? Pour mettre en évidence la contribution de ces crues aux apports solides annuels, nous avons calculé le pourcentage des apports solides des crues sélectionnées aux apports solides moyens mensuels et annuels. Nous voyons à l'examen de ces résultats que :

- 17% des apports solides (période 1971-1993) sont dus aux 13 crues enregistrées à la station de l'Oued El Gueiss.

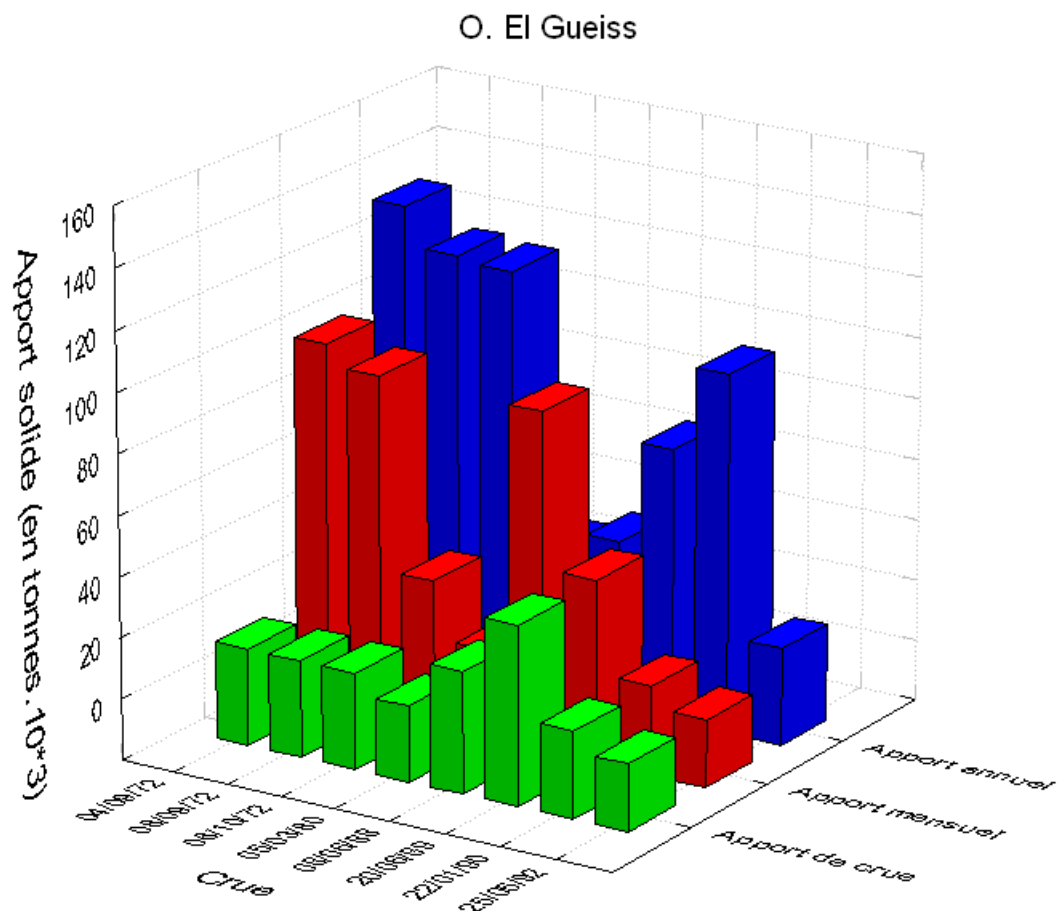


Figure 33 : Potentialité de quelques crues sélectionnées pour l'Oued El Gueiss

- L'apport solide transporté par les 18 crues sur le Bouhamdane qui sont exposées dans le tableau 16 représente 24 % du volume qui a été transportés durant 24 mois répartis sur la période (1972-1990). Il représente également 18% du volume transporté durant 8 ans pour la même période, et 13% de ce qui a été évacué durant 22 ans (1972 - 1994).
- Sur le Bouhamdane également, l'apport solide du 25/01/1973 a été de 171390 tonnes, soit 16% de la moyenne annuelle et le 31/12/1984 a été de 397950 tonnes, soit 12% du total annuel.

Conclusion :

Les apports annuels moyens n'ont qu'une signification théorique, en raison de la forte variabilité interannuelle de l'écoulement mise en lumière par les valeurs de l'hydraulicité et du coefficient de variation, ainsi que par des données des estimations fréquentielles.

Le régime d'écoulement est variable et irrégulier, car dépendant du régime des pluies et de réponse du milieu physique des bassins.

L'étude des extrêmes de l'écoulement sur les oueds équipés des bassins de la région d'étude a permis de confirmer le caractère d'irrégularité et d'immodération qu'on a déduit précédemment dans l'analyse du régime.

Les écoulements solides, constituent un phénomène irrégulier, complexe et aléatoire. Les facteurs mis en jeu sont nombreux et interdépendants. En se basant sur les données disponibles observées aux stations hydrométriques, nous avons essayé d'apporter une contribution à l'étude de transport solide en suspension dans quatre bassins représentatifs de la zone d'étude.

La comparaison des résultats de l'analyse statistique aux mesures bathymétriques disponibles, permet de conclure qu'aucun modèle régressif n'a pu être généralisé sur les bassins étudiés et que le regroupement des données par mois est adapté pour 67% des cas. Au final, le cas le plus défavorable en termes de risque a été choisi.

Les variations saisonnières et mensuelles des concentrations en MES suivent celles des débits liquides sans qu'il y ait une fidèle concordance entre ces deux paramètres. La moyenne annuelle en suspension est plus importante sur les bassins des Aurès que sur la Seybouse. Elle passe de 0,9 g/l sur le Bouhamdane.

A ces variations spatiales de la concentration en MES, s'ajoutent des variations temporelles.

En effet les transports solides en suspension varient d'une année à l'autre. Ils mettent en évidence l'irrégularité des précipitations et de l'hydraulicité.

Les bassins versants des quartiers sud (Aurès) se caractérisent par un accroissement de la concentration en MES en automne, puis une chute en hiver, et une reprise en mars-avril. Alors que les teneurs mensuelles en suspension sur la Seybouse sont relativement faibles et révèlent une certaine régularité mensuelle. Ceci est principalement dû à la répartition des précipitations.

Les crues représentent de loin la part la plus importante, des débits solides globaux dans la région. Leur contribution dans la production annuelle des sédiments transportés en suspension peut atteindre des pourcentages remarquables.



conclusion

Conclusion Générale

Le nord-est de l'Algérie regroupe des ensembles morpho-structuraux bien tranchés et très divers, avec des caractéristiques variées quant aux substrats, aux déclivités et aux climats. La combinaison de ces facteurs naturels a déterminé un régime d'écoulement à potentialité variée, que l'intervention de l'homme a fortement modifiée au cours des dernières décennies, en édifiant de nombreux barrages sur les oueds drainant les bassins de cette région.

Les écoulements solides dans le nord-est algériens, constituent un phénomène irrégulier, complexe et aléatoire. Les facteurs mis en jeu sont nombreux et interdépendants. En se basant sur les données disponibles observées aux stations hydrométriques, nous avons essayé d'apporter une contribution à l'étude de transport solide en suspension dans quatre bassins qui nous ont apparus comme représentatifs de la variété hydrologique de région.

Appartenant à trois ensembles hydrographiques distincts, la Seybouse, les hauts plateaux constantinois et Chott Melhir, les bassins étudiés s'étalent sur des superficies variant entre 144 et 2083 km².

Nous avons commencé notre étude par une présentation de l'état de l'art et de connaissances en matière d'érosion hydrique et de transport solide. Ensuite, une analyse du complexe physique des bassins versants sélectionnés a été établie, notamment, sur le plan la géomorphométrie, lithologique, occupation du sol et couverture végétale, ainsi que la climatologie.

Ceci a montré que la disposition morpho-structural de ces bassins est très compliquée. Elle est marquée par une dissymétrie dans la répartition altimétrique et hydrographique, entraînant des conséquences sur la stabilité des régimes des écoulements liquide et solide.

La description des formations lithologiques rencontrées au niveau des quatre bassins étudiés a permis de mettre en relief leur impact de ces formations sur l'hydrologie de surface et plus particulièrement sur l'érosion hydrique des sols et le transport solide. Ainsi, les formations végétales qui assurent une protection seulement partielle à médiocre, sont les plus représentées dans le bassin étudié, Ce qui présage d'un écoulement torrentiel et d'une érosion très développée.

L'analyse a montré aussi que les facteurs climatiques notamment, les précipitations sont très nuancés sur le plan spatial. Ce dernier facteur varié principalement avec l'orographie, la position géographique (latitude et longitude) et l'éloignement à la mer. Il présente aussi, une irrégularité d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre.

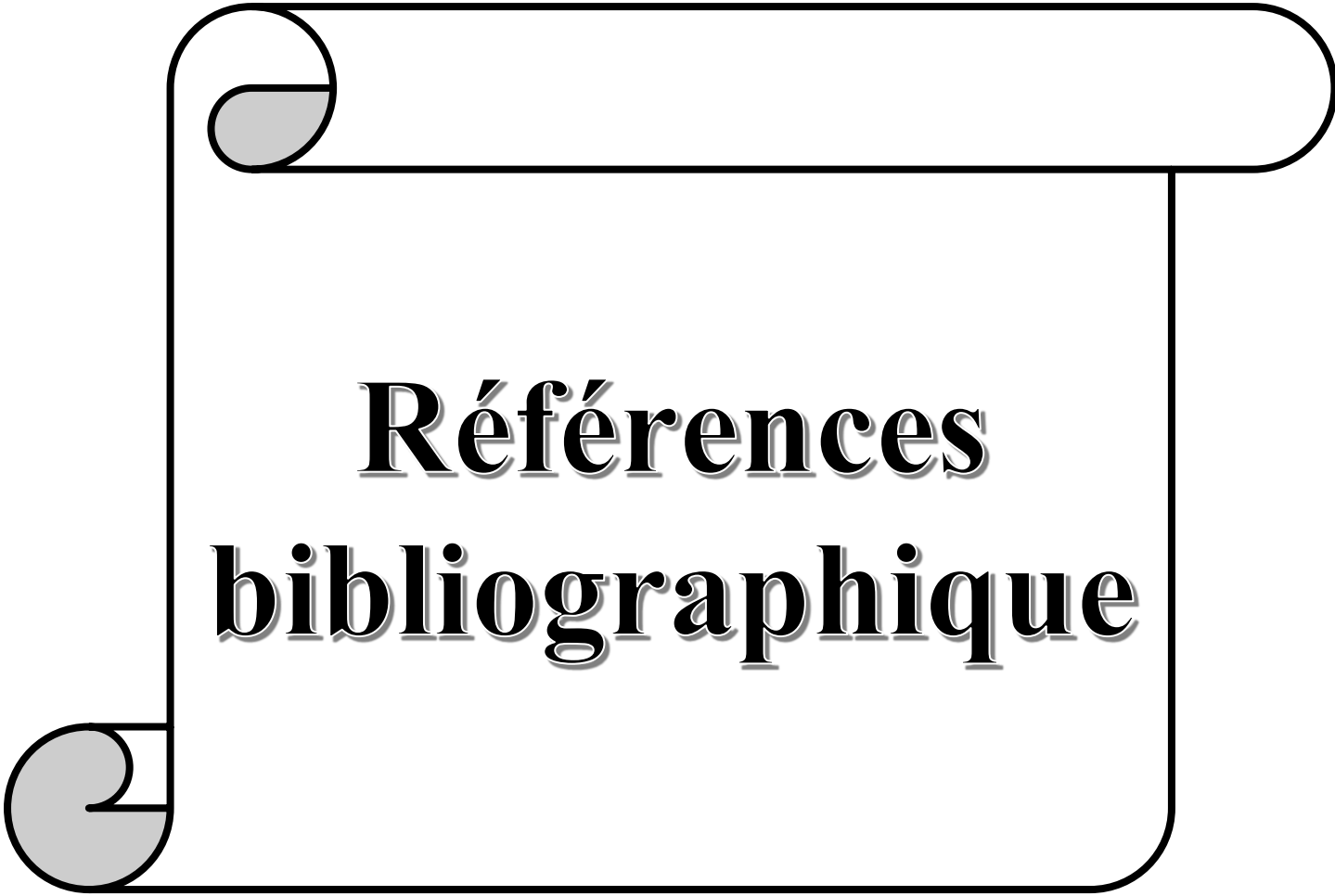
Ensuite une attention particulière a été portée à l'analyse et à la quantification des apports solides transportés par les oueds étudiés. Pour cela, nous avons procédé à une approche statistique à travers la mise en évidence de relations statistiques de type puissance ($Q_s=a.Q^n$) entre les débits liquides et solides mesurés dans les stations hydrométriques à leurs exutoires. Des mesures des concentrations en MES effectuées sur la période 1972-1994 par l'agence nationale des ressources hydriques, au niveau des stations hydrométriques contrôlant les bassins étudiés ont été exploitées.

La comparaison des résultats de l'analyse statistique aux mesures bathymétriques disponibles, permet de conclure que le modèle régressif établi n'a pu être justifié et l'interprétation claire des résultats de cette modélisation statistique est difficile. Ceci pour différentes raisons concernant principalement la procédure de mesures.

Les résultats ont permis de mettre en évidence une dégradation spécifique importante variant entre 140 t/km²/an sur le bassin de l'Oued El Hai et 213 t/ km²/an sur l'Oued El Gueiss pour la période (1972-1994).

Les transports solides en suspension varient aussi d'une année à l'autre ; Ils mettent en évidence l'irrégularité des précipitations et de l'hydraulicité. La concentration maximale a été enregistrée généralement en automne, lors des violentes crues. Elle est minimale en année de faible hydraulicité, en saison sèche, et en hiver en absence des crues brutales.

Cette analyse nous a donné une idée sur l'ampleur du phénomène de l'érosion hydrique dans le nord-est algérien, et la gravité de ces conséquences socioéconomiques, notamment l'envasement des barrages réservoirs et l'alluvionnement des terres agricoles.



Références bibliographique

Références bibliographiques :

- Achite M., Ouillon S, 2007.** Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1975) ». J. Hydrol., n°343.
- Aouachria M., 2008.** Analyses morphodynamique et hydropluviométrique de la Vallée de Oued El Arab et leurs Impacts Sur la pérennité Du Barrage de de Babar. Mémoire de Magister En aménagement du territoire, Université El Hadj Lakhdar – Batna
- Belagoune F., 2012.** Étude et modélisation des crues des cours d’eaux en milieu semi-aride « Cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 ».Mémoire de Magister en Hydraulique Option : Aménagement hydraulique en zones arides, Université KasdiMerbah Ouargla.
- (Belhedi A. 2010)** ; changement climatique et ressources en eau (cas d’étude de l’eau potable en tunisie) Tunis
- Benchaiba L (2006)** Condition d’écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau bassin versant de Bouhamdane. Mémoire de magistère en Hydraulique, Université El Hadj Lakhdar Batna .
- Bentouati A., 2006.** Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d’Alep (*Pinus halepensis* M.) du massif de Ouled Yakoub (Khenchela-Aurès). Doctorat d’état en Sciences Agronomiques, Université El Hadj Lakhdar-Batna.
- Benkhaled A., Remini B., 2003.** Analyse de la relation de puissance : débit solide-débit liquide à l’échelle du bassin versant de l’Oued Wahrane (Algérie) .Rev. Sci. Eau, n° 16/3.
- (Bouanani A. 2004)** ;hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie).Université Abou BekrBelkaid Tlemcen.
- (Bouklikha Z. &Berrichi M. 2017)** ; Estimation de l’envasement d’un barrage par le modèle PISA. Cas du barrage de ElIzdihar. Université Abou BekrBelkaid Tlemcen.
- Bou Kheiret al (2001)** Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique. ÉtudGest Sols 8(4):
- (Bourouba, M. 1998).**hydrologie et érosion actuelle dans le Tell oriental(Algérie) le cas du bassin versant de oued Djendjen
- Campbell F B, Bauder H A (1940)** A rating-curve method for determining silt-discharge of streams, EOStansactions American Geophysical Union, 21.
- Chebbaniet al (1999)** Etude à différentes échelles des risques d’érosion dans le bassin versant de l’Isser. Bulletin ORSTOM, réseau érosion,
- Cemagref Lyon 2011** ;Méthologie de mesure du transport solide en Loire ,centre d’études techniques de l’équipement France.
- Camenen et al, 2012)** Mesures de transport solide par charriage dans les rivières de Piémont. Séminaire "Morphodynamique et transport solide en rivière", Tours, France,

CETE Normandie Centre – Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois 2011.

Dali N., 2009. Ressources et gestion intégrée des eaux du bassin de Gareat ElTarf (W. Khenchela) Mémoire de Magister en hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba

Demmak A (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Paris VI.

Elahcene O., Remini B., 2009. Corrélation entre la concentration en matières en suspension et le débit liquide dans le bassin versant d'Oued Bellah (Algérie). EJSR, n° 26/1.

FAO (1993) Field Measurement of Soil Erosion and Runoff. N.W. Hudson. FAO Soils Bulletin, 68, Rome

Ghachi A (1986) Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. Thèse. Doctorat, OPU.

(Granier, 1983) ; Morphodynamique et transport solide en rivière du terrain aux modèles, Université François Rabelais Tours France

Guidoum A, 2004. Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Chemorah à la station de Chemorah. (w. de Batna, Est algérien). Mémoire de Magister en hydraulique. Université du colonel Labidi Mohammed Tahar dit el Hadj Lakhdar - Batna.

Guidoum A., 2017. Caractérisation hydrologique et analyse du transport solide en suspension dans trois ensembles hydrographiques du Nord-Est Algérien, Etude de cas dans la Seybouse, les hautes plaines Constantinoises et Chott Melghir (coupe Nord-sud). Thèse de Doctorat en science. Université Mohamed Khider, Biskra. Algérie.

Hasnain S I (1996) Factors controlling suspended sediment transport in Himalaya glacier meltwaters. J. Hydrol.

([Http://www.discip.accaen.fr/svt/pages/college/eau_douce/qualite_eau.php](http://www.discip.accaen.fr/svt/pages/college/eau_douce/qualite_eau.php)).

([Http : www .reart66.fr /les milieux-aquatiques/le transport– solide.html](http://www.reart66.fr/les_milieux-aquatiques/le_transport_solide.html)).

([Http://hydram.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html](http://hydram.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html) 2004).

Jodeau, M. 2003 ; Chasse hydraulique dans la vallée de l'Arc (France).

Kerboub Dj., 2012. Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux souterraines, cas de la région d'El Kantara, Sud-est algérien. Mémoire de Magister en hydrogéologie appliquée, Université de Tébessa

Lakhdari S., Houha B., et Smail H., 2013. La qualité des eaux souterraines dans les régions semi-arides (cas de la wilaya de Khenchela). Proceeding du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE 2013 Ouargla.

- Laffitte R (1939)** Etude géologique de l'Aurès, Thèse Sci, Paris, Bull. Serv. Géol. Alg.
- Larfi B., Remini B., 2006.** Le transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser : impact sur l'envasement du barrage de Beni Amrane (Algérie) ». Larhyss Journal, 2006, n° 5.
- Lefort P (1992)** Cours de transport solide dans le lit des cours d'eau. Grenoble : Institut national polytechnique de Grenoble (INP).
- Leopold L B, Maddock T G (1953)** The Hydraulic geometry of stream channels and some physio-graphic implications. Washington D. C. U. S. Geological. Survey. Professional Paper.
- Loumari A. 2013 ;** le bassin-versant de la Seybouse (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux université de Constantine 1.
- Mansouri Z., 2009 .** Les ressources en eau et gestion intégrée du bassin versant de l'Oued Bouhamdane (Nord-Est Algérien). Mémoire de MAGISTER en Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- Marechal A (2000)** Relations entre caractéristiques de la pollution particulaire et paramètres optiques dans les eaux résiduaires urbaines. Thèse de doctorat : Génie des procédés. Institut national polytechnique de Lorraine, France, 284p.
- Mazour M, Roose E (2002)** Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du Nord –Ouest de l'Algérie. Bulletin Réseau Erosion 21, IRD, Montpellier (France)
- Mebarki A. 2005** hydrologie des bassins de l'Est Algérien : Ressources en eau, aménagement Et environnement. Université Mentouri de Constantine
- Medinger J M (1960)** Transport solide des oueds algériens. Annuaire hydrologique de l'Algérie 1958/59, Direction de l'Hydraulique et de l'équipement rural de l'Algérie, Alger.
- Meharzi M. K., 2010 .** Forêts, géosystèmes et dynamique du milieu : le cas de l'Aurès. Thèse de Doctorat d'Etat en Aménagement du Territoire- Option Géographie Physique Université des frères mentouri-Constantine.
- Megnounif A., Terfous A., Bouanani A., 2003.** Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (nord-ouest algérien) ». Rev. Sci. Eau, n° 16/3.
- Mekaoussi H (2003)** Etude hydr-ochimique du bassin versant du barrage de Fontaine des Gazelles, Mémoire de Magister: construction hydraulique, Département d'hydraulique, Université Hadj Lakhdar- Batna.

Musset R (1935) Les calculs relatifs au régime pluviométrique : fraction pluviométrique, écart pluviométrique relatif, coefficient pluviométrique relatif. Etudes Rhodaniennes, 11.

Nouvelot J F (1993) Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versant ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH ; ORSTOM, 545 p.

Office International de l'eau 2004- Algérie.

Probst, J.L. et al. 1989 et Cardoso, A.H. 1994. Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Sci. Géol. Bull., 39, 1, 79-98.

Rassi.W 2004 ; le transport solide estimation et mesure Ecole nationale de génie rural des eaux et des forêts France

Remini B., Hallouche W., 2005. La sédimentation dans les barrages algériens ». Houil. Blanc., n° 1.

Roose E (1994) Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique de la FAO.

Rerboudj A. M., 2005. Essai de quantification de l'érosion et perspective de la protection du barrage de Fontaine des Gazelles contre l'envasement (Approche numérique). Mémoire de Magister dynamique des milieux physiques et risques naturels, Université Colonel El Hadj Lakhdar-Batna.

Restrepo J D, Kjerfve B (2000) Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. J. Hydrol. 235

Seltzer P (1946) Le climat de l'Algérie, Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel.

Terfous A, Megnounif A, Bouanani A (2001) Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-ouest algérien). Revue des Sciences de l'eau.

Touaïbia B, Dautrebande S, Gomer D, Aidaoui A, (1999) Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales: bassin versant de l'Oued Mina. HydrolSci J, 44/6

Walling et al. (1981) The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement (Proceedings of the Florence Symposium. IAHS, 133