



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



Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بو علي - الشلف -

Université Hassiba Ben Bouali Chlef

معهد العلوم الزراعية

Institut des Sciences Agronomiques

مخبر الماء و البيئة

Laboratoire Eau – Environnement

Mémoire en Vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : Hydraulique Agricole

Option : Hydrologie et Aménagement des Bassins Versants

Thème

*Evaluation de l'érosion hydrique et de l'envasement du barrage
Sidi M'hamed BenAouda(S.M.B.A), bassin versant de la Mina,
Nord-ouest Algérien.*

Présenté par : Mr.TOUBAL Abderrezak Kamel.

Devant le Jury composé de :

Président	Mr. BOUTHIBA A.	Professeur, U.H.B Chlef
Encadreur	Mr. ACHITE M.	Maitre de conférences (A), U.H.B Chlef
Examineurs	Mr. HAMOUDI S. A.	Professeur, U.H.B Chlef
	Mme. BETTAHAR N.	Maitre de conférences (A), U.H.B Chlef
	Mr. NADJAI S.	Maitre de conférences (B), U.H.B Chlef
	Mr. MAHIEDDINE M.	Maitre assistant (A), U.H.B Chlef

Année universitaire : 2013-2014

Résumé

Résumé :

L'érosion hydrique des sols et la sédimentation des barrages en Algérie suscite un intérêt particulier chez les pouvoirs publics vu la gravité du phénomène tant sur le plan économique que social. Le présent travail a pour objectif principal l'évaluation indirecte des pertes en sols du bassin versant de l'oued Mina (4900km²) caractérisé par un climat semi-aride, ainsi que le taux d'envasement du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (S.M.B.A).

L'étude de la variabilité des précipitations dans la zone d'étude porte sur les chroniques de la période (1978/79 - 2009/10). Des méthodes statistiques de détection de ruptures au sein de séries chronologiques nous ont permis de mettre en évidence une modification du comportement de la pluviométrie, ces dernières dévoilent une augmentation brutale de la pluviométrie autour des années 2006 et 2007.

L'analyse morphométrique du réseau hydrographique montre que le nombre total des cours d'eau est égal à 10073, répartis entre divers ordres hiérarchiques, l'ordre supérieur du cours d'eau principal est l'ordre 8. L'Analyse Géomorphologique Quantitative (A.G.Q) laisse apparaître une valeur de l'érosion spécifique de 834,1 t/Km²/an correspondant à 66,415 Hm³ de sédiments érodés entre (1978/2003), ces deux années coïncident respectivement à la mise en eau du barrage et au dernier levé bathymétrique effectué. Dans un premier temps, en comparant les résultats trouvés avec le modèle (A.G.Q) et les mesures réelles nous constatons une sous-estimation avec une erreur de 18,3%, par contre en additionnant le volume de vase trouvé par levé bathymétrique aux volumes de sédiments évacués par les organes de vidange entre 1978 et 2003 l'écart augmente jusqu'à 48,31%. Partant de ce résultat final le modèle (A.G.Q) n'est pas applicable pour la zone d'étude.

L'évolution topographique de la retenue du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda entre 1978 et 2003 montre que l'envasement de la cuvette est un phénomène non linéaire. L'application du modèle P.I.S.A (Previsioni Interimento Serbatoi Artificiali) sur les sous-bassins de la zone d'étude montre une répartition variable de production des sédiments, certainement due aux conditions lithologiques, topographiques, climatiques et d'occupation des sols. Le taux global d'envasement estimé est de 136,589 Hm³ (1978/2003) correspondant à une érosion spécifique de 1715,40 t/km²/an, l'estimation de l'envasement est obtenue par addition du taux de production des sédiments de chaque sous-bassin. En le comparant au résultat trouvé par levé bathymétrique, l'écart s'évalue à 68,02 %, mais en se référant au volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003), l'erreur diminue jusqu'à 6,3%. Ainsi, on pourrait constater pour le barrage S.M.B.A une compatibilité entre les estimations issues du modèle P.I.S.A et les mesures réelles.

Afin de localiser la hiérarchie des zones vulnérables à l'érosion hydrique, on se base sur des données de terrain, cette dernière nécessite l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (S.I.G). Nous avons superposé et analysé plusieurs facteurs, tels que la pente, la nature des matériaux affleurant, le couvert végétal et le réseau hydrographique, à cet effet trois zones sont distinctes. La partie septentrionale du bassin versant présente un ravinement dans un stade avancé qui représente 10% de la superficie totale. Au deuxième degré la partie centrale Est renferme des terres moyennement érodées avec une proportion de 57%. La partie Sud est une zone à faible sensibilité à l'érosion hydrique, elle représente le tiers de la superficie. Partant de ce constat la priorité d'intervention revient à la protection du barrage S.M.B.A contre un envasement précoce, pour cela les travaux de lutte antiérosifs doivent être planifiés du Nord vers le Sud.

Dans une optique de développement durable, nous proposons des moyens de lutte antiérosifs biologiques et mécaniques. Chaque méthode employée consiste à respecter son site d'implantation ainsi que leurs recommandations techniques. La réalisation des travaux vise à augmenter la durée de vie de l'ouvrage d'une manière économique.

Mots clés: Erosion hydrique des sols - Algérie - bassin versant de l'oued Mina - barrage Sidi M'hamed Ben Aouda - modèle A.G.Q - modèle P.I.S.A.

ملخص :

إن مشكلة انجراف التربة و توحل السدود في الجزائر أيقضت لدى السلطات العمومية بخطورة هذه الظاهرة من الناحية الاقتصادية والاجتماعية. العمل الحالي هدفه الرئيسي هو التقييم الغير مباشر لكمية انجراف التربة في حوض وادي مينا4900كم² والذي يتميز بمناخ شبه جاف.بالإضافة إلى تقييم نسبة توحل سد سيدي محمد بن عودة.

فترة دراسة تغير التساقطات المطرية في منطقة الدراسة تتراوح بين(1978/79 - 2009/10). إن الطرق الإحصائية للكشف عن الانقطاع في سلسلة المعطيات سمحت لنا بإثبات تغيير مفاجئ في تقلب تساقط الأمطار عامي 2006 و2007.

التحليل المورفومتري للشبكة الهيدرولوجية يبرز لنا أن العدد الإجمالي للأودية هو 10073 موزعة على مختلف الرتب التدريجية وأن أعلى رتبة للوادي الرئيسي هي 8. التحليل الكمي الجيومورفولوجي (A.G.Q) أدى إلى ظهور قيمة انجراف تقدر بـ 834,1 طن/كم²/عام أي ما يعادل 415,66 هم³ من كمية الانجراف في الفترة 1978-2003 هاتان السنتين تصادفا بداية استغلال السد و آخر قياس للأعماق.في بادئ الأمر نقوم بمقارنة النتائج بين نموذج (A.G.Q) و قياسات الأعماق فتحصلنا على نسبة الخطأ 18,3% أما عندما نضيف حجم الرواسب المتحصل عليه من خلال قياس الأعماق إلى حجم الرواسب التي تم استخراجها عن طريق صمام التفريغ بين 1978 و 2003 فنسبة الخطأ تزيد حتى 48,31%. انطلاقا من هذه النتيجة نستنتج ان نموذج (A.G.Q) لا يطبق على منطقة الدراسة لتقييم كمية انجراف التربة.

التطور الطبوغرافي لسد سيدي محمد بن عودة بين 1978 و 2003 بين أن توحل السد هو ظاهرة غير خطية. تطبيق نموذج (P.I.S.A) على الأحواض الفرعية لمنطقة الدراسة اظهر وجود توزيع مختلف في كمية انجراف التربة، هذا الاختلاف راجع إلى الشروط الجيولوجية، الطبوغرافية، المناخية و النباتية. النسبة الكلية لتراكم الطمي تقدر بـ 136,589 هم³ (2003/1978) ما يعادل 1715,40 طن/كم²/عام. كمية توحل السد تم الحصول عليها بعد جمع كميات الرواسب المنتجة من طرف هذه الأحواض التالية. عند مقارنتها بنتائج آخر قياس عمق فإن الفرق يصل إلى 68,02% ولكن عند مقارنتها بكمية الرواسب التي وصلت إلى الخزان في الفترة بين 1978 و 2003 فإن الخطأ ينخفض إلى 6,3% في الأخير نستطيع القول أن نموذج (P.I.S.A) هو الذي يعطي نتيجة مقارنة لقياسات العمق.

حتى نتمكن من حصر المناطق المعرضة لعملية الانجراف استعملنا المعطيات الميدانية و نظام المعلومات الجغرافية (S.I.G)، لذا قمنا بمطابقة و تحليل عدة عوامل منها الغطاء النباتي، المنحدر، الجيولوجيا و الشبكة الهيدرولوجية. لهذا الغرض تحصلنا على ثلاث مناطق متميزة.الجزء الشمالي للحوض متميز بانجراف في مرحلة متقدمة وهو ما يمثل 10 % من المساحة الإجمالية، في الدرجة الثانية الجزء المركزي الشرقي للحوض متميز بانجراف في حالة متوسطة بنسبة 57 % أما الجزء الجنوبي للحوض الذي يمثل ثلث المنطقة فان نسبة الانجراف منخفضة فيه. على هذا الأساس ينبغي التدخل فورا ضد ظاهرة التوحل المبكر لسد سيدي محمد بن عودة حيث ينبغي أن تكون الحماية من الشمال نحو الجنوب.

في منظور التنمية المستدامة، فإننا نقترح طرق الحماية البيولوجية والميكانيكية للسيطرة على انجراف التربة من اجل زيادة عمر السد و هذا يتم بإستراتيجية اقتصادية.

مفتاح الكلمات :

انجراف التربة- الجزائر- حوض وادي مينا - سد سيدي محمد بن عودة - نموذج(A.G.Q)- نموذج(P.I.S.A).

Abstract

Abstract:

The soil erosion and dam sedimentation in Algeria, gives a particular interest for government, in addition to the effect of this phenomenon which touch both, economic and social front; the main objective of the present work is the indirect assessment of soil loss in wadiMina watershed.(4900 Km²) characterized by a semiarid zone, as well as the rate of dam siltation of SidiM'hamed Ben Aouda(S.M.B.A).

The variability study of the rainfall in the study area focuses on the chronicles of the period (1978/79 - 2009/10).Statistical methods for detecting breaks in time series allowed us to highlight a change in behaviour of rainfall, in recent reveal a sharp increase in rainfall during the year 2006 and 2007.

The morphometric analysis of the hydrographic network shows that the total number of streams is equal to 10073, distributed among various hierarchical levels, the higher order of the main stream is about 8. The Quantitative Geomorphological Analysis (Q.G.A) shows a value of the specific erosion reach to 834,1t/Km²/an 4,09x10⁶ tonnes, corresponding to 66,46 Hm³ of sediment eroded between (1978-2003). These two years coincide respectively the water impoundment of the dam and the bathymetric survey conducted eventually.At first by comparing the results found with the model (Q.G.A) and the actual measurement we find an underestimation with an error of 18,3 %. However, by adding the volume of mud found by bathymetric survey,the volume of sediment evacuated by the fitting discharge between the year (1978-2003) the difference increases to 48,31%.Based on this result the (Q.G.A) model is not appropriate to the study area.

The topographic evolution of the dam SidiM'hamed Ben Aouda between 1978 and 2003 shows that siltation of the bowl is a nonlinear phenomenon. The application of the model (P.I.S.A) (PrevisioniInterimentoSerbatoiArtificiali) on the sub-basins of the study area shows a variable distribution of sediment production, certainly due to lithological, topographical, climatic and land use. The estimated overall rate of siltation is 136,589 Hm³ (1978 /2003), obtained by adding the sediment production rate for each sub-basin. By comparing the results by bathymetric survey, the gap is estimated at 68,02 %, but in reference to the total volume of sediment transport arrived at the dam between (1978 /2003), the error decreases until 6,3%.So one could say that the P.I.S.A model is applicable to the study area.

To locate the hierarchy vulnerable to water erosion areas, based on field data, the latter requires the use of a Geographic Information System (G.I.S), we superimposed and analyse several factors, such the slope, the materials flush, vegetative cover and water systems to this last three areas are distinct. The northern part of the basin has an event in an advanced stage which represents 10% of the total area; second degree the central eastern part contains moderately eroded land with a proportion of 57%. The southern part is an area of low sensitivity to erosion; it is the third of the area. On this basis the priority intervention amounts to protection against S.M.B.A dam siltation early for this fight erosion control work must be planned from North to South.

In a sustainable development perspective, we propose means of biological and mechanical erosion control achievement steps. Each method used is to meet its implementation as well as their technical recommendations site. The project work aims to increase the structure life of the in an economical manner.

Keywords:Soil erosion - Algeria - Wadi Mina watershed - SidiM'hamed Ben Aoudadam-Q.G.A model - P.I.S.A model.

REMERCIEMENTS

J'arrive à cette étape de mes études grâce aux efforts conjoints et solidaires d'une pléiade d'enseignants allant du stade primaire à celui universitaire, je rends hommage au corps de l'enseignement pour son dévouement et son attachement au succès de ses élèves.

Dans cette optique je remercie :

Mr ACHITE Mohammed, Maître de Conférences Classe "A" à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef pour l'ouverture de la filière du Magister option : "Hydrologie et Aménagement des Bassins Versants".

Toute ma gratitude et ma reconnaissance va vers **Mr ACHITE Mohammed** ce compagnon de tous les jours, de toutes les heures, de toutes les minutes qui n'a su ménager ni son temps ni ces efforts pour la réussite de l'Université Algérienne.

A cette occasion je tiens à présenter mon profond respect et ma reconnaissance aux **Enseignants** de l'année théorique à la préparation du magister, ainsi qu'aux **Membres du Jury** qui restent les juges suprêmes du couronnement de ces années d'étude.

Je ne cesserai de remercier tous les collaborateurs chacun dans son secteur et sa spécialité pour la réalisation de ce mémoire, je cite :

Mr Hamoudi Saaed Abd El Emir Professeur à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef pour sa participation à l'achèvement de cette étude.

Le personnel du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda entre autres :

Le Directeur du Barrage : **Mr MENED Lakhdar**,

L'Adjoint Directeur : **Mr KALKOUL Omar**,

L'Agent d'Exploitation : **Mr ZAIDI Taïb**

Chacun dans ses attributions pour l'accueil chaleureux, le dévouement et l'orientation pour chaque visite et transport sur les lieux.

Mr Harrat Benaouda, Chef de service à la D.R.E de Relizane pour la coordination entre les divers services exécutifs à travers la wilaya de Relizane.

Mr Castaldi Fabio, Chef de Département à l'Université de Tuscia en Italie pour son aide précieuse à l'accomplissement de mon étude.

Tous mes camarades de la **Promotion du Magister (2011/2012)** pour les échanges d'informations fructueuses inhérentes à la préparation du mémoire.

Et enfin je dédie ce mémoire à tous ceux qui ont participé à son élaboration, à ma **Famille** et à mes **Parents** pour lesquels je clôture ce mémoire par cette maxime, pour éviter un chapelet de qualificatifs inaptes à exprimer ma pensée.

« Les bienfaits que je dois à mon **Père** sont hauts comme une Montagne
mais ceux que je dois à ma **Mère** sont profonds comme un Océan »

Abderrezak

Table des matières

Résumé	II
ملخص.....	III
Abstract.....	IV
Remerciements	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	XV
Liste des photos	XIX
Liste des tableaux	XXI
Liste des abréviations.....	XXV
Introduction générale	1

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction.....	3
I.2.Bassin versant de l'oued Mina.....	3
I.2.1.Caractéristiques géographiques	3
I.2.2.Caractéristiques sociodémographiques	5
I.2.3.Caractéristiques physiques	6
I.2.3.1.Lithologie	6
I.2.3.2.Occupation du sol.....	8
I.2.3.3.Relief	9
a/ Modèle numérique du terrain.....	9
b/ Topographie	10
c/ Classe des pentes	11
I.2.4Réseau hydrométrique.....	12
I.2.5.Etude des paramètres du relief	13
I.2.5.1.Indice de compacité (Kc)	13
I.2.5.2.Rectangle équivalent	14
I.2.5.3.Courbe hypsométrique	14
I.2.5.4.Indice de pente globale "Ig"	16

I.2.5.5.Dénivelée spécifique Ds	16
I.2.5.6.Pente moyenne	17
I.2.5.7.Densité de drainage	17
I.2.5.8.Temps de concentration	17
I.2.6.Synthèse Récapitulative du bassin versant de l'oued Mina	18
I.2.7.Hydroclimatologie	19
I.2.7.1.Choix de la station.....	19
I.2.7.2.Température	19
I.2.7.3.Humidité relative.....	20
I.2.7.4.Vitesse du vent	21
I.2.7.5.Insolation	21
I.2.7.6.Précipitation	22
I.2.8. Indices climatiques.....	23
I.2.8.1.Indice d'aridité annuelle de De Martonne	23
I.2.8.2.Diagramme ombrothermique	24
I.2.9 Bilan hydrologique.....	25
I.2.9.1.Evapotranspiration	25
I.2.9.2.Evapotranspiration potentielle (ETP).....	25
a/ Formule de Thornthwaite.....	25
b/Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du bilan hydrologique	27
I.3.Barrage SidiM'hamed Ben Aouda(S.M.B.A).....	28
I.3.1.Situation géographique	28
I.3.2 Retenue du barrage	28
I.3.3.Eléments constitutifs du barrage.....	29
I.3.3.1.Digue	29
I.3.3.2.Evacuateur de crues.....	29
I.3.3.3.Tour de prise d'eau.....	30
I.3.3.4.Organes de vidange	30
I.3.3.5. Vidange de fond rive gauche.....	31
I.3.3.6. Vidange de fond rive droite.....	31
I.3.3.7. Vannettes de dévasement	32
I.3.3.8. Ouvrages situées à l'aval.....	32
I.3.3. Synthèse récapitulative du barrage S.M.B.A	34
I.4. Conclusion	35

Chapitre II: Etude du régime pluviométrique

II.1. Introduction	36
II.2. Collecte et mise en forme des données	36
II.2.1. Choix des stations	36
II.2.3. Période d'étude	37
II.2.4. Lacunes dans les séries pluviométriques	38
II.3. Régression linéaire	38
II.3.1. Programme « Statistica »	38
II.4. Erreurs commises dans les séries pluviométriques	41
II.4.1. Détection des erreurs systématiques et correction des données	42
II.4.1.1. Méthode des doubles masses	42
II.5. Etude du régime pluviométrique	44
II.5.1. Distribution mensuelle des précipitations	44
II.5.1.1. Paramètres statistiques des stations retenues	44
a/ Moyenne	44
b/ Ecart-type	45
c/ Coefficient de variation	45
II.5.2. Distribution saisonnière des précipitations	46
II.5.3. Distribution annuelle des précipitations	48
II.5.3.1. Variation de la pluviométrie annuelle.....	49
II.6. Estimation de la pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant.....	50
II.6.1. Polygones de Thiessen.....	51
II.6.1.1. Principe de la méthode	51
II.7. Tests statistiques de détection des ruptures dans les séries climatiques.....	53
II.7.1. Définition d'une rupture	53
II.7.2. Test de Pettitt (1979)	53
II.7.3. Statistique de Buishand (1982, 1984).....	54
II.7.4. Procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977)	54
II.7.5. Procédure de segmentation de Hubert (Hubert et <i>al.</i> , 1989)	55
II.7.6. Programme « Khronostat ».....	55
II.8. Conclusion.....	56

Chapitre III: Evaluation de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina

III.1. Introduction	58
III.2. Erosion hydrique	58
III.2.1. Définition de l'érosion hydrique	58
III.2.2. Processus de l'érosion hydrique	58
III.2.3. Formes de manifestation de l'érosion hydrique	58
III.2.4. Facteurs de l'érosion hydrique	59
III.2.4.1. Facteurs naturels	59
a/ Le climat	59
b/ La végétation	59
c/ La topographie	59
III.2.4.2. Facteurs anthropiques	59
a/ Les incendies.....	59
b/ L'utilisation des serres	60
c/ L'urbanisation	60
d/ Risques liés au développement des villes et des infrastructures.....	60
e/ Les banquettes et terrasses DRS	61
f/ Mécanisation de l'agriculture et compactage des sols	61
h/ Le surpâturage	61
III.2.5. Générique de l'érosion pluviale	61
III.2.6. Conséquences de l'érosion hydrique	62
III.3. Transport solide.....	62
III.3.1. Définition	62
III.3.2. Modes de transport solide	62
III.3.2.1. Transport solide en suspension.....	62
III.3.2.2. Transport solide par charriage	63
III.3.2.3. Saltation	63
III.3.3. Processus du transport solide	63
III.3.4. Conséquences du transport solide	64
III.4. Envasement des barrages	65

III.4.1. Définition de l'envasement des barrages	65
III.4.2. Causes de l'envasement.....	65
III.4.2.1. Facteurs naturels	65
a/ Forme du bassin versant.....	65
III.4.2.2. Facteurs anthropiques	65
a/ Non ouverture des vannes de vidanges en période de crues	65
b/ Blocage des vannes	65
III.4.3. Processus de l'envasement des barrages	66
III.4.3.1. Erosion hydrique.....	66
III.4.3.2. Transport solide	66
III.4.3.3. Piégeage des sédiments et mécanisme de sédimentation	66
III.4.4. Conséquences de l'envasement des barrages	67
III.4.4.1. Réduction de la capacité	67
III.4.4.2. Sécurité de l'ouvrage	67
III.4.4.3. Blocage des vannes.....	68
III.4.4.4. Sédimentation dans les canaux d'irrigation.....	68
III.5. Synthèse récapitulative	68
III.6. Modèles d'estimation de l'érosion hydrique.....	70
III.6.1. Définition de la modélisation	70
III.6.2. Quantification de l'érosion hydrique	70
III.7. Indices morphométriques	71
III.7.1 Historique des indices morphométriques	71
III.7.2. Classification et utilité des indices morphométriques.....	72
III.8. Etat des lieux du bassin versant de l'oued Mina.....	75
III.9. Analyse Géomorphologique Quantitative (A.G.Q)	79
III.9.1. Historique	79
III.9.2. Définition	79
III.9.3 Equation du modèle A.G.Q.....	79
III.9.4. Quelques travaux réalisés.....	80
III.9.4.1. En Algérie.....	80
III.9.4.2. En Tunisie.....	80
III.9.4.3. En Italie.....	81
III.10. Historique de classification d'un réseau hydrographique	81
III.11. Analyse morphométrique du réseau hydrographique	82

III.11.1. Arborescence du réseau hydrographique	82
III.11.2. Paramètres hiérarchiques du réseau hydrographique	84
III.11.2.1. Fréquence directe d'un cours d'eau	84
III.11.2.2. Fréquence anormale	84
III.11.2.3. Rapport de bifurcation	85
III.11.2.4. Moyenne pondérée des rapports de bifurcation.....	85
III.11.2.5. Rapport de bifurcation direct.....	85
III.11.2.6. Moyenne pondérée des rapports de bifurcation directs	85
III.11.2.7. Indice de bifurcation.....	86
III.11.2.8. Moyenne pondérée des indices de bifurcation	86
III.11.2.9. Nombre d'anomalie hiérarchique	86
III.11.2.10. Indice d'anomalie hiérarchique	87
III.11.2.11. Analyse et interprétation des résultats	88
III.11.2.12. Etat du réseau hydrographique	89
a/ Analyse et interprétation des résultats	90
III.12. Estimation de l'érodabilité par l'Analyse Géomorphologique Quantitative « A.G.Q »	90
III.12.1. Calcul des paramètres du modèle « A.G.Q »	90
III.12.1.1. Densité de drainage	90
III.12.1.2. Indice d'anomalie hiérarchique	90
a/ Analyse et interprétation des résultats	92
b/ Analyse des résultats.....	92
III.12.2. Ecart entre le modèle A.G.Q et les mesures réelles	92
III.12.2.1. Comparaison avec le levé bathymétrique de l'année (2003).....	92
a/ Analyse et interprétation des résultats	93
III.12.2.2. Comparaison avec le transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003).....	93
a/ Volumes de désenvasement par les organes de vidange (1978/2003)	93
b/ Analyse et interprétation des résultats	96
III.13. Synthèse récapitulative	97
III.14. Conclusion	98

Chapitre IV: Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A

IV.1. Introduction.....	99
IV.2. Evolution de la retenue du barrage S.M.B.A101	
IV.2.1. Comparaison des courbes	101
IV.2.2. Interprétation	101
IV.3. Evolution de l'envasement du barrage S.M.B.A	102
IV.3.1. Evolution temporelle de l'envasement du barrage S.M.B.A	102
IV.3.2. Evolution des profils en travers de la retenue du barrage entre (1978/2003)	103
IV.3.2.1. Analyse et interprétation des résultats.....	106
a/ Profil en travers P1.....	106
b/ Profil en travers P4	106
c/ Profil en travers P16 et P18	107
IV.3.3. Eévoluon de la topographie de la retenue du barrage S.M.B.A.....	108
IV.4. Etat des lieux de la retenue du barrage S.M.B.A.....	110
IV.5. Modèe P.I.S.A (PrevisioniInterimentoSerbatoiArtificiali).....	114
IV.5.1. Historique.....	114
IV.5.2. Définition	114
IV.5.3. Equation du modèe	114
IV.5.4. Avantages du modèe P.I.S.A	115
IV.6. Quelques travaux réalisés	115
IV.6.1. En Algérie	115
IV.6.2. En Tunisie	115
IV.7. Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A.....	116
IV.7.1. Méthodologie à suivre	116
IV.7.2. Calcul des paramètres du modèe.....	116
IV.7.2.1. Surface érodable	116
a/ Analyse et interprétation des résultats	118
IV.7.2.2. Pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant.....	119
a/ Polygones de Thiessen.....	119
1/ Méthodologie entamée	119
b/ Analyse et interprétation des résultats	121
IV.7.2.3. Pente moyenne de chaque sous-bassin.....	122
a/ Analyse et interprétation des résultats	122
IV.7.2.4. Densité de drainage	122

a/ Analyse et interprétation des résultats	123
IV.7.2.5. Détermination de l'indice d'envasement du barrage S.M.B.A (1978/2003)..	123
a/ Analyse et interprétation des résultats	124
IV.8. Ecart entre le modèle P.I.S.A et les mesures réelles	124
IV.8.1. Comparaison avec le levé bathymétrique de l'année (2003)	124
IV.8.1.1 Analyse et interprétation des résultats.....	125
IV.8.2. Comparaison avec le transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003).....	125
IV.8.2.1. Analyse et interprétation des résultats.....	126
IV.9. Synthèse récapitulative	130
IV.10. Conclusion	137

Chapitre V: Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

V.1. Introduction	138
V.2. Approche méthodologique pour l'analyse de la zone d'étude	138
V.2.1. Méthodologie à suivre	139
V.3. Quelques travaux réalisés.....	139
V.4. Classement des terres par degré de sensibilité	140
V.4.1. Carte de fragilité des terres.....	141
V.4.1.1. Analyse et interprétation des résultats	142
V.5. Carte de sensibilité à l'érosion	143
V.5.1. Analyse et interprétation des résultats.....	144
V.6. Supervision de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique	144
V.7. Localisation des zones fortement ravinnées et priorité d'intervention	146
V.7.1. Paramètres de choix de la priorité d'intervention	146
V.8. Conclusion.....	148

Chapitre VI: Moyens de lutte proposés

VI.1. Introduction.....	149
VI.2. Lutte antiérosive	149
VI.2.1. Stratégies modernes d'aménagement des bassins versants.....	149

VI.2.1.1. Restauration des terrains en montagne (R.T.M)	149
VI.2.1.2. Conservation de l'eau et du sol (C.E.S)	150
VI.2.1.3. Défense et restauration des sols (D.R.S)	150
VI.2.1.4. Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (G.C.E.S).....	150
VI.2.2. Techniques traditionnelles de lutte antiérosive	150
VI.2.2.1. Cordons de pierres isohypses	150
VI.2.2.2. Paillage	151
VI.2.2.3. Haies vives et lignes d'arrêt	151
VI.2.2.8. Seuils en pierres sèches	151
VI.2.2.4. Terrasses	152
VI.2.2.5. Banquettes	152
VI.2.2.6. Gabionnage.....	152
VI.2.2.7. Reboisement	152
VI.3. Moyens de lutte contre l'envasement du barrage S.M.B.A.....	158
VI.3.1. Moyens de luttés préventifs	158
VI.3.1.1. Recommandations pour le soutirage des courants de densité dans la retenue du barrage.....	158
VI.3.1.2. Soutirage des courants de densité.....	158
VI.3.2. Moyens de luttés curatifs	162
VI.3.2.1. Définition du dragage	162
VI.3.2.2. Objectifs des opérations de dragage	162
VI.3.2.3. Techniques de dragage	162
a/ Dragage mécanique.....	162
b/ Dragage hydraulique.....	163
c/ Dragage à l'américaine	163
VI.4. Conclusion	165
Conclusion générale et recommandations	166
Références bibliographiques	170

Liste des figures

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

Figure I.1 : Carte de situation du bassin versant de l'oued Mina.	4
Figure I.2 : Bassin versant de l'oued Mina.	4
Figure I.3 : Les wilayas du bassin versant de l'oued Mina selon la taille de la population représentée	5
Figure I.4 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Mina.	6
Figure I.5 : Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Mina.	8
Figure I.6 : Modèle numérique du terrain du bassin versant de l'oued Mina.	9
Figure I.7 : Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Mina.	10
Figure I.8 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Mina.	11
Figure I.9 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.	12
Figure I.10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Mina.	15
Figure I.11 : Températures mensuelles de la station de Matemore (1977/2010).	20
Figure I.12 : Humidités relatives mensuelles de la station de Matemore (1977/2010).	20
Figure I.13 : Moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen de la station de Matemore (1977/2010).	21
Figure I.14 : Durée mensuelle d'insolation totale en (heures) de la station de Matemore (1980/2010).	22
Figure I.15 : Cumul mensuel des précipitations de la station de Matemore (1977/2010).	23
Figure I.16 : Indice d'aridité de la station de Matemore.	24
Figure I.17 : Diagramme ombrothermique de la station de Matemore.	24
Figure I.18 : Plan de la retenue du barrage S.M.B.A.	29
Figure I.19 : Image satellite du barrage S.M.B.A.	33

Chapitre II: Etude du régime pluviométrique

Figure II.1 : Situation des stations pluviométriques choisies dans le bassin versant de l'oued Mina.	37
Figure II.2 : Méthode des doubles masses.	42

Liste des figures

Figure II.3 : Corrélation des données pluviométriques (1978/2009).	43
Figure II.4 : Pluies mensuelles des stations du bassin versant de l'oued Mina (1978/2008) ..	44
Figure II.5 : Pluies saisonnières des stations du bassin versant de l'oued Mina (1978/2009)	47
Figure II.6 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance pour les stations choisies dans le bassin versant de l'oued Mina (1978/2009).	50
Figure II.7 : Polygones de Thiessen du bassin versant de l'oued Mina.	52
Figure II.8 : Identification de la période des ruptures entre 1978 et 2009.....	56

Chapitre III: Evaluation de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina

Figure III.1 : Générique de l'érosion pluviale (Touaibia, 2009).....	61
Figure III.2 : Distinction entre les modes de transport solide en rivière.....	63
Figure III.3 : Risques associés à l'envasement d'un barrage	68
Figure III.4 : Place et importance des indices morphométriques en hydrologie (Douvinet et al., 2008).	73
Figure III.5 : Typologies des indices morphométriques couramment utilisés en hydrologie (Douvinet et al., 2008).	74
Figure III.6 : Classification de Strahler du réseau hydrographique (Strahler, 1964).....	82
Figure III.7 : Classification de Strahler du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina	82
Figure III.8 : Relation entre la fréquence de cours d'eau et l'ordre de hiérarchisation.....	84
Figure III.9 : Chevelus négligés par le logiciel River Tools	96
Figure III.10 : Organigramme des principales étapes effectuées pour l'estimation du taux d'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina	97

Chapitre IV: Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A

Figure IV.1 : Courbe Hauteur/Capacité/Surface du barrage S.M.B.A en 1978	100
Figure IV.2 : Courbe Hauteur/Capacité/Surface du barrage S.M.B.A en 1986	100
Figure IV.3 : Courbe Hauteur/Capacité/Surface du barrage S.M.B.A en 2003	101
Figure IV.4 : Evolution temporelle de l'envasement du barrage S.M.B.A	102

Liste des figures

Figure IV.5 : Plan de position des profils en travers (Geoid, 2003).....	103
Figure IV.6 : Profil en travers P1 (Geoid, 2003)	104
Figure IV.7 : Profil en travers P4 (Geoid, 2003)	104
Figure IV.8 : Profil en travers P16 (Geoid, 2003)	105
Figure IV.9 : Profil en travers P18 (Geoid, 2003)	105
Figure IV.10 : Rupture des lignes de courant du courant de densité.....	107
Figure IV.11 : Dépôts des sédiments près de la digue.....	107
Figure IV.12 : Erosion des berges	107
Figure IV.13 : Evolution de la retenue du barrage S.M.B.A entre 1978 et 2003	109
Figure IV.14 : Itinéraire de l'embarcation dans la retenue du barrage S.M.B.A.....	110
Figure IV.15 : Surfaces caractéristiques du bassin versant de l'oued Mina.....	117
Figure IV.16 : Présence d'érosion dans un sol labouré	118
Figure IV.17 : Polygones de Thiessen du bassin versant de l'oued Mina.....	119
Figure IV.18 : Carte topographique du bassin versant de l'oued Mina.....	121
Figure IV.19 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina	122
Figure IV.20 : Traçage des limites avec le logiciel ENVI pour différentes résolutions d'images satellites	127
Figure IV.21 : Plan de situation des retenues collinaires du bassin versant de l'oued Mina.....	128
Figure IV.22 : Plan de situation des retenues collinaires envasées du bassin versant de l'oued Mina	129
Figure IV.23 : Organigramme des principales étapes effectuées pour l'estimation du taux d'envasement du barrage S.M.B.A	131

Chapitre V: Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

Figure V.1 : Approche méthodologique de superposition des cartes thématiques.....	138
Figure V.2 :Organigramme des principales étapes effectuées pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina.....	139
Figure V.3 :Carte de fragilité des terres du bassin versant de l'oued Mina.....	141
Figure V.4 : Pourcentages des classes de fragilité des terres.....	142
Figure V.5 : Carte de sensibilité des sols à l'érosion hydrique du versant de l'oued Mina....	143
Figure V.6 : Pourcentages des classes de sensibilité à l'érosion hydrique	143
Figure V.7 : Supervision de la carte de sensibilité à l'érosion avec Google Earth.....	145

Liste des figures

Figure V.8 : Carte de localisation des zones fortement ravinées avec priorité d'intervention	146
Figure V.9 : Synthèse récapitulative sur les cartes thématiques élaborées.....	147

Chapitre VI: Moyens de lutte proposés

Figure VI.1 : Cordons en pierres sèches	156
Figure VI.2 : Seuils en pneus usés.....	156
Figure VI.3 : Pépinières villageoises	156
Figure VI.4 : Reboisement	156
Figure VI.5 : Profil d'une terrasse	156
Figure VI.6 : Profil d'une banquette.....	156
Figure VI.7 : Restauration parcellaire (Haies vives)	157
Figure VI.8 : Seuils en pierres sèches.....	157
Figure VI.9 : Seuil en gabion.....	157
Figure VI.10 : Banquette en grillage.	157
Figure VI.11 : Procédé d'ouverture des vannes de vidange.	161
Figure VI.12 : Procédé d'ouverture des vannes de vidange	161
Figure VI.13: Rayon d'action de la drague mécanique.	164
Figure VI.14 : Rayon d'action de la drague hydraulique	164

Liste des photos

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

Photos I.1 : Station hydrométrique d'Oued El-Abtal.....	13
Photos I.2 : Station hydrométrique de Sidi AEK Djilali.....	13
Photos I.3 : Evacuateur de crues.	30
Photos I.4 :Prise d'eau du barrage.	30
Photos I.5 : Vidange rive gauche du barrage S.M.B.A.....	31
Photos I.6 : Vidange rive droite du barrage S.M.B.A.....	31
Photos I.7 : Vannettes de dévasement du barrage.....	32
Photos I.8 : Ouvrages du barrage situés à l'aval.	33

Chapitre III: Evaluation de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina

Photo III.1 : Exhaussement du lit de l'oued Haddad, Station hydrométrique de Sidi AbdelkaderEl-Djilali.....	64
Photo III.2 : Risque d'inondation des terres agricoles situées sur les berges de l'oued El-Abd	64
PhotosIII.3 : Formes réelles du processus de sédimentation des retenues	66
PhotosIII.4 :Evolution de la retenue du barrage de MerdjaSidiAbed entre (1985/2009).....	67
Photos III.5 : Exode Rural	76
Photos III.6 : Pertes en sols énormes associés à des terrains nus	76
Photos III.7 : Différentes formes de manifestation de l'érosion hydrique	77
Photos III.8 : Ramification du réseau d'écoulement	77
Photos III.9 : Présence de charriage et dépôts sédimentaires dans les cours d'eau.....	78
Photos III.10 : Surpâturage.....	78
Photos III.11 : Chasse de la vase par vidange de fond rive gauche.....	94
Photo III.12 : Déversement des eaux claires excédentaires par l'évacuateur de crues	94
Photo III.13 : Evacuation des eaux claires excédentaires par l'ouvrage de rejet	94

Chapitre IV: Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A

Photos IV.1 : Exode rural.....	111
Photos IV.2 : Surpâturage sur les berges du barrage S.M.B.A.....	111
Photos IV.3 : Erosion hydrique des berges du barrage S.M.B.A.....	112
Photos IV. 4 : Glissement rocheux	113
Photos IV. 5 : Pompage illicite	113
Photo IV.6 : Dépôt des sédiments sur le lit de l'oued El-Abd.....	126
Photo IV.7 : Dépôt des sédiments sur le lit de l'oued Haddad	126

Chapitre VI:Moyens de lutte proposés

Photo VI.1 : Cordons de pierres isohypses	153
Photo VI.2 : Paillage.....	153
Photo VI.3 : Haies vives et lignes d'arrêt	153
Photo VI.4 Seuil en pierres sèches (Melalih, 2012).....	153
Photo VI.5 : Terrasses soutenues par des talus	154
Photo VI.6 : Type de banquettes à rétention totale.....	154
Photo VI.7 : Gabionnage.....	154
Photo VI.8 : Reboisement.....	154
Photos VI.9 : Chasse des courants de densité par vidange de fond (barrage S.M.B.A)	160
Photos VI.10 : Chasse des courants de densité par jet creux (barrage S.M.B.A)	160
Photo VI.11 : Dragage mécanique.....	164
Photo VI.12 : Dragage suceuse à désagrégateur.....	164

Liste des tableaux

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

Tableau I.1 : Superficie totale dans le bassin versant des communes visées	5
Tableau I.2 : Classification des communes en fonction de la population.	6
Tableau I.3 : Lithologie du bassin versant de l'oued Mina au droit du barrage S.M.B.A.	7
Tableau I.4 : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol.....	8
Tableau I.5 : Classes des altitudes du bassin versant de l'oued Mina.	10
Tableau I.6 : Classes des pentes dans le bassin versant de l'oued Mina.	11
Tableau I.7 : Stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Mina.	13
Tableau I.8 : Répartition des tranches d'altitudes.	15
Tableau I.9 : Classification du relief	16
Tableau I.10 : Synthèse des caractéristiques générales du bassin versant de l'oued Mina.....	18
Tableau I.11 : Températures mensuelles à la station de Matemore (1977-2010)	19
Tableau I.12 : Humidités relatives mensuelles à la station de Matemore (1977-2010).	20
Tableau I.13 : Moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen à la station de Matemore (1977-2010).....	21
Tableau I.14 : Durée mensuelle de l'insolation totale à la station de Matemore (1980/2010).	22
Tableau I.15 : Cumuls mensuel des précipitations à la station de Matemore (1977/2010).....	22
Tableau I.16 : Evapotranspiration potentielle de la station de Matemore.	26
Tableau I.17 : Bilan hydrologique moyen à la station de Matemore (1977/2010).....	27
Tableau I.18 : Caractéristiques générales du barrage S.M.B.A.....	34

Chapitre II: Etude du régime pluviométrique

Tableau II.1 : Stations pluviométriques choisies du bassin versant de l'oued Mina	37
Tableau II.2 : Synthèse des différents paramètres de la régression linéaire à l'échelle mensuelle entre les stations pluviométriques.....	39
Tableau II.3 : Estimation de l'influence des principaux changements sur l'homogénéité des mesures de divers paramètres météorologiques (Heino, 1996).	41

Liste des tableaux

Tableau II.4 : Précipitations moyennes mensuelles des stations choisies entre (1978/79 - 2009/10).....	44
Tableau II.5 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques mensuelles (1978/79 - 2009/10).....	45
Tableau II.6 : Précipitations moyennes saisonnières des stations choisies entre (1978/79 - 2009/10).....	46
Tableau II.7 : Pourcentage des régimes saisonniers des stations retenues entre (1978/79 - 2009/10).....	47
Tableau II.8 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques saisonnières (1978/79 - 2009/10).....	48
Tableau II.9 : Paramètres statistiques des précipitations annuelles, des stations retenues (1978/79 - 2009/10).....	49
Tableau II.10 : Coordonnées des stations pluviométriques choisies.....	51
Tableau II.11 : Pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant de l'oued Mina.....	52
Tableau II.12 : Tests statistiques et années de ruptures dans les séries pluviométriques étudiées.....	56

Chapitre III: Evaluation de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina

Tableau III.1 : Synthèse récapitulative sur les phénomènes de l'érosion hydrique, du transport solide et de l'envasement des barrages.....	69
Tableau III.2 : Classification des modèles d'estimation d'érosion hydrique.....	70
Tableau III.3: Paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued K'sob.....	80
Tableau III.4 : Indice d'érosion Tu pour le bassin versant de Siliana.....	80
Tableau III.5 : Caractéristiques générales du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.....	83
Tableau III.6 : Synthèse des paramètres morphométriques à déterminer pour un bassin versant.....	87
Tableau III.7 : Paramètres d'organisation hiérarchique.....	88
Tableau III.8 : Rapport de Melton.....	89
Tableau III.9 : Nombre, Indice et densité d'anomalie hiérarchique relatifs au bassin versant de l'oued Mina.....	91

Liste des tableaux

Tableau III.10 : Taux d'érosion du bassin versant de l'oued Mina (1978/2003).....	92
Tableau III.11 : Ecart entre le modèle A.G.Q et les mesures réelles	93
Tableau III.12 : Ecart entre le modèle A.G.Q et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003)	95

Chapitre IV: Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A

Tableau IV.1 : Evolution de la capacité du barrage S.M.B.A entre (1978/2003)	101
Tableau IV.2 : Dénivelées entre les différents profils en travers de la retenue du barrage S.M.B.A au fil des années (1978/2003)	106
Tableau IV.3 : Indice d'envasement pour les bassins versants de Siliana et de Lakhmess ..	115
Tableau IV.4 : Surface érodable de chaque sous bassin.....	117
Tableau IV.5 : Pluviométrie moyenne annuelle des sous-bassins.....	120
Tableau IV.6 : Détermination de la pente moyenne de chaque sous bassin.....	122
Tableau IV.7 : Densité de drainage de chaque sous-bassin.....	123
Tableau IV.8 : Détermination de l'indice d'envasement de chaque sous bassin	123
Tableau IV.9 : Ecart entre le modèle P.I.S.A et le levé bathymétrique.....	125
Tableau IV.10 : Ecart entre le modèle P.I.S.A et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003)	126
Tableau IV.11 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 30	132
Tableau IV.12 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 31	133
Tableau IV.13 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 32	134
Tableau IV.14 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 33	135
Tableau IV.15 : Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 34	136

Chapitre V: Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

Tableau V.1 : Classement des sols en fonction des caractéristiques lithologiques	140
Tableau V.2 : Superficie et pourcentage des classes de fragilité des terres.	142
Tableau V.3 : Superficie et pourcentage des classes de sensibilité à l'érosion	143

Chapitre VI: Moyens de lutte proposés

Tableau VI.1 : Synthèse récapitulative sur les moyens de lutttes antiérosives (Ruelle et *al.*, 1990)155

LISTE DES ABREVIATIONS

- A.G.Q** : Analyse Géomorphologique Quantitative;
- A.N.B.T** : Agence Nationale des Barrages et Transferts;
- A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques;
- C.E.S** : Conservation de l'Eau et du Sol;
- CEMAGREF** : Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts;
- Da** : Déficit Agricole;
- D.R.S** : Défense et Restauration des Sols;
- ENVI**:Environment for Visualizing Images;
- ETM+**:Enhanced Thematic Mapper Plus;
- ETP** : Evapotranspiration Potentielle;
- ETR** : Evapotranspiration Réelle;
- EXC** : Excédent;
- G.C.E.S** : Gestion Conservatoire de l'Eau, de la Biomasse et de la Fertilité des Sols;
- Hr** : Humidité Relative;
- HSM** : Hydro-Sciences Montpellier;
- I.F.G** :Institut des Géosciences Appliquées;
- I.R.D** : Institut de Recherche pour le Développement;
- L.E.M** : Laboratoire des Etudes Maritimes;
- M.N.T** : Modèle Numérique du Terrain;
- N.G.A** : Nivellement Général de l'Algérie;
- O.N.M** : Office Nationale de la Météorologie;
- O.R.S.T.O.M** : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer;
- P.A.P** : Plan d'Aménagement de Protection;
- PHE** : Plus Hautes Eaux;
- P.I.S.A** :PrevisioniInterimentoSerbatoiArtificiali;
- RN** : Retenue Normale;
- RTM** : Restauration des Terrains en Montagne;
- SB** :Sous-Bassin;
- S.I.G** : Système d'Information Géographique;
- S.M.B.A**:SidiM'hamed Ben Aouda;
- USLE**: Universal Soil Loss Equation;
- UTM** :Universal Transverse Mercator.

INTRODUCTION GENERALE

Les potentialités en eau de surface de l'Algérie sont estimées à quelques 10,9 milliards de m³, mais les volumes actuellement mobilisés par le biais des 63 barrages en exploitation ne dépassent guère les 2,7 milliards de m³ (Demmak, 2010). L'envasement dans les barrages réservoirs est l'un des principaux problèmes préoccupants (Serbah, 2011). Ce phénomène naturel n'est que la conséquence de la dégradation des bassins versants sous forme d'érosion hydrique des sols la plus caractérisée (Conseil des sciences du Canada, 1986).

Le Nord de l'Algérie et plus particulièrement l'Ouest du pays, naturellement exposé au déclenchement de ce mécanisme est lié tant aux dispositions socio-économiques et aux conditions hydroclimatiques représente une menace à l'équilibre de l'environnement sur le plan local et régional. La partie Ouest, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays ; viennent ensuite les régions du Centre avec 27% et de l'Est avec 26% (Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000). Une proportion importante de ces sédiments sera piégée dans les retenues de barrages. Actuellement le problème ne cesse de s'accroître dans le Nord-Algérien.

Le bassin versant de l'oued Mina (4900 km², Nord-ouest Algérien), fait l'objet de nombreux travaux dans le domaine de l'érosion hydrique et de l'envasement des barrages (Touaïbia et al., 1992, 1995, 1999, 2000; Gomer, 1994; Touaïbia et Achite, 2003; Remini et Bensafia, 2011; Bekhti et al., 2012; Remini, 2012; Toumi et al., 2013). Le bassin versant subit une érosion intense en particulier dans la partie septentrionale où le risque majeur dans cette zone constitue l'envasement accéléré du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (S.M.B.A).

Partant de ce constat, notre étude a pour objectif principal l'évaluation indirecte des pertes en sols du bassin versant de l'oued Mina ainsi que l'envasement du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (S.M.B.A) situé à l'exutoire. Ce travail s'articulera en six chapitres comme suit :

- Le premier chapitre concerne une présentation socio-économique, physique, et hydroclimatologique du bassin versant ainsi que les caractéristiques hydrologiques, techniques et économiques du barrage S.M.B.A.
- Le second chapitre sera consacré à l'étude du régime pluviométrique des cinq stations retenues représentant le bassin versant dont la période d'observation

Introduction générale

s'étale entre 1978 à 2009, en utilisant des tests statistiques recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale, nous allons tenter de détecter les années de ruptures sur une période de de 34 ans.

- Le troisième chapitre porte sur la quantification des pertes en sols de la zone d'étude, et cela avec l'application du modèle (A.G.Q)(Analyse Géomorphologique Quantitative) qui consiste à l'identification de la structure du bassin versant par l'analyse morphométrique et le calcul de l'indice d'érosion exprimé en $(t/km^2/an)$. Ce paramètre est basé essentiellement sur la densité de drainage et l'indice d'anomalie hiérarchique d'un bassin versant.
- Le quatrième chapitre est basé sur l'estimation du taux d'envasement du barrage SMBA avec le modèle(P.I.S.A) (PrevisioniInterimentoSerbatoiArtificiali). Ce modèle utilise des paramètres climatiques, morphologiques et physiques d'un bassin versant, qui peut fournir une prévision du taux moyen annuel de sédimentation dans les réservoirs exprimé en $(m^3/km^2/an)$.
- Le cinquième chapitre consiste à cartographier la hiérarchie des zones à risque d'érosion hydrique et à les classer par ordre de priorité d'intervention. Pour ce faire une analyse de superposition des cartes thématiques du bassin versant sera établie. L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (S.I.G) sera l'outil principal dans cette partie.
- Après avoir localisé les zones sensibles à l'érosion hydrique, le dernier chapitre consiste en la proposition d'un aménagement de lutte antiérosif pour la protection du bassin versant contre une dégradation ultérieure. La seconde partie fera l'objet des moyens de lutte préventifs et curatifs contre l'envasement du barrage S.M.B.A.

L'achèvement des travaux sera clôturé par une synthèse générale portant sur l'essentiel des résultats obtenus et des perspectives d'avenir du bassin versant de l'oued Mina et du barrage S.M.B.A.

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

I.1.Introduction

La connaissance du milieu physique ainsi que des activités socio-économiques des populations qui l'habitent est indispensable dans l'étude d'un phénomène naturel. Elle constitue l'un des principaux éléments pouvant aider à cerner les processus qui contribuent à la génération des phénomènes d'érosion du transport solide et de l'envasement des barrages.

Le milieu physique caractérise le relief, l'occupation naturelle de la zone d'étude, et l'occupation due à l'action anthropique sur le milieu.

Dans ce chapitre nous présenterons les limites géographiques de la zone d'étude, la lithologie, l'occupation des sols et son relief, ainsi nous aborderons le réseau hydrométrique qui contrôle les eaux pluviales s'accumulant dans le barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (S.M.B.A). Une étude climatique sera établie afin de déceler les caractéristiques météorologiques du bassin versant ainsi qu'une présentation d'ordre général du barrage S.M.B.A sera conçue à cet effet.

I.2.Bassin versant de l'oued Mina

I.2.1.Caractéristiques géographiques

Le bassin versant de l'oued Mina fait partie du plus grand bassin versant au Nord de l'Algérie à savoir l'oued Chelif (figure I.1). Il se trouve à environ 300 Km à l'Ouest d'Alger, entre $0^{\circ} 20'$ et $1^{\circ} 10'$ de longitude Est et entre $34^{\circ} 40'$ et $35^{\circ} 40'$ de latitude Nord (Achite et Meddi, 2005).

L'oued Mina, principal et dernier affluent de la rive gauche de l'oued Chelif parcourt une distance de 135 Km sensiblement du Sud vers le Nord (Coyne et Bellier, 1980; Meddi, 1992), Le bassin versant est limité :

- Au Nord-Est par les monts de l'Ouancharis;
- Au Nord-Ouest par les monts des Bani Chougrane;
- A l'Ouest par les monts de Saida;
- Au Sud-Est par les monts de Frenda;
- Au Sud par les hauts plateaux (figure I.2) (Lamrani, 2012).

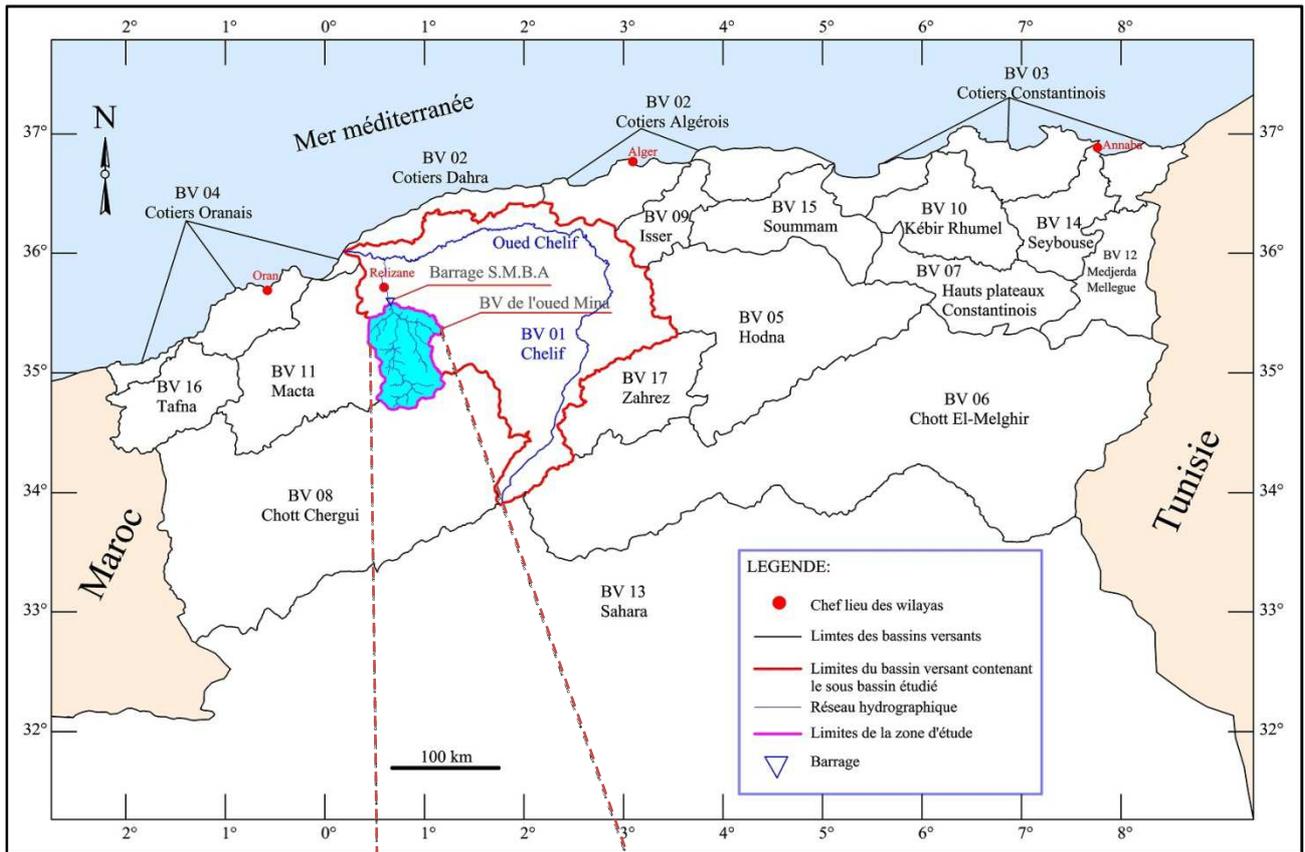


Figure I.1 : Carte de situation du bassin versant de l'oued Mina.

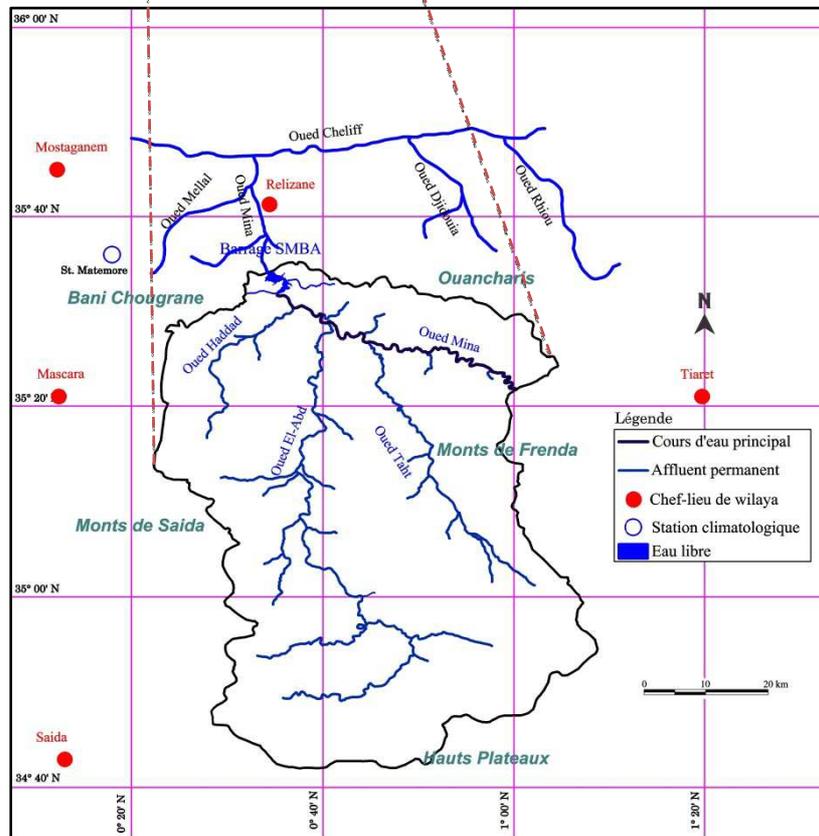


Figure I.2 : Bassin versant de l'oued Mina.

I.2.2. Caractéristiques sociodémographiques

La zone d'étude englobe 4 wilayas (Relizane, Tiaret, Mascara et Saida), la plus grande surface est occupée par les wilayas de Tiaret et Mascara.

Le bassin versant couvre 28 communes en considérant leur limites cartographiques, seulement 22 d'entre elles sont retenues car elles sont les plus représentatives, aussi bien sur le plan de la superficie que sur celui de la densité de la population.

Ces communes totalisent environ 1500 personnes par rapport à une population totale estimée à plus de 345000 habitants pour le bassin versant (tableau I.1).

Tableau I.1 : Superficie totale dans le bassin versant des communes visées (Tecsult International Limitée, 2004).

Wilaya	Communes	A (Km ²)
Tiaret	Madna, Rahouia, Djebilet Rosfa, Sidi Bakhti, Djillali Ben Amar, MachraaSfa, Ain Kermes, Ain El Hadid, Takhmaret, Frenda	2677
Mascara	Nesmoth, Teghennif, Sidi Abdeldjabar, Sehailia, Zelmata, Ain Ferah, El Hachem, Oued El Abtal	1158
Saida	Tircine, Ouled Brahim	752
Relizane	Sidi M'Hamed Ben Aouda, Oued Essalem	313
Total	21	4900

A : Superficie de la zone considérée.

D'après les études menées par le bureau d'étude Tecsult International Limitée en 2004, le bassin versant de l'oued Mina renferme une population estimée à 289386 habitants, le grand pourcentage recouvre les wilayas de Tiaret et Mascara (figure I.3).

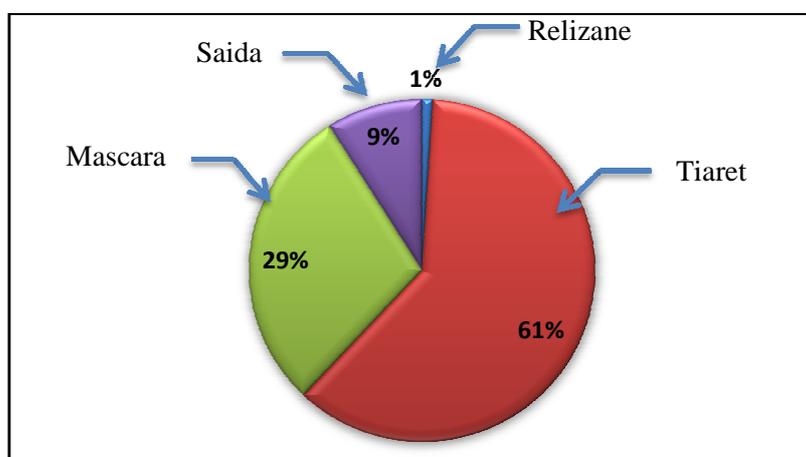


Figure I.3 : Les wilayas du bassin versant de l'oued Mina selon la taille de la population représentée (Tecsult International Limitée, 2004).

Au demeurant, il est utile de remarquer que 13 communes englobent plus de 90% de la population (tableau I.2).

Tableau I.2 :Classification des communes en fonction de la population.

Wilaya	Communes	Population Estimée (hab.)	Wilaya	Communes	Population estimée (hab.)
Tiaret	Frenda	68514	Mascara	Teghennif	1681
	Takhmaret	47893		SidiKada	421
	Rahouia	2005		El Hachem	31470
	MachraaSfa	18788		Oued El Abtal	32293
	Ain Kermes	23102		Ain Ferah	17595
	Ain El Hadid	23182	Saida	Ouled Brahim	22442

I.2.3.Caractéristiques physiques

I.2.3.1.Lithostratigraphie

Selon l’Institut des Géosciences Appliquées (I.F.G) en (1987); Le jurassique occupe la partie Sud et centrale du bassin versant, il détient le plus grand pourcentage de la superficie qui s’élève à 66,28%, avec une dominance de marnes, le Nord se caractérise essentiellement par l’ère cénozoïque (Pliocène, Miocène, Oligocène et Eocène) avec un pourcentage de 27,98 % de la superficie totale. Le crétacé et le trias constituent principalement le reste de la région avec 5,58%. La carte lithologique a été digitalisée sur (MapInfo 8.0)classé comme Système d’Information Géographique (S.I.G)(figure I.4 et tableau I.3).

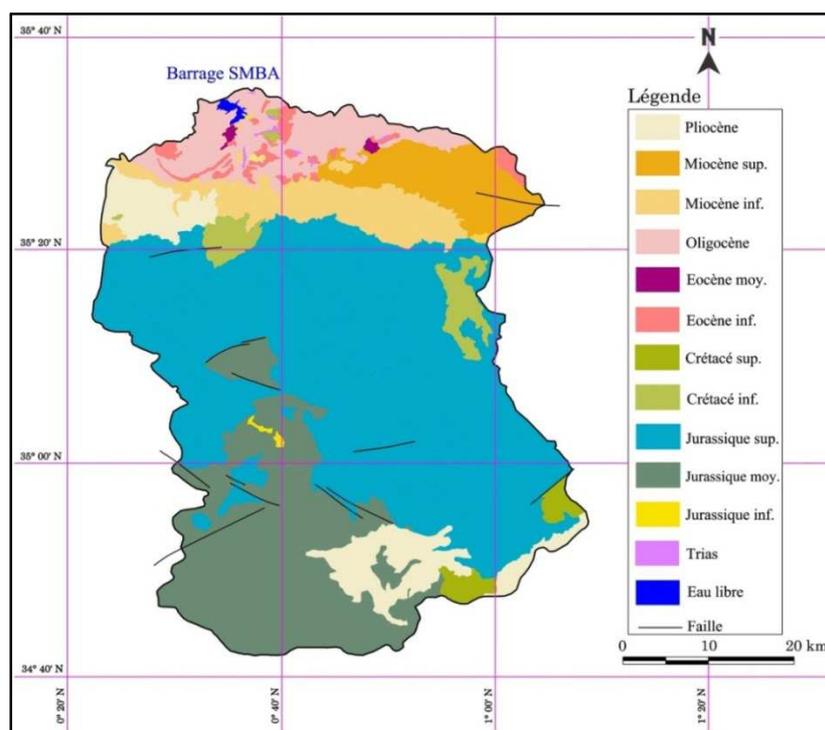


Figure I.4 : Carte lithologique du bassin versant de l’oued Mina.

Tableau I.3 : Lithologie du bassin versant de l'oued Mina au droit du barrage S.M.B.A.

Ere	Période/Epoque	Description	A (Km ²)	A (%)
Tertiaire	Pliocène	Grès sableux avec un peu de cimentation carbonatée, calcaires sableux et croûtes calcaires pouvant atteindre 1m d'épaisseur	363,09	7,41
	Miocène Supérieur	Marnes sableuses alternant en partie avec des bancs de grès peu importants.	248,43	5,07
	Miocène inférieur	Marnes avec des intercalations de minces plaques de grès et de bancs de limons.	368,48	7,52
	Oligocène	Marnes vert claires avec de faibles bancs de grès et de limon, en partie de marnes sableuses foncées.	310,17	6,33
	Eocène moyen	Calcaires fossilisés surtout d'origine marine et calcaire à Nummulites, grès mal assortis avec cimentation carbonatée.	12,25	0,25
	Eocène inférieur	Calcaires à Foraminifères, grès marins en alternance avec des marnes colorées.	68,60	1,40
Secondaire	Crétacé supérieur	Importantes quantités de calcaires gris et dolomies.	112,70	2,30
	Crétacé inférieur	Marnes claires à verdâtres, pierres limoneuses.	153,86	3,14
	Jurassique Supérieur	Dominance de marnes calcaires, grises et vertes alternant avec de faibles bancs de calcaire et de dolomites.	2250,08	45,92
	Jurassique moyen	Importantes quantités calcaires grises en partie oolithique et dolomies à gros grains, surfaces karstiques.	989,80	20,20
	Jurassique inférieur	Alternance de grès quartziques, dolomites, roches limoneuses et marnes.	7,84	0,16
	Trias	Grés durs et dolomies.	6,86	0,14
	Eau libre	/	7,84	0,16
Total			4900	100

En résumé on peut dire que le sous-sol du bassin versant étudié peut être divisé en :

- Calcaires et dolomies du jurassique moyen au Sud et au Sud-ouest;
- Jurassique supérieur dans la région centrale avec toujours des calcaires et dolomies alternant en générale avec des marnes calcaires et par endroits avec des calcaires sableux et des marnes. La partie Est de cette même région et caractérisée par des grès et des marnes, tandis que le Nord-Ouest renferme des bancs calcaires et dolomies.
- Dépôts de marnes à gypse et des grès d'origine marine à cimentation carbonatée appartenant au miocène supérieur.

I.2.3.2.Occupation du sol

La carte d'occupation des sols a été établie en « **mode non supervisé** » par télédétection à l'aide du logiciel « **ENVI 4.7** », ceci consiste aux étapes suivantes :

- Deux images satellites LANDSAT (ETM+, Enhanced Thematic Mapper Plus) dont leur acquisition date depuis (2009) d'une résolution de « **30 m** » couvrent la zone d'étude;
- Une classification non supervisée est établie;
- D'après les résultats obtenus nous avons pu localiser 6 zones (figure I.5 et tableau I.4) dont leur caractéristiques sont différentes, à savoir :

Couvert végétal permanent (forêts, arboriculture...); couvert végétal temporaire (agriculture, ...); couvert végétal clairsemé (steppes); pâturage; sol nu ; eau libre (barrage S.M.B.A).

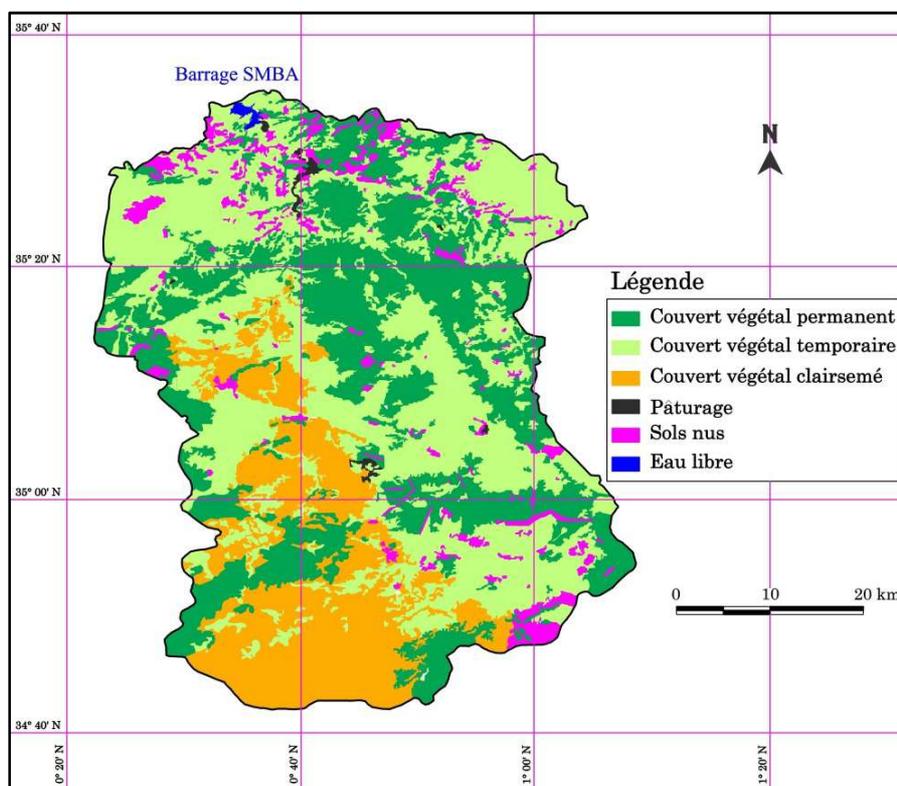


Figure I.5 : Carte d'occupation du sol simplifiée du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau I.4 : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol.

N° de classe	Occupation du sol	Degré de protection	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
1	Sols nus	Non protecteur	227,73	4,65
2	Pâturage	Peu protecteur	17,64	0,36
3	Couvert végétal clairsemé	Moyennement protecteur	805,10	16,43
4	Couvert végétal temporaire	Moyennement protecteur	1402,43	28,62
5	Couvert végétal permanent	Fortement protecteur	2439,26	49,78
6	Eau libre	/	7,84	0,16
Total			4900	100

La carte d'occupation des sols indique une concentration des sols nus dans la partie septentrionale du bassin versant avec 4,65 %, c'est la partie la plus exposée aux facteurs de dégradation des sols avec un haut degré de vulnérabilité à l'érosion. On note une forte proportion de couverture végétale permanente (49,78 %)éparse, alors que le couvert végétal temporaire s'étend sur le quart de la superficie allant du Nord au Sud. Le couvert végétal clairsemé se concentre dans la partie centrale et le Sud-Ouest du bassin avec 16,43 %.

I.2.3.3. Relief

a/ Modèle numérique de terrain(M.N.T)

Un modèle numérique de terrain appelé singulièrement M.N.T, représente une carte indiquant la forme brute du terrain, sans construction ni végétation. Il correspond donc à une schématisation dumodelé de la région étudiée.En se référant aux courbes de niveaux du Nord de l'Algérie, au logiciel (**MapInfo 8.0**)et(**Vertical Mapper**)qui est un module intégréàMapInfo, le Modèle Numérique du Terrain de la zone d'étude pourra ainsi être facilement établi (figure I.6).

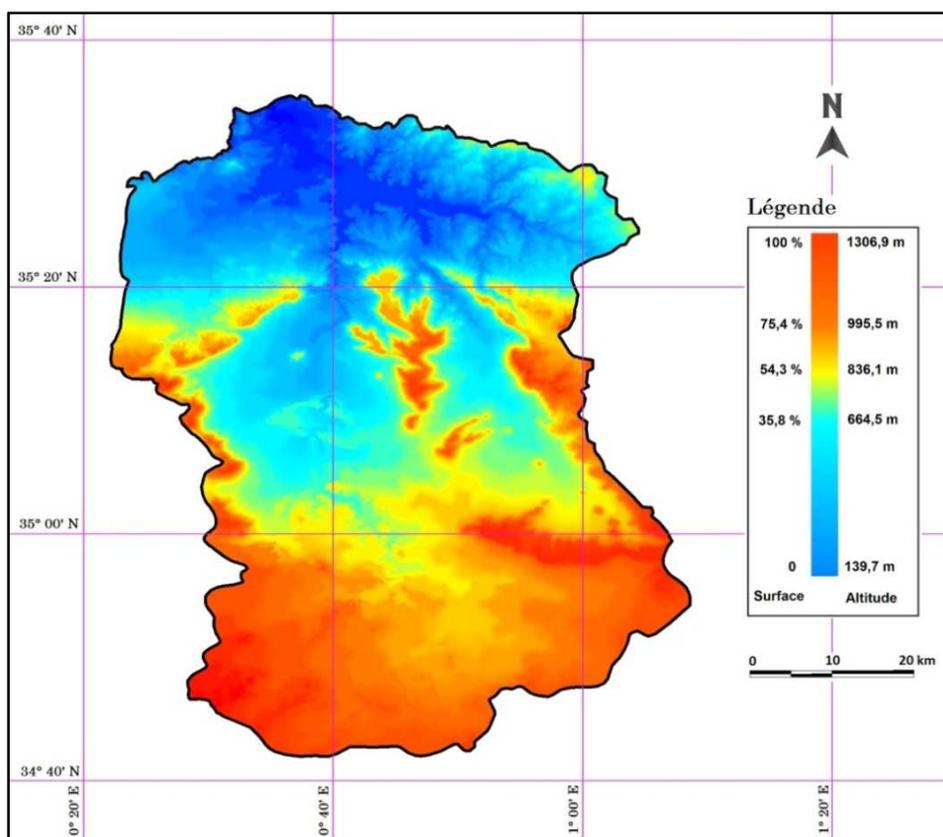


Figure I.6 : Modèle numérique du terrain du bassin versant de l'oued Mina.

b/ Topographie

A l'aide du Modèle Numérique de Terrain préétabli, la carte des altitudes pourra être facilement dressée à l'aide du module **Vertical Mapper** (figure I.7 et tableau I.5).

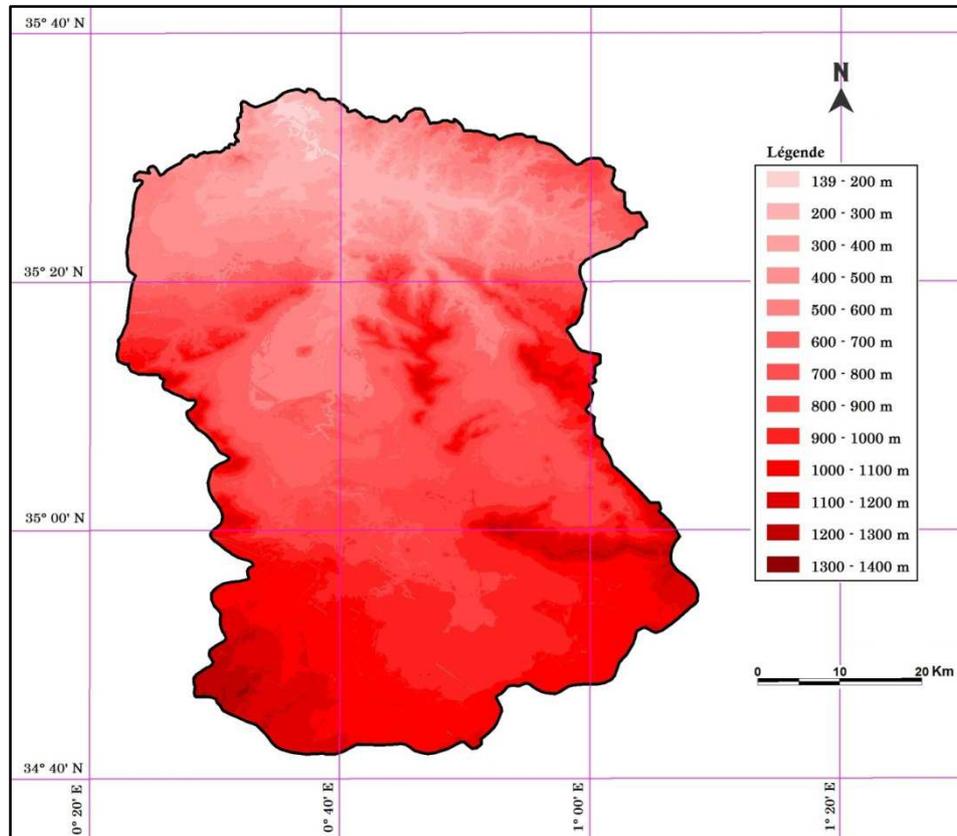


Figure I.7 : Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau I.5 : Classes des altitudes du bassin versant de l'oued Mina.

Altitudes	A (Km ²)	A (%)	Altitudes	A (Km ²)	A (%)
139,7 - 200	25,83	0,53	800 - 900	602,17	12,29
200 - 300	209,38	4,27	900 - 1000	649,77	13,26
300 - 400	241,38	4,93	1000 - 1100	767,02	15,65
400 - 500	385,82	7,87	1100 - 1200	307,96	6,29
500 - 600	522,15	10,66	1200 - 1300	80,08	1,63
600 - 700	539,18	11,00	1300 - 1306	2,48	0,05
700 - 800	566,78	11,57	Total	4900	100

Le bassin versant de l'oued Mina présente la configuration d'un terrain accidenté progressivement du nord vers le sud, Le maximum et le minimum des altitudes varient entre 1306 et 139m. L'analyse des classes d'altitude du bassin versant démontre un maximum de pourcentage de surface évaluée à 15,65% de la classe (1000 à 1100) m, et un minimum de 0,051% de la classe (1300 à 1306) m concentrées dans la partie Sud du bassin.

c/Classe des pentes

La carte des pentes (figure I.8) obtenue à l'aide du module « **Vertical Mapper** » illustre les classes des pentes dressées par l'O.R.S.T.O.M, le tableau (I.6) présente le pourcentage des classes de la zone d'étude.

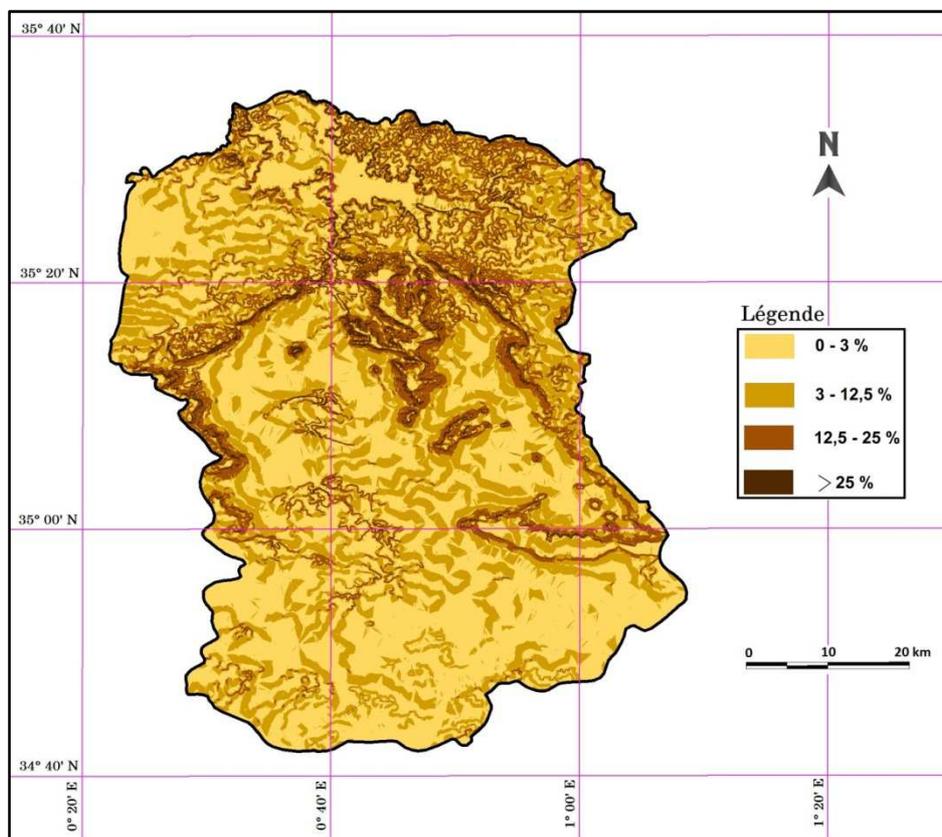


Figure I.8 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau I.6 : Classes des pentes dans le bassin versant de l'oued Mina.

Classes (%)	Angle	A (Km ²)	A (%)
0 - 3	0 - 1,5°	2672,95	54,55
3 - 12,5	1,5 - 7°	1985,97	40,53
12,5 - 25	7 - 14°	229,32	4,68
> 25	> 14°	3,92	0,08
Eau libre		7,84	0,16
Total		4900	100

Les classes des pentes du bassin versant de l'oued Mina sont réparties comme suit :

- Les terrains à pentes faibles (0 à 3 %) sont les plus répandus dans le bassin versant et occupent plus de la moitié de la superficie totale (54,55 %).

- Les terrains à pentes allant de (3 à 12,5 %) constituent la majeure partie du bassin de la Mina. Localisés principalement dans la zone marneuse du Nord et dans le centre Est, ils s'étendent sur environ 40 % de la superficie totale.
- Les terrains à pentes comprises entre (12,5 et 25 %), constituent la partie centrale allant de l'Est à l'Ouest ainsi que dans le Sud-Est de la zone d'étude. Ils occupent 4,68 % de la superficie totale et présentent un risque d'érosion très élevé.
- Les Terrains à pentes supérieures à 25 % couvrent 0,08 % de l'aire totale et se situent principalement dans le centre et le Sud-Est.

I.2.4 Réseau hydrométrique

Les mesures hydrométriques proviennent des stations de jaugeage de :

- L'oued El-Abtal notée (S1), située à 12 Km environ en amont du barrage S.M.B.A et qui contrôle : oued Mina, oued Taht et oued El-Abd.
- La station hydrométrique de Sidi Abdelkader Djilali notée (S2) contrôle les eaux transitant par l'oued Haddad en direction du barrage S.M.B.A (figure I.9, tableau I.7, photo I.1 et photo I.2).

Notons quelques affluents peu importants sur les deux rives de l'oued Mina.

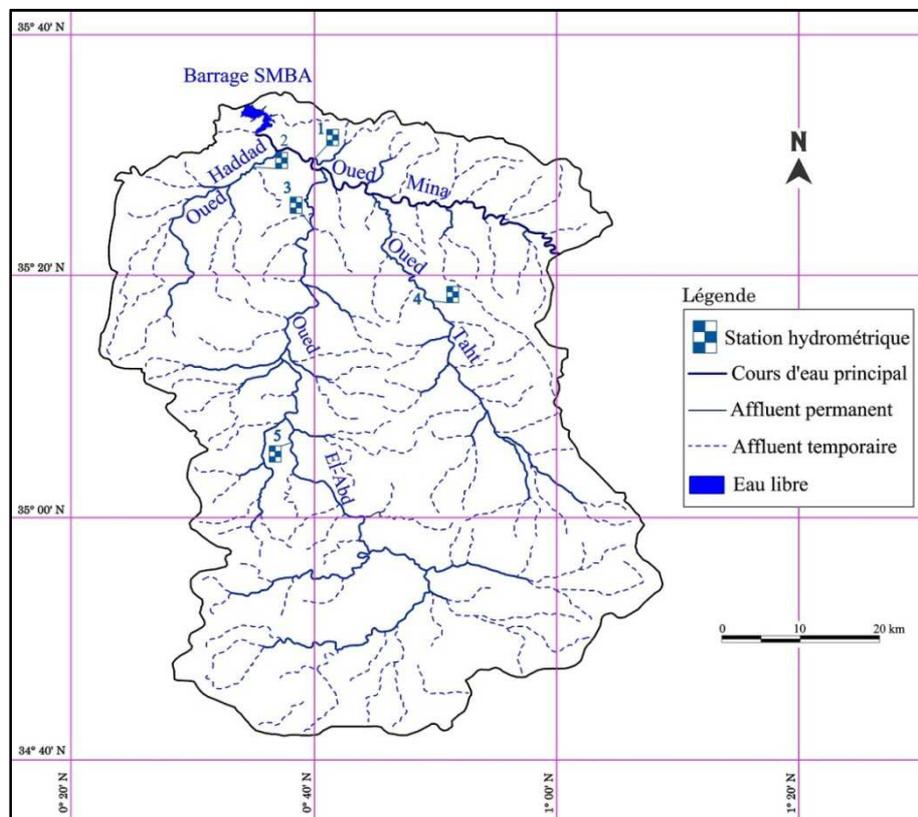


Figure I.9 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau I.7 : Stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Mina.

N°	Station	Longitude X(Km)	Latitude Y(Km)	Altitude Z(m)	Situation
S1	Oued El Abtal	316,80	245,65	205,00	Oued Mina
S2	Sidi A.E.K Djilali	309,00	244,50	225,00	Oued Haddad
S3	Ain Amara	316,45	235,12	300,00	Oued El-Abd
S4	Kef Mahboula	331,60	224,25	475,00	Oued Taht
S5	Takhmaret	316,40	203,10	600,00	Oued El-Abd



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/13)

Photo I.1 : Station hydrométrique d'Oued El-Abtal.

Cliché, TOUBAL A.K (16/02/13)

Photo I.2 : Station hydrométrique de Sidi AEK Djilali.

I.2.5. Etude des paramètres du relief

Les paramètres hydrométéorologiques tels que (précipitations, températures,...), dépendent en partie du relief. La morphologie du bassin versant influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief s'identifie au moyen d'indices et des caractéristiques ci-dessous.

I.2.5.1. Indice de compacité "K_c"

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius (1914) K_c, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. La formule (I.1) permettant de le déterminer l'indice de compacité est donnée comme suit (Dubreuil, 1974).

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \Rightarrow K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \text{ (I.1)}$$

avec :

K_c : Coefficient de Gravelius;

A : Superficie du bassin versant en (Km^2);

P : Périmètre du bassin versant en (Km).

Selon la valeur de K_c , on peut caractériser la forme du bassin versant comme suit :

- $K_c < 1 \Rightarrow$ bassin de forme ramassée;
- $K_c = 1 \Rightarrow$ bassin de forme circulaire;
- $K_c > 1 \Rightarrow$ bassin versant de forme allongée.

Le bassin de l'oued Mina avec une valeur de $K_c = 1,37$ présente donc une forme allongée.

I.2.5.2. Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des bassins versants entre eux. Les formules (I.2) et (I.3) permettent de calculer respectivement la longueur équivalente notée « L » et la largeur équivalente notée « l ».

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{I.2})$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{I.3})$$

avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en (Km);

l : Largeur du rectangle équivalent en (Km);

K_c : Indice de compacité de Gravelius;

A : Superficie du bassin versant en (Km^2).

Après application numérique, les valeurs du rectangle équivalent sont comme suit : $L = 135,48 \text{ Km}$ et $l = 36,17 \text{ Km}$.

I.2.5.3. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée (tableau I.8 et figure I.10).

Tableau I.8 : Répartition des tranches d'altitudes.

Classes	Superficies partielles		Superficies cumulées		Altitudes moyennes
	A (km ²)	A (%)	A (km ²)	A (%)	
1306,9-1200	82,56	1,68	82,56	1,68	1253,45
1200-1000	1074,98	21,94	1157,54	23,62	1100,00
1000-800	1251,94	25,55	2409,48	49,17	900,00
800-600	1105,96	22,57	3515,44	71,74	700,00
600-400	907,97	18,53	4423,41	90,27	500,00
400-200	450,76	9,20	4874,17	99,47	300,00
200-139,7	25,83	0,53	4900	100,00	169,85
Total	4900	100			

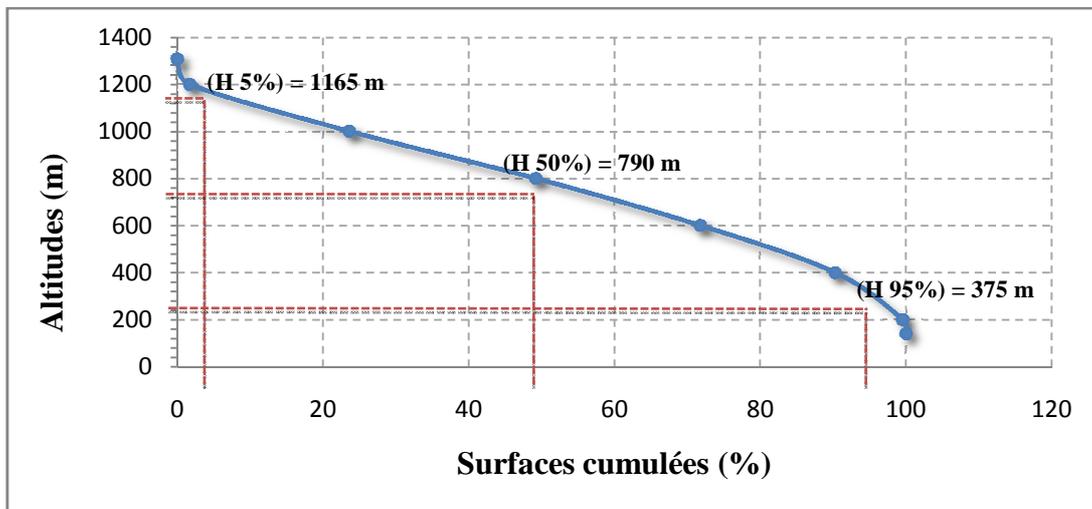


Figure I.10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Mina.

- **L'altitude médiane** : Elle correspond à l'altitude liée au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin. Sur la courbe hypsométrique, $H_{50\%} = 790$ m;
- $H_{5\%} = 1165$ m;
- $H_{95\%} = 375$ m;
- **L'altitude maximale** : $H_{(max)} = 1306,9$ m;
- **L'altitude minimale** : $H_{(min)} = 139,7$ m;
- **L'altitude moyenne**:

Cette dernière se détermine avec la formule (I.4).

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i D_i}{A} \text{ (I.4)}$$

avec :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant en (m);

A : Superficie du bassin versant en (Km²);

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau en (Km²);

D_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m).

En appliquant la formule (I.21) on obtient une altitude moyenne $H_{moy} = 771,5 \text{ m}$.

I.2.5.4. Indice de pente globale " I_g "

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin versant et la longueur du rectangle équivalent. Il est déterminé par la formule (I.5).

$$I_g = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L} \quad (I.5)$$

avec :

I_g : Indice de pente globale en (m/Km);

L : Longueur du rectangle équivalent en (Km);

$H_{5\%}$: Altitude liée au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin étudié en (m);

$H_{95\%}$: Altitude liée au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin étudié en (m).

En appliquant la formule (I.21) on obtient une dénivelée spécifique $I_g = 5,83 \text{ m/km}$.

I.2.5.5. Dénivelée spécifique " D_s "

La dénivelée spécifique est le produit de l'indice de pente global (I_g) par la racine carrée de la superficie du bassin (A) (formule I.6). On peut distinguer différentes classes de relief en fonction de D_s . Le tableau (I.9) présente la classification de l'O.R.S.T.O.M du relief en fonction de la dénivelée spécifique.

$$D_s = I_g \sqrt{A} \quad (I.6)$$

avec :

D_s : Dénivelée spécifique en (m);

I_g : Indice de pente globale en (%);

A : Superficie du bassin versant en (km²).

Tableau I.9 : Classification du relief (Laborde, 2000).

R1	Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$500 \text{ m} < D_s$

En appliquant la formule (I.21) on obtient une dénivelée spécifique $D_s = 408,18 \text{ m}$ (relief fort).

I.2.5.6. Pente moyenne " I_m "

La pente moyenne du bassin est donnée par la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante (Roche, 1963). Elle est fonction de l'équidistance, de la longueur des courbes de niveau et la surface considérée (formule I.7).

$$I_m = \frac{D.L}{A} \text{ (I.7)}$$

avec :

I_m : Pente moyenne du bassin considéré en (m/Km ou ‰);

D : Equidistance entre deux courbes de niveau en (m);

L : Longueur totale des courbes de niveau en (Km);

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

En appliquant la formule on obtient une pente moyenne $I_m = 12,81 \%$.

I.2.5.7. Densité de drainage " D_d "

Elle est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs L_i du bassin versant, à la surface totale A (formule I.8).

$$D_d = \frac{(\sum_1^n L_i)}{A} \text{ (I.8)}$$

avec :

D_d : Densité de drainage en (Km/Km^2);

L_i : Longueur des cours d'eau en (Km);

A : Superficie du bassin versant en (Km^2).

En appliquant la formule (I.21) on obtient une dénivelée spécifique $D_d = 4,14 \text{ km}/\text{km}^2$.

I.2.5.8. Temps de concentration " T_c "

Il est défini comme étant le temps mis par la goutte d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. La relation du temps de concentration a été développée par Giandotti (formule I.9).

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + (1,5L_{cp})}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \text{ (I.9)}$$

avec :

T_c : Temps de concentration du bassin versant en (heures);

A : Surface du bassin versant en (Km^2);

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal en (Km);

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant en (m);

H_{min} : Altitude minimale du bassin versant en (m).

En appliquant la formule (I.21) on obtient une dénivelée spécifique $T_c = 25,83$ heures.

I.2.6. Synthèse Récapitulative du bassin versant de l'oued Mina

Le tableau (I.10) synthétise les différentes caractéristiques morphométriques, topographiques et hydrologiques du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau I.10 : Synthèse des caractéristiques générales du bassin versant de l'oued Mina.

Type	Type de paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Caractéristiques Morphométriques	Superficie	(A)	Km^2	4900,00
	Périmètre	(P)	Km	343,30
	Indice de compacité	(K _c)	/	1,37
	Longueur du rectangle équivalent	(L)	Km	136,76
	Largeur du rectangle équivalent	(I)	Km	34,89
Caractéristiques Topographiques	L'altitude max	(H _{max})	m	1306,90
	Altitude Min	(H _{min})	m	139,70
	Altitude moyenne	(H _{moy})	m	771,50
	Altitude Médiane	(H _{50%})	m	790,00
	Altitude à 5% de la surface	(H _{5%})	m	1165,00
	Altitude à 95% de la surface	(H _{95%})	m	375,00
	Indice de pente globale	(I _g)	m/km	5,88
Dénivelée spécifique	(D _s)	m	408,18	
Caractéristiques hydrologiques	Densité de drainage	(D _d)	Km/Km^2	4,14
	Longueur du cours d'eau principal	(L _{cp})	Km	159,67
	Temps de concentration	(T _c)	heures	25,83

I.2.7. Hydroclimatologie

L'étude de cette partie a pour but l'établissement du bilan hydrique, élaboré en fonction des résultats relatifs aux températures et aux précipitations mesurées sur terrain par l'O.N.M (Office National de la Météorologie), et l'utilisation des paramètres calculés suivant des formules empiriques.

I.2.7.1. Choix de la station

Le choix de la station repose sur les conditions ci-après :

- Les paramètres climatiques seront prélevés d'un même point (station climatologique) pour le calcul du bilan hydrique;
- La disponibilité de données climatiques au niveau de l'Office National de la Météorologie (O.N.M, Alger).

En fonction de tout ce que dessus nous avons opté pour la station de Matemore située dans la wilaya de Mascara, sur la période allant de 1977 à 2010. Cette dernière est située à environ 15 Km de la limite de la zone d'étude de la Latitude Nord : 35°36 et de la Longitude Est : 00°18 (figure I.2).

I.2.7.2. Température

Le tableau (III.11) illustre les températures minimales, moyennes et maximales mensuelles enregistrées à la station de Matemore sur une période de 34 ans (1977-2010).

Tableau I.11 : Températures mensuelles à la station de Matemore (1977-2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
T_{min} (°C)	3,0	3,8	5,3	7,1	10,5	14,6	17,7	18,2	15,2	11,4	6,9	4,2
T_{max} (°C)	14,7	16,3	18,9	21,2	25,5	31,3	35,7	35,5	30,7	25,3	19,1	15,1
T_{moy} (°C)	8,9	10,0	12,1	14,1	18,0	23,0	26,7	26,8	23,0	18,4	13,0	9,7

Source : (O.N.M Alger, 2013)

T_{min} : Température minimale mensuelle entre (1977/2010) en (°C);

T_{max} : Température maximale mensuelle entre (1977/2010) en (°C);

T_{moy} : Température moyenne mensuelle entre (1977/2010) en (°C).

L'analyse des températures mensuelles durant une période de 34 ans (1977/2010) montre que les mois de juillet et août sont les plus chauds de l'année ce qui correspond à des températures moyennes de 26,7 et 26,8°C, le mois de janvier enregistre des températures basses pouvant atteindre 3°C. La température moyenne interannuelle est de 17°C (figure I.11).

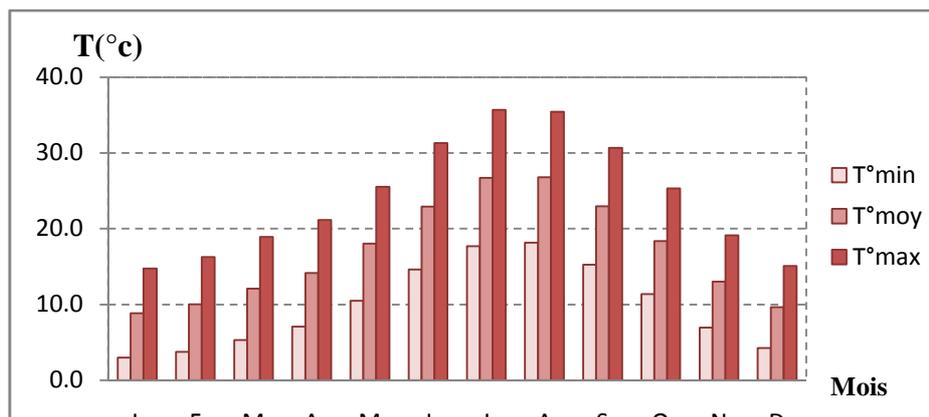


Figure I.11 : Températures mensuelles de la station de Matemore (1977/2010).

I.2.7.3.Humidité relative

Les valeurs moyennes de l'humidité relative à la station de Matemore s'étalant sur la période de (1977-2010) sont représentées dans le tableau (III.12).

Tableau I.12 : Humidités relatives mensuelles à la station de Matemore (1977-2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Hr_{min} (%)	57	55	51	48	43	36	30	32	38	46	54	56
Hr_{max} (%)	93	94	93	92	90	82	73	75	84	89	92	91
Hr_{moy} (%)	75	74	72	70	67	59	51	53	61	67	73	74

Source : (O.N.M Alger, 2013)

Hr_{min} : Humidité relative minimale mensuelle entre (1977/2010) en (%);

Hr_{max} :Humidité relative maximale mensuelle entre (1977/2010) en (%);

Hr_{moy} :Humidité relative moyenne mensuelle entre (1977/2010) en (%).

Les valeurs moyennes mensuelles calculées durant la période (1977-2010) montrent que le mois de février détient la valeur maximale avec une valeur de 94% alors que la valeur minimale est enregistrée au mois de juillet avec un degré d'humidité relative de 30 % (figure I.12).

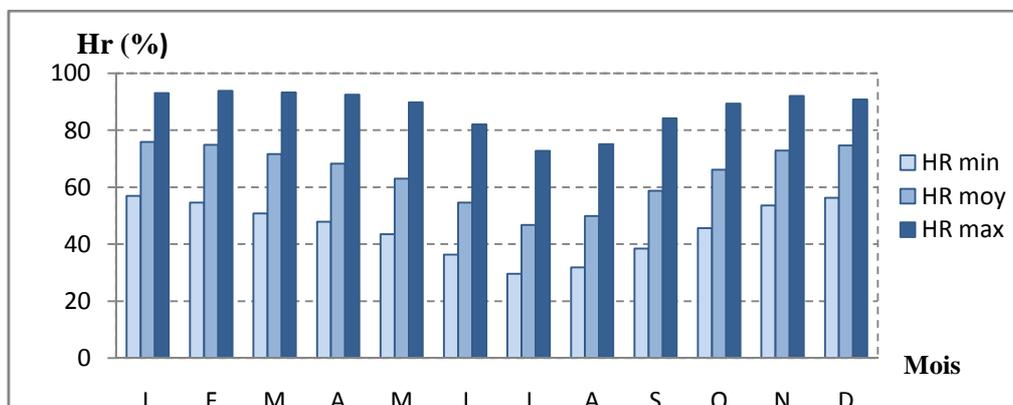


Figure I.12 : Humidités relatives mensuelles de la station de Matemore(1977/2010).

I.2.7.4. Vitesse du vent

Les vitesses moyennes du vent moyen enregistrées dans la station de Matemore dans la période (1977-2010) sont représentées dans le tableau (I.13).

Tableau I.13 : Moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen à la station de Matemore (1977-2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
V_{vent} (m/s)	2,3	2,5	2,5	2,8	2,8	2,7	2,4	2,5	2,4	2,2	2,1	2,4

Source : (O.N.M Alger, 2013)

V_{vent} : Vitesse minimale mensuelle moyenne entre (1977/2010) en (m/s);

Le mois d'avril détient la valeur maximale des vitesses du vent moyen avec 3m/s à l'encontre du mois de novembre qui s'évalue à 2,1 m/s (figure I.13).

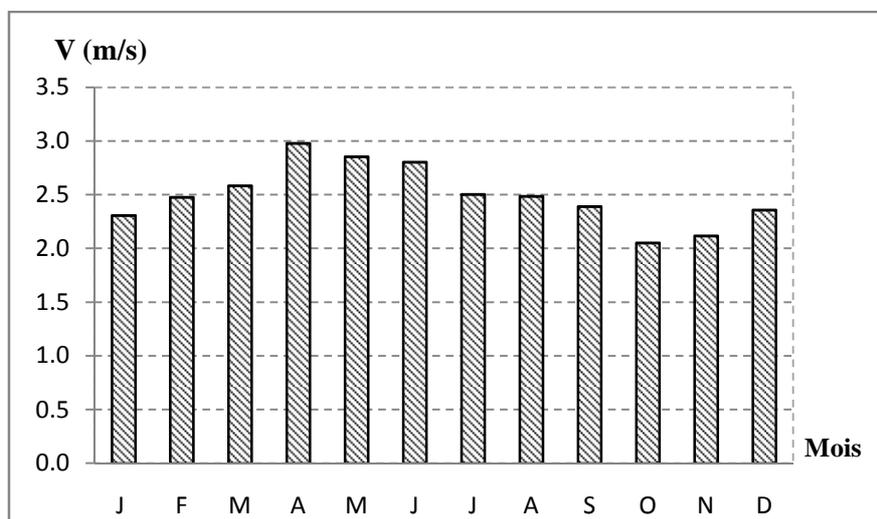


Figure I.13 : Moyenne mensuelle des vitesses du vent moyen de la station de Matemore (1977/2010).

I.2.7.5. Insolation

Au sens météorologique, l'insolation est l'exposition d'un objet au rayonnement solaire direct; cette exposition est correctement révélée, estime-t-on, par la présence d'ombres portées nettement dessinées : on considère alors que la production de telles ombres est possible lorsque l'éclairement de l'objet par le soleil a une valeur au moins égale à 120 watts par mètre carré, ce qui permet de déterminer à chaque instant s'il y a ou non insolation.

Les valeurs de la durée moyenne mensuelle de l'insolation enregistrées par la station de Matemore entre 1980 et 2010 sont représentées dans le tableau (I.14).

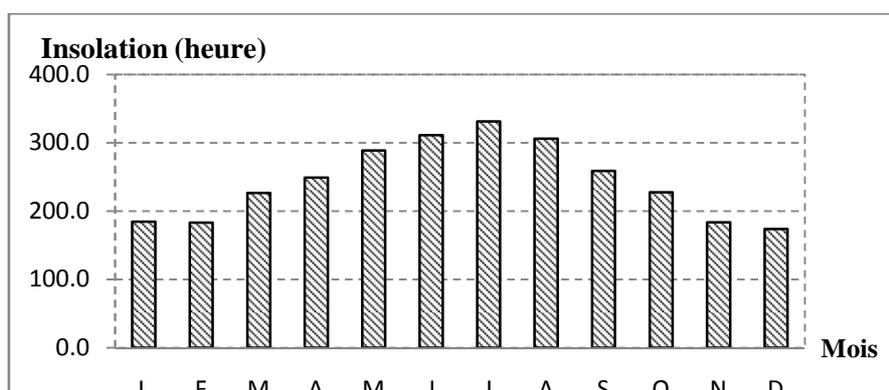
Tableau I.14 :Duréemensuelle de l'insolation totale à la station de Matemore(1980/2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Insolationmoy. (heures)	184,4	183,0	226,6	248,9	288,5	311,0	331,1	306,1	259,0	227,7	183,7	173,8

Source : (O.N.M Alger, 2013)

Insolationmoy : Insolation moyenne mensuelle entre (1980/2010) en (heures).

Ladurée d'insolation maximale est observée au mois de juillet avec 331,1heures alors que la valeur minimale est enregistrée en période hivernale au mois de décembreavec une valeur de 173,8 heures (figure I.14).

**Figure I.14** :Durée mensuelle d'insolation totale en (heures) de la station de Matemore (1980/2010).

I.2.7.6.Précipitation

Les précipitations représentent l'un des principaux facteurs climatiques. Elles englobent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface du globe sous forme liquide ou solide. Elles nous renseignent sur le type de climat de la zone d'étude.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles sur la période (1977/2010) sont présentées dans le tableau (I.15).

Tableau I.15 :Cumuls mensuel des précipitationsà la station de Matemore(1977/2010).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
P_{\min} (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
P_{\max} (mm)	123,8	115,2	136,6	68,1	84,3	23,5	14,4	48,0	45,7	88,9	191,9	188,4
P_{moy} (mm)	42,1	40,8	37,8	29,6	26,6	4,1	2,0	5,2	15,8	31,3	47,6	42,4

Source : (O.N.M Alger, 2013)

 P_{\min} : Précipitation minimale mensuelle entre (1977/2010) en (mm); P_{\max} : Précipitation maximale mensuelle entre (1977/2010) en (mm); P_{moy} : Précipitation moyenne mensuelle entre (1977/2010) en (mm).

D'après l'analyse des résultats, la précipitation moyenne interannuelle de la station étudiée est de 325,3 mm, avec un maximum de précipitation au mois de novembre avec 188,5 mm et un minimum de 0 pour tous les mois sauf pour le mois d'octobre (figure I.15).

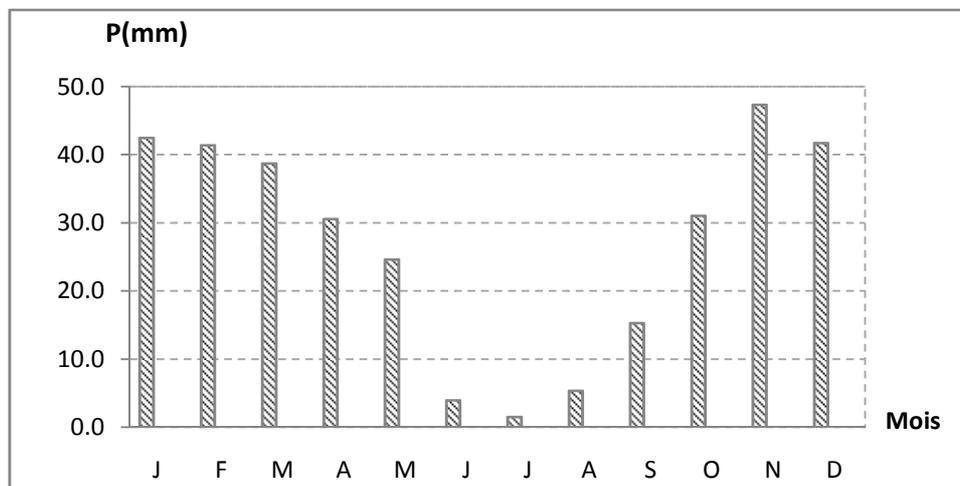


Figure I.15 :Cumul mensuel des précipitations de la station de Matemore(1977/2010).

I.2.8. Indices climatiques

Afin de déterminer le régime climatique de la région nous avons utilisé l'indice de De Martonne

I.2.8.1. Indice d'aridité annuelle de De Martonne "I"

Le calcul d'un indice d'aridité, au même titre que la classification des climats, a toujours été un sujet de recherche en climatologie. Il existe une multitude d'indices et de formules, certaines basées sur des critères climatologiques, d'autres biogéographiques.

Parmi tous ces indices, les plus connus restent ceux d'Emmanuel De Martonne (1926 à 1941), Charles Warren Thornthwaite (1948) et Bagnouls et Gaussen (1953 à 1957).

Le facteur de pluie de Lang a été modifié par De Martonne en 1923, de manière à éviter d'avoir des valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0 °C (De Martonne, 1926; in Gerrard, 1999). Noté I, cet indice permet de déterminer le degré d'aridité d'une région, et se calcule par la formule (I.10).

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

I : Indice de De Martonne;

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm);

T : Température moyennes annuelles en (°C).

pour :

- $I < 5$: Climat hyperaride;
- $5 < I < 7,5$: Climat désertique;
- $7,5 < I < 10$: Climat steppique.
- $10 < I < 20$: Climat semi-aride;
- $20 < I < 30$: Climat tempéré.

L'indice d'aridité est de l'ordre de 12,01 à la station de Matemore, ce qui reflète un climat semi-aride (figure I.16).

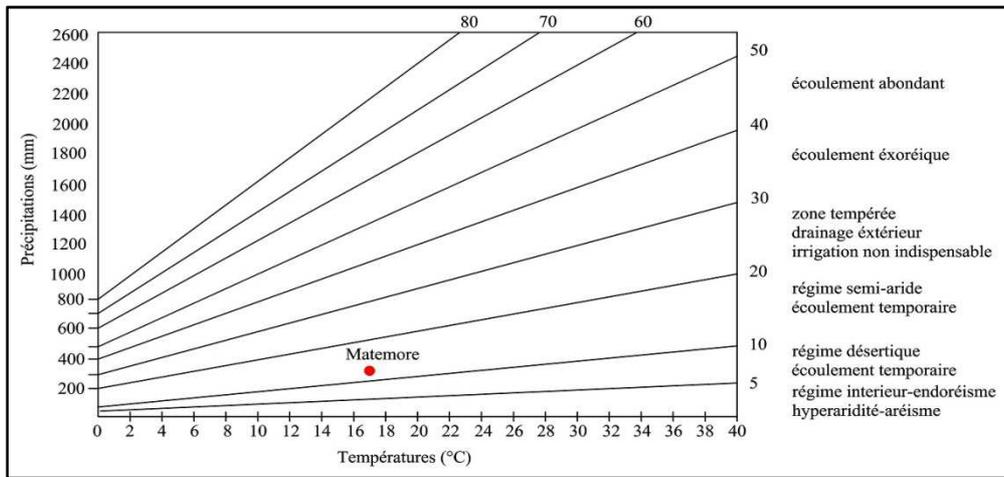


Figure I.16: Indice d'aridité de la station de Matemore.

I.2.8.2. Diagramme ombrothermique

Pour Gaussen, un mois est "sec" si le quotient des précipitations mensuelles P exprimées en mm, par la température moyenne T exprimée en °C, est inférieur à 2. La représentation sur le même graphique des températures et des précipitations moyennes mensuelles avec en abscisse, les mois permettent d'obtenir le diagramme ombrothermique qui mettent immédiatement en évidence les périodes sèches et les périodes pluvieuses (Gerard, 1999). La figure (I.17) illustre le diagramme ombrothermique à la station de Matemore.

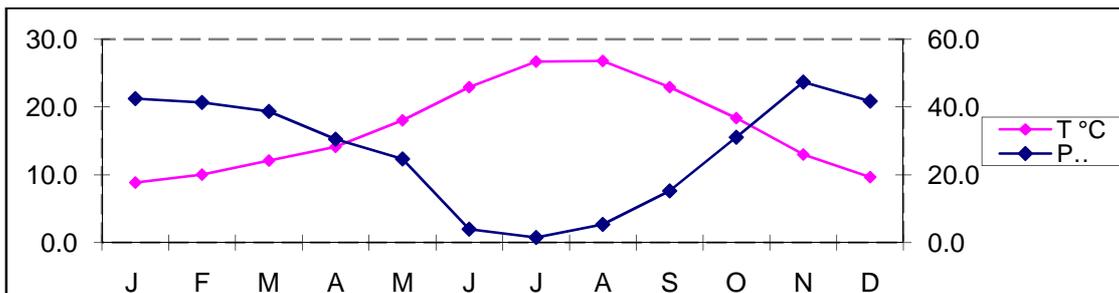


Figure I.17 : Diagramme ombrothermique de la station de Matemore.

Le calcul du diagramme ombrothermique des données météorologiques de la station de Matemorenos a permis de distinguer deux périodes comme suit :

- Une période déficitaire qui s'étale de mai jusqu'à octobre, cette dernière est caractérisée par les températures élevées et des précipitations minimales.
- Une période humide est enregistrée entre le mois de novembre et le mois d'avril, ceci se justifie par l'abondance des précipitations en cette durée.

I.2.9 Bilan hydrologique

Afin de déterminer le bilan hydrologique, notre choix se porte sur la méthode de Thornthwaite, en fonction de la disponibilité des données (températures et précipitations). Les principaux paramètres pris en considération dans le calcul sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (EXC).

I.2.9.1. Evapotranspiration

Le phénomène de l'évapotranspiration se compose, d'une part, de l'évaporation directe qui s'effectue à partir des sols humides et des différents plans d'eau, mais aussi de la transpiration des végétaux. L'évapotranspiration est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant.

I.2.9.2. Evapotranspiration potentielle "ETP"

L'évapotranspiration est le paramètre le plus important du bilan hydrologique, elle constitue le transfert de l'eau de la terre vers l'atmosphère par évaporation des eaux de surface et du sol et par la transpiration des végétaux.

A défaut de mesures directes sur terrain de l'ETP elle est estimée à l'aide de la formule empirique de Thornthwaite, qui est largement utilisée pour les climats semi-arides (Gerard, 1999). Cette dernière permet de calculer l'évapotranspiration potentielle à partir des données de base de température moyenne de la période considérée en (°C).

a/ Formule de Thornthwaite

La formule (I.11) de Thornthwaite est basée essentiellement sur les températures de l'air. Les formules (I.12), (I.13) et (I.14) représentent le calcul de chaque paramètre de la formule Thornthwaite.

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (\text{I.11})$$

d'où :

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

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{I.13})$$

$$a = 0,492 + 1,79 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 \quad (\text{I.14})$$

ETP : Évapotranspiration potentielle en (mm);

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en (°C);

I : Indice thermique annuel;

i : Indice thermique mensuel;

k : Facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jours du mois dépendant de la latitude ou de la longitude (voir Annexe 1). La formule (I.15) donne le calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée de la zone d'étude.

$$ETP_c = ETP \cdot K \quad (\text{I.15})$$

Pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle dans le bassin versant, nous avons pris comme référence les températures enregistrées au niveau de la station de Matemore.

Les résultats obtenus par l'application de cette formule relatifs à la période (1977/2010) se résument dans le tableau (I.16).

Tableau I.16 : Evapotranspiration potentielle de la station de Matemore.

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	42,10	40,80	37,80	29,60	26,60	4,10	2,00	5,20	15,80	31,30	47,60	42,40
T_{moy} (°C)	8,90	10,00	12,10	14,10	18,00	23,00	26,70	26,80	23,00	18,40	13,00	9,70
i	2,39	2,86	3,81	4,80	6,95	10,08	12,63	12,70	10,08	7,19	4,25	2,73
I	80,48											
a	1,79											
ETP (mm)	19,15	23,59	33,16	43,58	67,43	104,49	136,42	137,33	104,49	70,13	37,69	22,34
K	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
ETP_c(mm)	16,66	20,05	34,15	47,66	81,59	126,81	168,28	159,30	107,63	68,03	32,42	18,91

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée révèle une valeur maximale de 168,3 mm et minimale de 16,6 mm. La période d'été est la plus dominante de l'année car ce phénomène s'explique par la hausse de température en cette saison avec une valeur de température moyenne maximale qui s'élève à 35,7 °C, ceci s'explique aussi par la formule de Thornthwaite qui est fonction de la température moyenne mensuelle du mois considéré.

b/Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du bilan hydrologique

La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP_c) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P) permet de calculer l'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR).

Plusieurs cas peuvent se présenter :

$$\text{Si } P > ETP \rightarrow ETR = ETP$$

La quantité d'eau correspondant à $P - ETP$ est *emmagasinée* ⁽¹⁾ dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci, la partie de l'*excédent* dépassant éventuellement la réserve cumulée maximale en eau du sol, constitue le surplus disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

(1) Thornthwaite a été conduit à adopter pour ce seuil de saturation du sol une valeur de 100 mm, cet ordre de grandeur étant confirmé par les travaux de divers agronomes dans le monde.

$$\text{Si } P = ETP \rightarrow ETR = ETP = P$$

Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

$\text{Si } P < ETP \rightarrow ETR = P$ + Tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci.

Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que : $ETP > ETR \rightarrow ETP - ETR = \text{Déficit d'eau}$

Le tableau (I.17) illustre le calcul du bilan hydrologique calculé à la station de Matemore.

Tableau I.17 : Bilan hydrologique à la station de Matemore (1977/2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	42,10	40,80	37,80	29,60	26,60	4,10	2,00	5,20	15,80	31,30	47,60	42,40
ETPc (mm)	16,57	20,14	34,18	47,93	81,92	126,28	168,32	159,56	107,30	67,83	32,57	18,79
ETR (mm)	16,57	20,14	34,18	47,93	81,92	47,93	81,92	30,46	2,00	5,20	15,80	31,30
RFU (mm)	100,00	100,00	100,00	81,67	26,36	0	0	0	0	0	15,03	38,63
Déficit (mm)	0	0	0	0	0	95,83	166,32	154,36	91,50	36,53	0	0
Excédent (mm)	25,53	20,66	3,62	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Le calcul du bilan hydrologique à la station de Matemore révèle 3 stades de la RFU :

➤ Saturation

L'évolution de la RFU atteint l'état de saturation (100 %) pendant les 3 mois de l'année (janvier, février et mars), cette période est caractérisée par un écoulement superficiel qui atteint 25,53 mm au mois de janvier et une absence totale de déficit agricole. Cette spécificité revient à ce que le taux de précipitations est nettement supérieur que l'évapotranspiration potentielle.

➤ Epuisement

La RFU commence à diminuer à partir du mois d'avril (81,67 mm) jusqu'à juin où elle s'épuise totalement; ce manque d'eau dans la réserve revient à ce que la demande est plus supérieure que la réserve.

Le déficit agricole n'apparaît que pendant la saison sèche, de juin jusqu'à octobre avec des valeurs respectives de 95,43 mm (juin), 166,32 mm (juillet), 154,36 mm (août), 91,50 mm (septembre) et 36,53 mm (octobre).

➤ **Régénération**

A partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock avec une augmentation de la RFU, la répartition mensuelle de cette dernière est comme suit : 15,03 mm (novembre) et 38,63 mm (décembre).

I.3. Barrage Sidi M'hamed Ben Aouda "S.M.B.A"

I.3.1. Situation géographique

Le barrage S.M.B.A est situé sur l'oued Mina à 20 Km au sud de la ville de Relizane, de coordonnées Lambert (X= 308,85 Km, Y= 255,18 Km), il est destiné pour l'alimentation en eau potable des villes de Relizane et de Sidi M'hamed Ben Aouda ainsi que pour l'irrigation de la plaine de la Mina.

I.3.2 Retenue du barrage

La retenue du barrage renferme un volume total à l'origine de 235 Hm³, la cote de la retenue normale (RN) est de 180,00 (N.G.A) et les plus hautes eaux (PHE) à 186,50 (N.G.A). La figure (I.21) a été digitalisée à partir de la carte du plan de la retenue établie par le Ministère des Travaux Publics en 1970 (figure I.18).

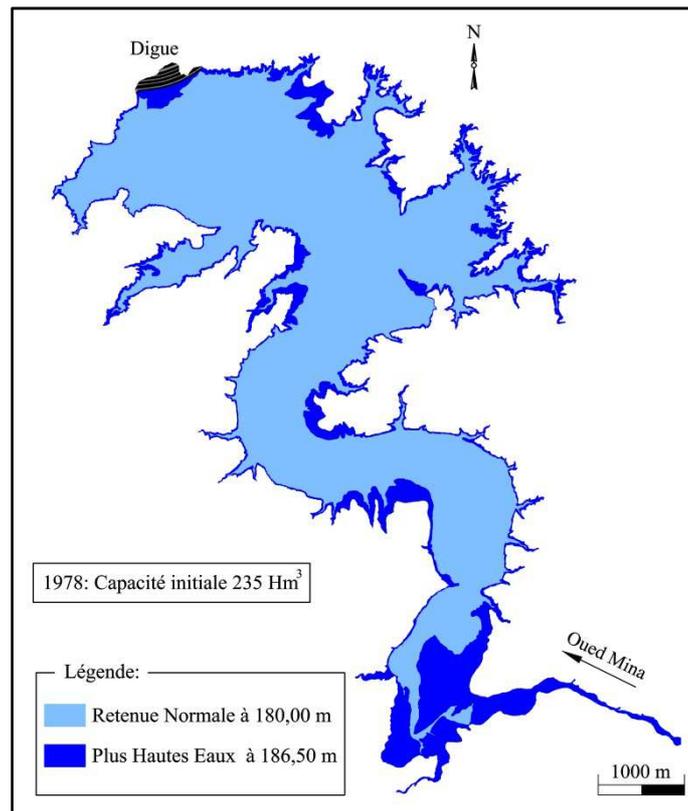


Figure I.18 :Plan de la retenue du barrage S.M.B.A.

I.3.3.Eléments constitutifs du barrage

I.3.3.1.Digue

Le barrage est constitué de $5,3 \text{ Hm}^3$ de remblai homogène avec filtre cheminé, d'une hauteur maximale de 64 mètres au-dessus du lit de l'oued et d'une longueur totale en crête (188,50 N.G.A) de 890 m, l'appui de la rive gauche repose sur un escarpement stable constitué de couches alternées de grès et de marnes alors que le soutien de la rive droite consiste en une petite colline de façon que le dernier quart de la crête du barrage constitue presque une digue de col indépendante (10 mètres de hauteur environ). Un batardeau en amont est incorporé dans la partie inférieure du barrage.

I.3.3.2.Evacuateur de crues

Les évacuateurs de crues ont pour rôle, d'assurer le rejet des crues exceptionnelles survenant à la retenue normale pleine sans risque de déversement sur la digue et sans créer d'érosion en aval risquant d'être dommageable pour la digue.

Le barrage est équipé d'un évacuateur de crues à seuil libre en forme de tronc de cône (photo I.3) pour un débit de $4400 \text{ m}^3/\text{s}$. L'évacuateur comprend essentiellement une tour déversante, deux conduits ovoïdes accolés en béton armé installés sous le barrage, et un ouvrage de restitution à l'aval (Coyne et Bellier, 1980).



Cliché, direction du barrage S.M.B.A (12/12/10)

Photo I.3 : Evacuateur de crues.

I.3.2.3. Tour de prise d'eau

Le but de cet ouvrage est celui d'assurer le débit de pointe de la demande en aval entre le niveau normal de la retenue et le niveau des eaux les plus basses, en tenant compte d'un prélèvement d'eau de qualité compatible avec sa destination.

Le barrage dispose de deux organes pour la restitution de l'eau en aval : une prise d'eau pour l'alimentation en eau potable avec un débit de $11\text{m}^3/\text{s}$ et une autre pour l'irrigation (photo I.4).



Cliché, TOUBAL A.K (30/03/2012)

Photo I.4 : Prise d'eau du barrage.

I.3.2.4. Organes de vidange

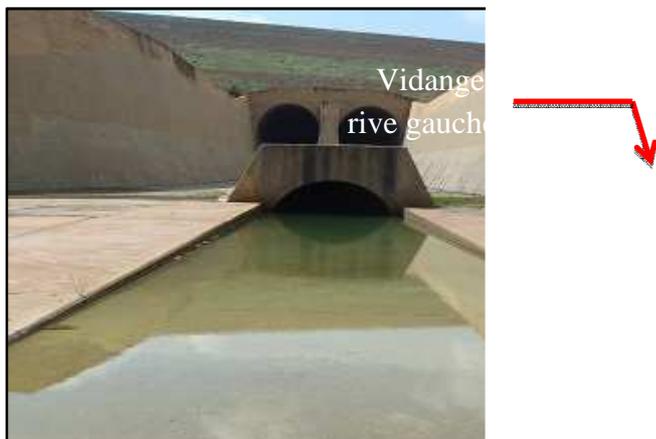
L'ouvrage de la vidange revêt le caractère d'un organe essentiel dans la conception d'un barrage, il a pour rôle :

- D'assurer la vidange de la retenue en quelques jours en cas d'avarie grave constatée sur les ouvrages (renards, glissement d'une partie de talus aval...).
- De vider la tranche morte en fin de saison d'utilisation des eaux stockées pour l'entretien de la retenue (curage éventuel des dépôts et des parties en amont du collinaire, prise d'eau, parement amont de la digue).

Le barrage S.M.B.A est équipé de 3 organes de vidange comme suit :

I.3.2.5. Vidange de fond rive gauche

La vidange de fond rive gauche constitue l'organe préférentiel de contrôle du plan d'eau, la vidange s'insère entre et sous les deux moitiés de l'évacuateur de crues, et débouche à l'aval en remontant sur le radier de l'ouvrage de restitution, elle est en mesure d'évacuer $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (photo I.5)(Coyne et Bellier, 1980).

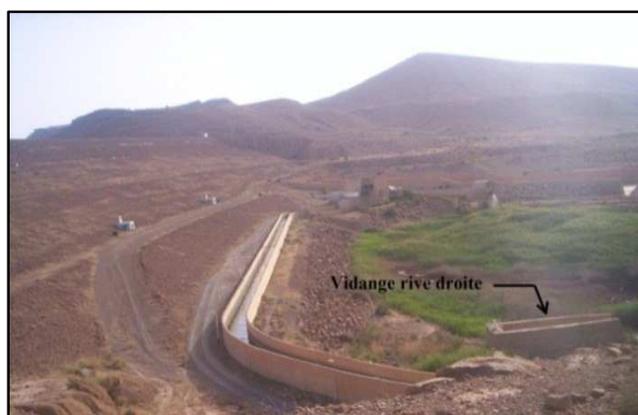


Cliché, TOUBAL A.K (30/03/2012)

Photo I.5 : Vidange rive gauche du barrage S.M.B.A.

I.3.2.6. Vidange de fond rive droite

La vidange réutilise la galerie creusée pour assurer la dérivation de l'oued Mina pendant les travaux de construction du barrage, elle constitue un organe de secours en cas de défaillance ou d'indisponibilité de la vidange rive gauche (elle pourrait à elle seule descendre le plan d'eau à 10 m sous la retenue normale en une quinzaine de jours (photo I.6), le débit véhiculés'élève à $105 \text{ m}^3/\text{s}$ (Coyne et Bellier, 1980).



Cliché, direction du barrage S.M.B.A (29/07/2006)

Photo I.6 : Vidange rive droite du barrage S.M.B.A.

I.3.2.7. Vannettes de dévasement

Le pertuis amont de la vidange de fond est encadré par quatre circuits contrôlés par vannettes d'un diamètre de 400 mm, dont les deux extérieurs offrent des possibilités de branchement de tuyaux (\varnothing 400 mm) à cinq niveaux étagés entre 150 et 173,50 m sur la face amont de la tour de prise d'eau(photo I.7) (Coyne et Bellier, 1980).



Cliché, direction du barrage S.M.B.A (28/08/2011)

Photo I.7 : Vannettes de dévasement du barrage.

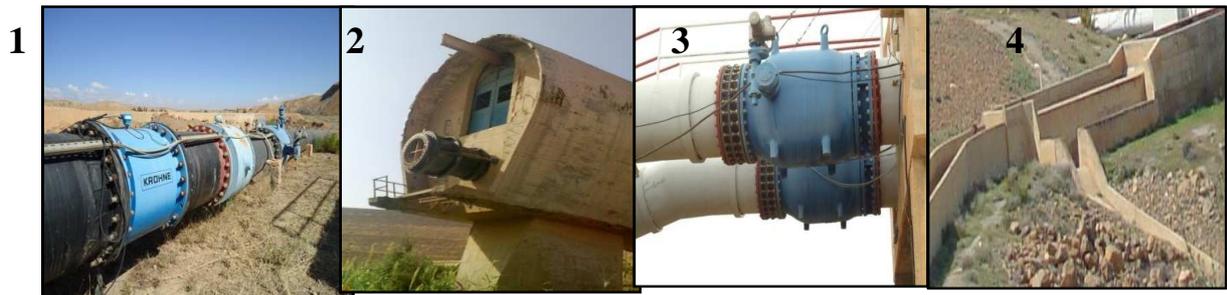
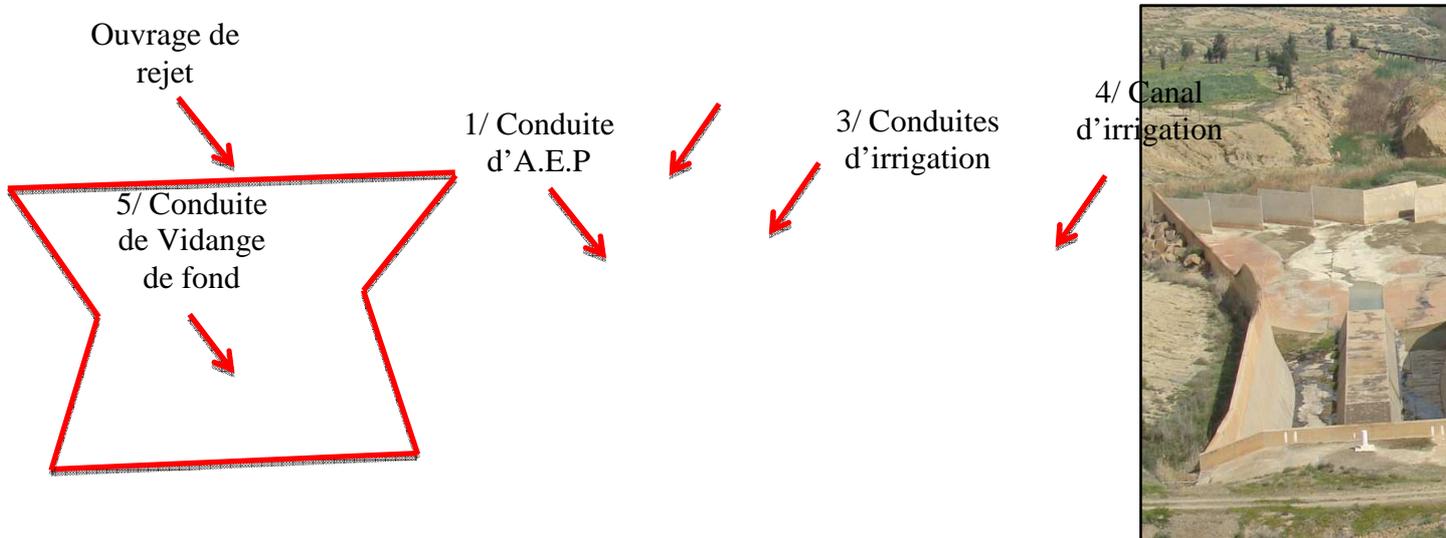
I.3.2.8. Ouvrages situées à l'aval

Le barrage S.M.B.A compte plusieurs ouvrages à l'aval, chacun d'eux a pour rôle principal la restitution mais pour des destinations différentes, ces derniers sont résumés comme suit :

- Vidange rive droite;
- Vidange rive gauche;
- Canal d'irrigation;
- Jet creux;

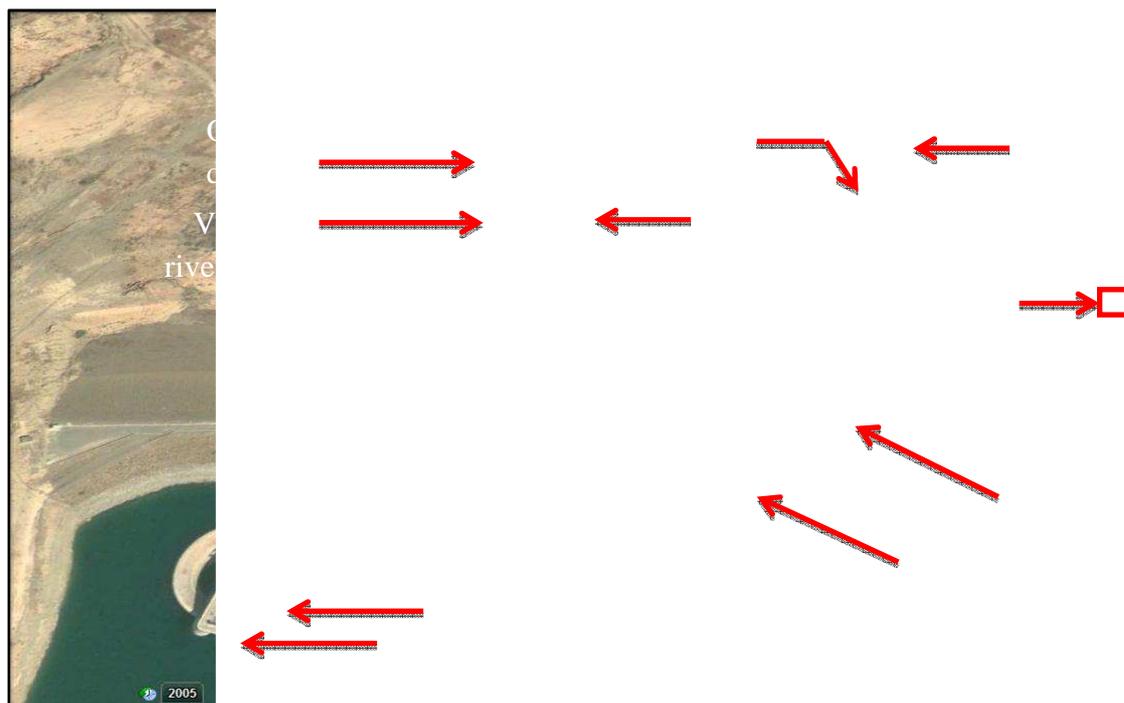
- Conduite pour l'alimentation en eau potable (photo I.8).

Afin de bien connaître la position de chaque constituant par rapport à la digue du barrage, une prise de vue de dessus avec Google Earth dont l'acquisition de l'image date depuis le 14/08/2009 est illustrée dans la figure (I.9).



Cliché, TOUBAL A.K (30/03/2012)

Photo I.8: Ouvrages du barrage situés à l'aval.



Google Earth, (2009)

Figure I.19 : Image satellite du barrage S.M.B.A.

I.3.3. Synthèse récapitulative du barrage S.M.B.A

Les différentes caractéristiques hydrologiques, techniques et économiques du barrage S.M.B.A sont représentées dans le tableau (I.18).

Tableau I.18 :Caractéristiques générales du barrageS.M.B.A.

Caractéristiques hydrologiques			
Bassin versant	Oued	Mina	
	Surface du bassin versant	4 900 km ²	
	Affluents	OuedMina, Oued Haddad, Oued El-Abd	
	Précipitation moyenne annuelle	313 mm (Coyneet Bellier)	
	Apport moyen annuel	148,50 Hm ³ /an	
Retenue du barrage	Capacité initiale	235Hm ³ .	
	Volume régularisable	80 Hm ³	
	Crue de projet	6200 m ³ /s	
	Premier levé bathymétrique (1986)	volume de vase : 9,42 hm ³ reste 225,580 Hm ³	
	Deuxièmelevé bathymétrique (2003)	volume de vase : 81,291 hm ³ reste 153,710 Hm ³	
Caractéristiques techniques			
Digue du barrage	Type	Homogène en terre argileuse	
	Volume des matériaux 5000000 m ³	Colluvions	: 2100.000 m ³
		Silt argileux	: 900 m ³
		Alluvions et marno-greux	: 1000.000 m ³
		Filtres et drains	: 1000.000 m ³
	Longueur de la digue	890 m	
	Hauteur de la digue	65 m	
	Largeur de la digue a la base	200 m	
	Largeur de la digue en crête	10 m	
	Côte retenue normale (R.N)	180,00 m	
Côte plus hautes eaux (P.H.E)	186,50 m		
Côte en crête	189,70 m		
Côte vidange de fond rive droite	126,71 m		

	Côte vidange de fond rive gauche	134,03 m
Organes d'exploitation	Evacuateur de crues en rive gauche	Type puits en forme de tronc de cône, $\varnothing = 60$ m, débit 4400 m ³ /s
	Prise d'eau	11 m ³ /s, \varnothing 2000mm
	Vidange de fond	Vidange rive droite : 105 m ³ /s
		Vidange rive gauche : 250 m ³ /s
		Orifice de dévasement : (2,1 m ³ /s) \times 4
	Jet creux	\varnothing 1100mm = 18 m ³ /s
	Deux conduites pour l'irrigation	\varnothing 1000mm =11m ³ /s pour les deux conduites
	Galerie de dérivation provisoire rive droite	\varnothing 3,50 m, L=640 m.
	Galerie de contrôle et de service	Accès rive droite, injection et drainage= \varnothing 3m et 3,5 m, longueur 940m dont 203m dans les remblais
Dévasement	Chasse d'eau par vidange de fond	
Caractéristiques économiques		
Destination	Alimentation en eau potable	Villes de Relizane et Sidi M'hamedBen Aouda Dotation annuelle en 2010 : 5,512Hm ³
	Irrigation	Périmètre de la Mina surface
		Dotation annuelle en 2010 = 5,0Hm ³
Construction	Début des travaux / mise en eau	1973 / 1978
	Bureau d'étude	Coyne et Bellier (France)
	Entreprise de Réalisation	GROUPEMENT SONAGHTER(Allemagne)
	Coût de réalisation	370.000.000,00 DA

Source : (Coyne et Bellier, 1980; Bilan annuel du barrage S.M.B.A, 1978/2011)

I.4. Conclusion

Le bassin versant de l'oued Minaau droit du barrage S.M.B.A, occupe une superficie de 4900Km² et un périmètre de 343,3Km dont la grande majorité fait partie de la wilaya de Tiaret, le calcul du coefficient de Gravelius donne une valeur ($k=1,37$) ce qui montre une forme allongée pour un temps de concentration des eaux à l'exutoire relativement long (25,83 heures).

L'étude hypsométrique montre une altitude maximale de 1306,9 m et une altitude minimale de 139,7m. Cette tranche d'altitude est marquée par un relief fort selon la classification de l'O.R.S.T.O.M.

L'étude des données climatiques de la station de Matemore montre une zone d'étude caractérisée par un climat semi-aride avec une précipitation moyenne de 325,3 mm.

Le barrage S.M.B.A conçu par le bureau d'étude d'ingénieurs Coyne et Bellier (France) a été réalisé en 1978 par l'entreprise allemande « Groupement Sonaghter » pour l'alimentation en eau potable des villes de Relizane et Sidi M'hamed Ben Aouda ainsi que pour l'irrigation du périmètre de la mina, il renferme un volume total de 235Hm³. Son système de dévasement repose sur l'évacuation des sédiments par les organes de vidange (vidange rive gauche, vidange rive droite et vannettes de dévasement).

Chapitre II

Etude du régime pluviométrique

II.1. Introduction

L'analyse et la compréhension des changements climatiques et hydrologiques à l'échelle régionale passe inévitablement par la collecte et le traitement des données géographiques relatifs aux divers aspects: climatique, hydrologique,...etc. Dans cette étude, un soin particulier a été consacré à l'exploitation d'une série de données se rapportant à la pluviométrie à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle ainsi que la détection des ruptures des précipitations au fil des années.

II.2. Collecte et mise en forme des données

Dans un premier temps nous avons collecté le maximum d'informations au niveau de la Direction Générale de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H, Alger). L'A.N.R.H locale (Relizane) qui gère la plaine de la mina présente des déficiences au niveau du système de bases de données rendant ainsi l'information impossible. Pour de plus amples informations nous nous sommes rendus à la Direction Régionale de l'A.N.R.H (Oran). Les données collectées comportent toutes des désavantages à notre étude, à l'exception de quelques stations, parmi les insuffisances constatées au niveau de quelques stations nous citons :

- D'énormes lacunes mensuelles au fil des années;
- Des stations en arrêt;
- Des valeurs douteuses (non fiables, supérieures à la normale...).

II.2.1. Choix des stations

Le bassin versant de l'oued Mina comporte 22 postes pluviométriques, notre choix a été arrêté en fonction des paramètres ci-après désignés :

- L'accès aisé aux données nécessaires au niveau des services de l'A.N.R.H;
- La station qui comporte le moins de lacunes;
- La station jugée fiable par les services de l'A.N.R.H;
- Au moins une station qui représente chaque sous-bassin.

Le tableau (II.1) présente les différentes coordonnées des postes pluviométriques choisis dans la zone d'étude. La figure (II.1) illustre la situation des stations dans le bassin versant.

Tableau II.1 : Stations pluviométriques choisies du bassin versant de l’oued Mina.

N°	Station	Sous bassin	Code de la station	Wilaya	X(Km)	Y(Km)	Z(m)
S1	Mahoudia	Oued Taht	013005	Tiaret	333,00	212,85	670
S2	Sidi Bakhti	Oued Mina	013103	Tiaret	343,40	217,90	925
S3	Rosfa	Oued El-Abd	013202	Tiaret	330,60	179,50	960
S4	Takhemaret	Oued El-Abd	013304	Tiaret	316,40	203,10	655
S5	Sidi AEK Djilali	Oued Haddad	013401	Mascara	309,00	244,50	225

X(Km) : Longitude; **Y(Km)** : Latitude; **Z(m)** : Altitude.

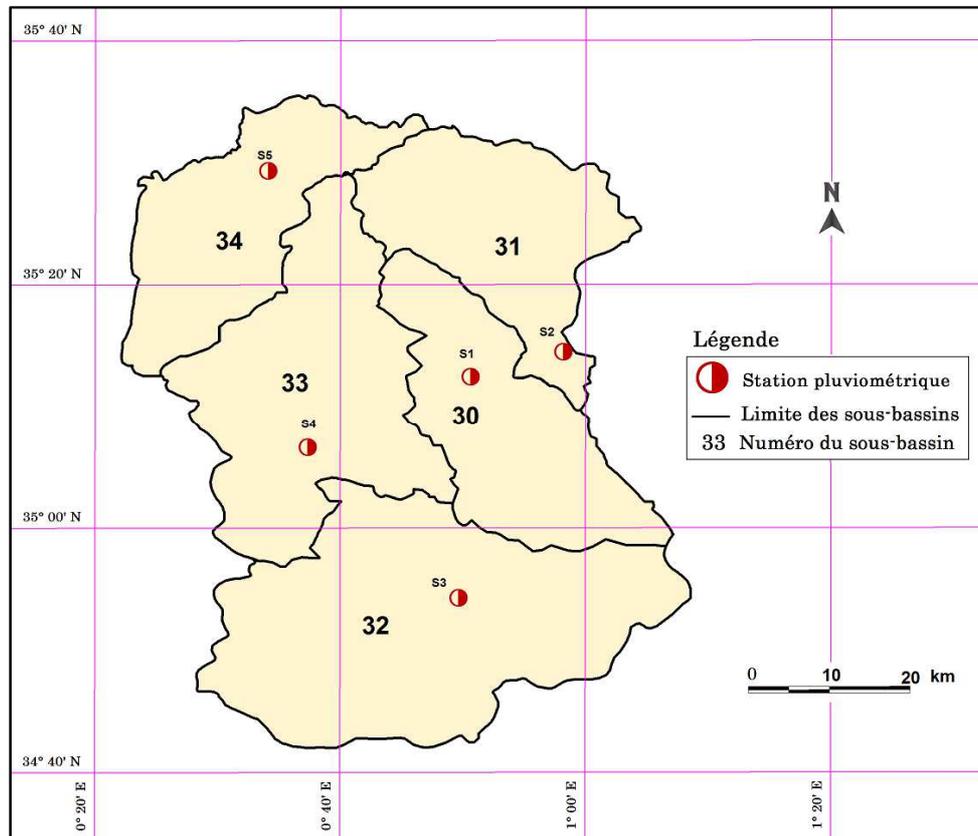


Figure II.1 : Situation des stations pluviométriques choisies dans le bassin versant de l’oued Mina.

II.2.3. Période d’étude

Après la collecte des données nous avons comparé les séries de précipitations entre-elles afin d’estimer l’année à partir de laquelle nous disposons suffisamment d’informations. Cette analyse nous a permis de nous référer à la date de la mise en eau du barrage (1978) comme point de départ jusqu’à l’année (2009), date limite autorisée par l’A.N.R.H.

II.2.4. Lacunes dans les séries pluviométriques

Il est important de signaler que les séries des données des pluies mensuelles sont souvent incomplètes. Le manque de d'information dans une station peut être dû à une panne de l'appareil, ou à l'absence de l'observateur ou à l'arrêt de la station...

Dans des cas simples, on peut procéder par le comblement d'une lacune de pluie journalière par :

- Le remplacement de la pluie manquante par celle observée à la station la plus proche. Il faut vérifier la position en altitude des deux stations.
- L'estimation de la pluie manquante par la moyenne des pluies des stations voisines. Cette méthode est fiable lorsque les précipitations ne sont pas très irrégulières d'un poste à l'autre. Un seuil de tolérance de 10% est acceptable.
- D'autres méthodes plus élaborées sont utilisées dont la méthode est basée sur la régression linéaire entre deux stations voisines ayant la même altitude.

Dans le cas présent nous optons pour le comblement des lacunes par la régression linéaire.

II.3. Régression linéaire

L'origine du mot régression vient de Sir Francis Galton. En 1885, travaillant sur l'hérédité, il a tenté d'expliquer la taille des enfants en fonction de celle du père.

Un modèle de régression linéaire simple est défini par l'équation (II.1).

$$y_i = \beta_1 x_i + \beta_2 \quad (\text{II.1})$$

avec :

y_i : Variable dépendante (la variable à étudier);

β_1 : Coefficient de régression;

x_i : Variable indépendante;

β_2 : Ordonnée à l'origine.

Dans notre cas nous avons entamé la régression linéaire simple avec le logiciel « **Statistica 6.1** » pour le comblement des lacunes des séries pluviométriques dont les résultats obtenus figurent dans le tableau (II.2).

Tableau II.2 : Synthèse des différents paramètres de la régression linéaire à l'échelle mensuelle entre les stations pluviométriques.

Caractéristiques des stations						Période		Propriétés statistiques						Equation de régression
Var dép.	Code	Var inde.	Code	L (Km)	ΔZ (m)	Année	Mois	N	R ²	R ² ajusté	P	B ₁	B ₂	
Rosfa	013202	Ain kermes	013201	23	158	1978	Mai	31	0,43	0,41	0	0,43	0	(013202) = 0,43(013201)
						1983	Déc	30	0,19	0,16	0,01	0,20	0	(013202) = 0,22(013201)
						1989	Nov	30	0,39	0,37	0	0,37	0	(013202) = 0,37(013201)
						1990	Mar	31	0,55	0,53	0	0,55	0	(013202) = 0,55(013201)
							Avr	31	0,54	0,53	0	0,51	0	(013202) = 0,51(013201)
						1994	Fév	31	0,69	0,68	0	0,70	0	(013202) = 0,70(013201)
							Mar	31	0,55	0,53	0	0,55	0	(013202) = 0,55(013201)
							Avr	31	0,54	0,53	0	0,51	0	(013202) = 0,51(013201)
						1999	Mai	31	0,43	0,41	0	0,43	0	(013202) = 0,43(013201)
							Jui	31	0,64	0,63	0	0,54	0	(013202) = 0,54(013201)
						2001	Juill	31	0,46	0,44	0	0,66	0	(013202) = 0,66(013201)
						2003	Fév	31	0,69	0,68	0	0,70	0	(013202) = 0,70(013201)
						2004	Sept	31	0,77	0,76	0	0,65	0	(013202) = 0,65(013201)
						2008	Nov	30	0,39	0,37	0	0,37	0	(013202) = 0,37(013201)
						1989	Nov	30	0,39	0,37	0	0,37	0	(013202) = 0,37(013201)
						1990	Mar	31	0,55	0,53	0	0,55	0	(013202) = 0,55(013201)
							Avr	31	0,54	0,53	0	0,51	0	(013202) = 0,51(013201)
						1994	Fév	31	0,69	0,68	0	0,70	0	(013202) = 0,70(013201)
							Mar	31	0,55	0,53	0	0,55	0	(013202) = 0,55(013201)
							Avr	31	0,54	0,53	0	0,51	0	(013202) = 0,51(013201)
1999	Mai	31	0,43	0,41	0	0,43	0	(013202) = 0,43(013201)						
	Jui	31	0,64	0,63	0	0,54	0	(013202) = 0,54(013201)						
2001	Juill	31	0,46	0,44	0	0,66	0	(013202) = 0,66(013201)						
2003	Fév	31	0,69	0,68	0	0,70	0	(013202) = 0,70(013201)						
2004	Sept	31	0,77	0,76	0	0,65	0	(013202) = 0,65(013201)						
2008	Nov	30	0,39	0,37	0	0,37	0	(013202) = 0,37(013201)						

Tableau II.2 : Synthèse des différents paramètres de la régression linéaire à l'échelle mensuelle entre les stations pluviométriques (suite).

Caractéristiques des stations						Période		Propriétés Statistiques						Equation de régression
Var dép.	Code	Var inde.	Code	L (Km)	ΔZ (m)	Année	Mois	N	R ²	R ² ajusté	P	B ₁	B ₂	
Mahoudia	013005	Kef Mahboula	013001	11	195	1996	Sept	27	0,76	0,75	0	0,71	0	(013005) = 0,71(013001)
		Sidi Bakhti	013103	11	255		Oct	33	0,20	0,18	0	0,21	14,6	(013005) = 0,22(013101)+14,6
							Nov	33	0,52	0,51	0	0,37	9,44	(013005) = 0,37(013101)+9,44
							Déc	31	0,14	0,11	0,03	0,3	0	(013005) = 0,30(013101)
		Kef Mahboula	013001	11	195	2000	Sept	27	0,76	0,75	0	0,71	0	(013005) = 0,71(013001)
		Sidi Bakhti	013103	11	255		Oct	33	0,20	0,18	0	0,21	14,6	(013005) = 0,22(013101)+14,6
							Nov	33	0,52	0,51	0	0,37	9,44	(013005) = 0,37(013101)+9,44
							Déc	31	0,14	0,11	0,03	0,3	0	(013005) = 0,30(013101)
							Jan	34	0,47	0,45	0	0,35	0	(013005) = 0,35(013101)
							Fév	34	0,57	0,55	0	0,40	0	(013005) = 0,40(013101)
							Mar	34	0,83	0,83	0	0,68	0	(013005) = 0,68(013101)
							Avr	34	0,66	0,65	0	0,43	0	(013005) = 0,43(013101)
							Mai	34	0,41	0,39	0	0,39	0	(013005) = 0,39(013101)
							Jui	30	0,16	0,13	0,02	0,30	0	(013005)=0,30(013101)
							Juil	30	0,33	0,31	0	0,37	0	(013005) = 0,37(013101)
							Aou	30	0,49	0,47	0	0,37	0	(013005) = 0,37(013101)

Var dép : Station à combler;

Var inde : Station de base ou de référence;

L : Distance entre les deux stations en (km);

ΔZ : Dénivelée entre les deux stations en (m);

N : Nombre d'observations;**B₁** : Coefficient de régression;

R² : Coefficient de détermination multiple;**B₂** : Ordonnée à l'origine;

R² ajusté : Coefficient de détermination multiple ajusté;**P₁** : Seuil de signification.

II.4. Erreurs commises dans les séries pluviométriques

Les séries climatologiques des données brutes sont rarement utilisables directement. Elles peuvent en effet être affectées par des ruptures artificielles causées par de nombreux facteurs (Mestre, 2000).

- Changement d'emplacement du site de mesure;
- Changement de capteur, d'abri météorologique;
- Modification de l'environnement du capteur (végétation, urbanisation...);
- Changement du mode de calcul du paramètre;
- Observateurs différents.

Cette liste n'est pas exhaustive mais résume cependant les principaux facteurs qui affectent l'homogénéité des séries climatologiques.

Le tableau (II.4) donne une estimation de l'influence que peuvent avoir divers changements sur les séries de mesures de différents paramètres (Heino, 1996). Mestre (2000) précise que le changement de l'emplacement entraîne le plus grand nombre de ruptures détectables, d'autant plus qu'il s'accompagne généralement d'un changement d'instrumentation, d'observateur, d'environnement...etc. Le tableau (II.3) illustre ces différents facteurs.

Tableau II.3 : Estimation de l'influence des principaux changements sur l'homogénéité des mesures de divers paramètres météorologiques (Heino, 1996).

Changements	TM	TN, TX	Précipitations	PP	HU	dd	ff	ww
Instrumentation	-	+	+	-	++	-	++	-
Hauteur instrument	+	+	+	+++	+	+	++	-
Exposition	+	++	+++	-	+	++	++	-
Heurs observations	+	+	-	-	+	-	+	+
Méthode de calcul	++	-	-	-	+	-	+	-
Emplacements	++	+++	+++	-	+	++	+++	+
Environnement	+	+	+	-	+	+	++	+
Observateurs	-	-	-	-	+	-	+	+++

TM : Température moyenne; **TN, TX :** Température minimale;

PP : Pression; **HU :** Humidité; **ww :** Temps sensible;

dd et ff: Direction et force du vent.

Les annotations sont les suivantes: (-) « pas de problèmes majeurs », (+) « quelques inhomogénéités », (++) « ruptures importantes » et (+++) « ruptures très importantes » (Heino 1996).

II.4.1. Détection des erreurs systématiques et correction des données

II.4.1.1. Méthode des doubles masses

Cette méthode permet de déceler graphiquement l'hétérogénéité de la série à étudier, elle consiste à :

- Sélectionner comme station de base une ou plusieurs stations dont les observations sont fiables;
- Faire les cumuls des données (annuelles, mensuelles, saisonniers) (Touaïbia, 2004);
- comparer les totaux cumulés relevés aux postes pluviométriques à ceux d'un poste de référence ayant fonctionné sur une période longue et continue dont la série est homogène (Mébarki, 1984);
- Corriger les données observées en multipliant le rapport de pente $\frac{m_1}{m_2}$ ou $\frac{m_2}{m_1}$ par la valeur erronée respectivement selon que l'on soit après la cassure ou avant la cassure (figure II.2) (Touaïbia, 2004).

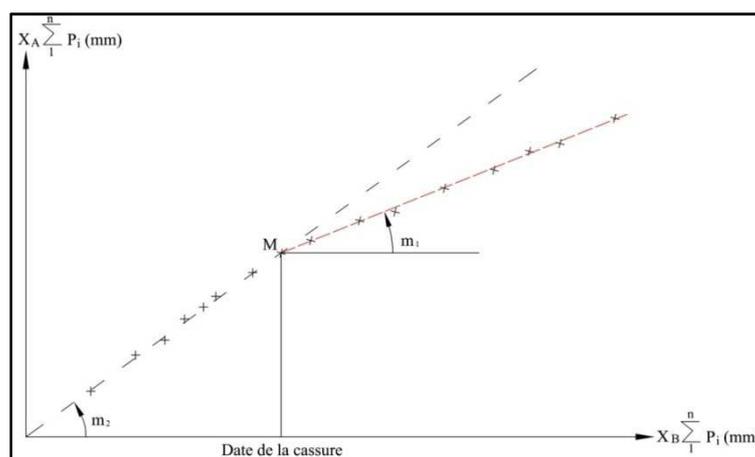


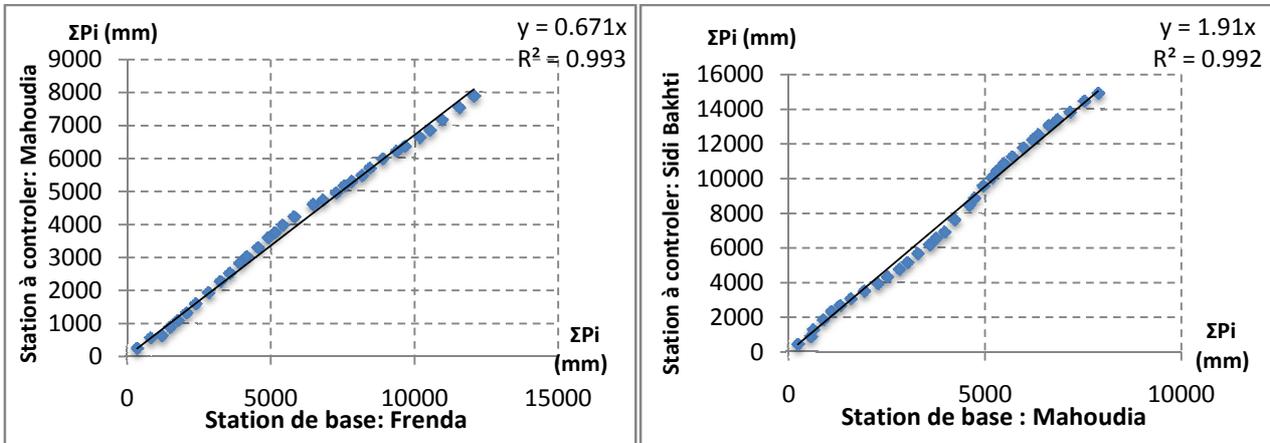
Figure II.2 : Méthode des doubles masses.

Dans notre étude, les stations de Frenda, Mahoudia, Ain Kermes et Sidi A.E.K Djilali prises comme référencerépondent aux critères de choix comme stations de base. Elles présententpeude lacunes pendant toute la période d'étude et les valeurs des précipitations paraissent vraisemblables. Pour l'analyse graphique de la liaison entre les totaux cumulés nous avons utilisé le programme Excel.

Sur l'axe des abscisses nous reportons les stations de référence et sur celui des ordonnées les stations à vérifier.

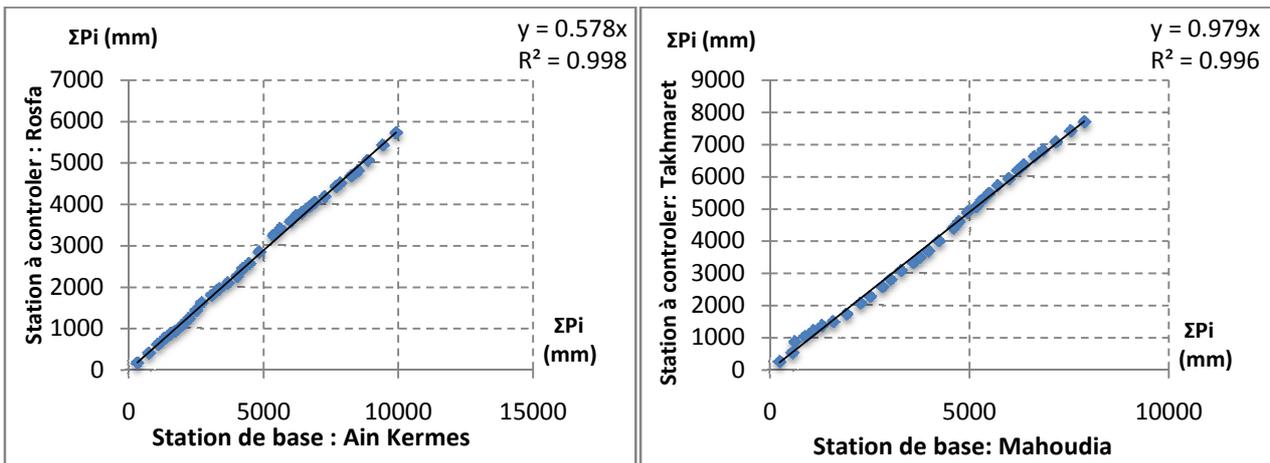
On constate alors que les points sont distribués d'une façon linéaire pour l'ensemble des stations contrôlées.

On peut déduire que les stations citées ci-dessus présentent un caractère d'homogénéité avec un coefficient de corrélation $R^2=1$. Ainsi nous pouvons conclure à la fiabilité des résultats obtenus (figure II.3 (a), (b), (c), (d) et(e)).

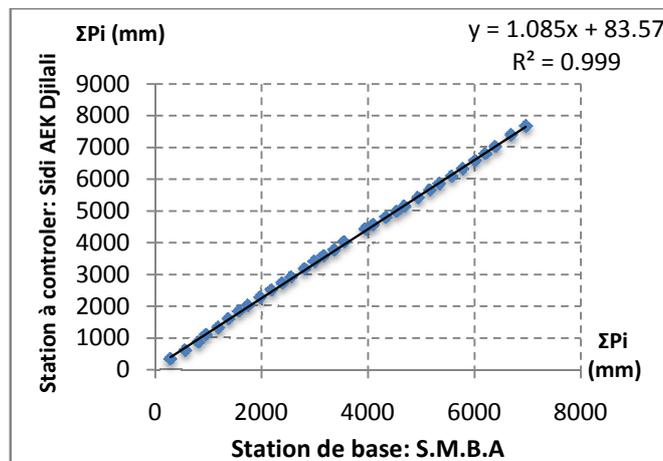


a): Station de Mahoudia (1978/79 – 2009/10).

b): Station de Sidi Bakhti (1978/79 – 2009/10).



c): Station de Rosfa(1978/79 - 2009/10).d): Station de Takhmaret(1978/79 - 2009/10).



e): Station de Sidi AEK Djilali (1978/79 - 2009/10).

Figure II.3 : Corrélation des données pluviométriques (1978/79 - 2009/10).

II.5. Etude du régime pluviométrique

II.5.1. Distribution mensuelle des précipitations

D’après les moyennes mensuelles des précipitations des cinq stations choisies, on remarque un maximum enregistré au mois de février avec 64,3 mm à la station de Sidi Bakhti. Le mois de Juin connaît un minimum de 2,8 mm à la station de Sidi AEK Djilali (tableau II.4 et figure II.4). Les valeurs de la station de Sidi Bakhti dépassent largement celles enregistrées au niveau des autres stations, ceci dépend de son altitude qui s’élève à 925m.

Tableau II.4 : Précipitations moyennes mensuelles des stations choisies (1978/79 - 2009/10).

Station \ Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Mahoudia	13,2	25,6	27,9	27,8	30,6	31,2	31,9	24,8	21,0	4,0	3,7	4,6
Sidi Bakhti	28,4	40,5	53,6	61,5	62,6	64,3	47,8	47,6	37,1	8,5	5,7	8,5
Rosfa	18,5	23,0	18,4	15,9	29,7	24,0	24,1	21,4	19,2	9,2	6,5	8,3
Takhmaret	20,0	27,6	22,8	22,2	25,3	28,5	29,8	25,4	20,9	6,8	6,3	6,8
Sidi AEK Djilali	13,0	24,1	33,0	25,4	24,5	31,8	29,5	26,7	18,4	2,8	3,1	3,0

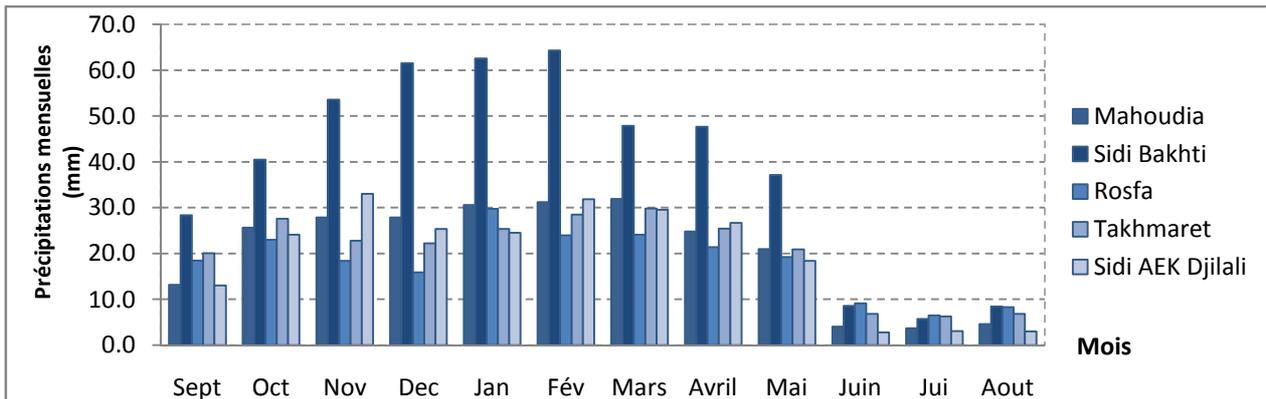


Figure II.4 : Pluies mensuelles des stations du bassin versant de l’oued Mina (1978/2008).

II.5.1.1. Paramètres statistiques des stations retenues

a/Moyenne

La moyenne arithmétique (\bar{x}) est égale à la somme des valeurs prises par la série divisée par le nombre de valeurs observées (formule II.2).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \text{ (II.2)}$$

avec :

\bar{x} : Moyenne de la série pluviométrique considérée (mm);

x_i : Précipitation observée (mm);

N : Taille de la série (nombre d’années observées).

b/ Ecart-type

L'écart type (σ) est un moyen statistique souvent utilisé, il précise la dispersion de la série autour de sa moyenne et traduit les fluctuations de la série (formule II.3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad \text{(II.3)}$$

avec :

σ : Ecart type de la série de précipitation étudiée;

x_i : Précipitation observée (mm);

\bar{x} : Moyenne de la série pluviométrique considérée (mm);

N : Taille de la série.

c/ Coefficient de variation

Le phénomène de variabilité interannuelle des modules pluviométriques bien exprimé par le coefficient de variation (C_v) traduit la dispersion relative des pluies (formule II.4).

$$C_v = \frac{\delta}{\bar{x}} \quad \text{(II.4)}$$

C_v : Coefficient de variation de la série pluviométrique étudiée;

δ : Ecart type de la série de précipitations;

\bar{x} : Moyenne de la série pluviométrique considérée.

Les valeurs des paramètres statistiques à l'échelle mensuelle sont illustrées dans le tableau (II.5).

Tableau II.5 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques mensuelles (1978/79 -2009/10).

Stations	Paramètres	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Mahoudia	Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Max	71,0	79,7	74,9	75,0	84,0	109,8	119,7	69,7	67,0	20,0	50,8	32,0
	Moy	13,2	25,6	27,9	27,8	30,6	31,2	31,9	24,8	21,0	4,0	3,7	4,6
	σ	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2	16,2
	CV (%)	123,2	81,0	69,6	70,7	75,9	91,5	93,2	82,7	93,8	161,8	261,6	153,9
Sidi Bakhti	Min	0,0	0,0	0,0	15,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Max	182,8	166,5	202,4	162,3	178,2	279,6	157,2	135,1	94,4	68,6	53,5	53,2
	Moy	28,4	40,5	53,6	61,5	62,6	64,3	47,8	47,6	37,1	8,5	5,7	8,5
	σ	36,0	41,1	41,9	30,8	44,5	55,1	40,0	39,0	31,4	14,1	13,9	13,3
	CV (%)	126,9	101,5	78,3	50,1	71,1	85,7	83,6	81,9	84,6	164,9	242,6	156,8
Rosfa	Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Max	91,8	101,5	36,1	41,5	67,5	75,0	59,2	68,5	49,0	53,0	29,5	41,9
	Moy	18,5	23,0	18,4	15,9	29,7	24,0	24,1	21,4	19,2	9,2	6,5	8,3
	σ	21,7	24,1	9,8	9,7	19,4	18,8	17,9	17,7	14,4	10,5	8,1	9,3
	CV (%)	117,8	104,8	53,1	61,2	65,2	78,3	74,4	82,8	74,9	114,6	124,8	112,7

Tableau II.5 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques mensuelles (1978/79 - 2009/10).
(suite).

Stations	Paramètres	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Takhmaret	Min	0,0	0,5	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Max	92,5	70,1	61,5	79,4	64,8	85,4	128,4	53,1	72,8	30,8	66,9	63,3
	Moy	20,0	27,6	22,8	22,2	25,3	28,5	29,8	25,4	20,9	6,8	6,3	6,8
	σ	19,7	19,3	15,3	17,8	17,0	23,5	30,5	16,0	21,7	8,6	16,4	13,7
	CV (%)	98,1	70,0	67,3	80,2	67,0	83,2	103,7	65,4	104,7	132,1	262,8	208,0
Sidi AEK Djilali	Min	0,0	0,0	3,0	5,7	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Max	44,8	74,6	79,9	79,1	76,2	107,4	104,7	70,3	68,3	13,5	40,8	22,2
	Moy	13,0	24,1	33,0	25,4	24,5	31,8	29,5	26,7	18,4	2,8	3,1	3,0
	σ	9,6	19,5	19,0	17,6	19,0	26,7	27,9	19,0	17,7	3,9	9,5	5,8
	CV (%)	73,5	80,9	57,6	69,4	77,5	84,0	94,6	71,0	96,4	143,4	310,4	191,7

Les valeurs extrêmes influencent l'écart-type et le coefficient de variation qui augmente dans le sens inverse de la moyenne. Les grandes valeurs du coefficient sont observées en saison estivale dans la quasi-totalité des stations avec une valeur extrême de 310,4 % à Sidi AEK Djilali au mois de juillet. Aux niveaux des stations de Mahoudia, Takhmaret, Sidi Bakhti et Rosfales valeurs extrêmes sont observées aussi au mois de juillet respectivement 261,6 ; 262,8 ; 242,6 et 124,8 %. Cette forte variabilité pendant les mois secs, peut s'expliquer par la rareté des précipitations estivales et leurs caractères orageux. Les minimas du coefficient de variation sont enregistrés pendant les mois pluvieux avec une valeur minimale de 50,1 % au niveau de la station de Sidi Bakhti au mois de décembre.

II.5.2. Distribution saisonnière des précipitations

Afin de détecter la baisse ou la hausse des précipitations qui reste tributaire seulement à une saison ou à plusieurs saisons, l'étude du régime saisonnier est indispensable. Pour la détermination du régime saisonnier dominant dans la région d'étude, on calcule le cumul des précipitations mensuelles de chaque saison (tableau II.6 et figure II.5), ensuite on procède à un classement de ces quatre saisons par ordre décroissant de la pluviométrie. Les quatre initiales des saisons ainsi classées forment ce qu'on appelle "Indicatif saisonnier" (tableau II.7) et le régime qui présente le pourcentage le plus élevé est considéré comme dominant de la région.

Tableau II.6 : Précipitations moyennes saisonnières des stations choisies (1978/79 - 2009/10).

Station \ Saison	Mahoudia	Sidi Bakhti	Rosfa	Takhmaret	Sidi AEK Djilali
Automne (mm)	66,7	122,5	59,9	70,4	70,1
Hiver (mm)	89,6	188,4	69,6	76,0	81,7
Printemps (mm)	77,7	132,5	64,7	76,1	74,6
Été (mm)	12,3	22,7	24,0	19,9	8,9

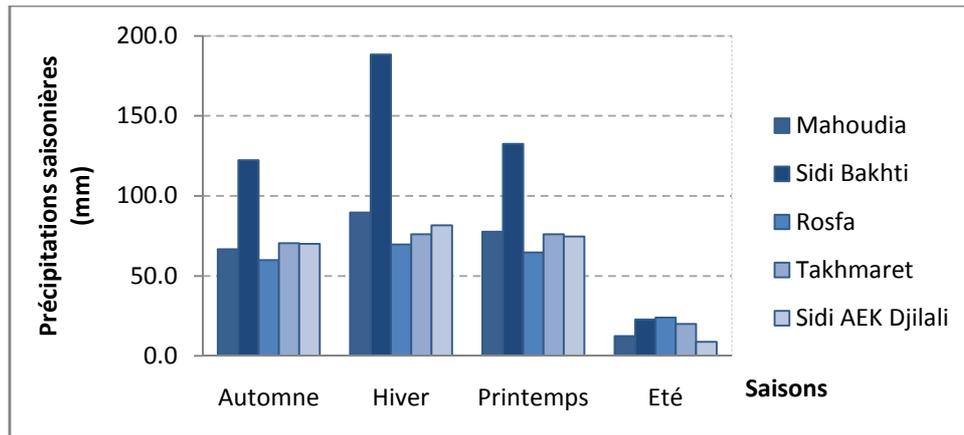


Figure II.5 :Pluies saisonnières des stations du bassin versant de l’oued Mina (1978/79 - 2009/10).

En analysant le tableau (II.7) et la figure (II.5), il apparaît que les saisons pluvieuses dans la zone d’étude se situent en hiver, au printemps et à l’automne. En revanche, l’Eté est caractérisé par un déficit d’eau étant donné la rareté des précipitations pendant ces trois mois de l’année.

Tableau II.7 : Pourcentage des régimes saisonniers des stations retenues (1978/79 - 2009/10).

Station	Distribution saisonnière (%)									
	HPAE	PHAE	AHPE	PAHE	APHE	HAEP	HAPE	PAEH	PEHA	
Mahoudia	25,0	18,8	12,5	12,5	9,4	6,3	6,3	3,1	3,1	
	APEH	/								
	3,1									
Sidi Bakhti	HPAE	AHPE	PHAE	APHE	HAEP	HAPE	HPEA	PHEA	PAHE	
	46,9	12,5	9,4	6,3	6,3	6,3	6,3	3,1	3,1	
Rosfa	HPAE	APHE	PHAE	HAPE	APHE	HPEA	PAHE	HAPE	EPAH	
	21,9	15,6	12,5	9,4	6,3	6,3	6,3	3,1	3,1	
	HAEP	PHEA	EPHA	PEHA	AHPE	/				
3,1	3,1	3,1	3,1	3,1						
Takhmaret	AHPE	HAPE	PAHE	HPAE	PHAE	APHE	PHEA	HPEA	PEHA	
	25,0	12,5	12,5	12,5	12,5	6,3	6,3	3,1	3,1	
	APHE	PEAH	/							
3,125	3,125									
Sidi AEK Djilali	HPAE	APHE	AHPE	PHAE	PAHE	HAPE	HPAE	PHAE	HAEP	
	28,1	12,5	9,4	9,4	9,4	6,3	6,3	6,3	3,1	
	PHEA	PAHE	AHPE	/						
3,1	3,1	3,1								

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

Après avoir identifié le régime pluviométrique qui règne dans la région, pour chaque année sur la période étudiée, on peut dire que le régime saisonnier le plus dominant dans le bassin versant étudié est de type HPAE.

Les paramètres statistiques de chaque station choisie sont illustrés dans le tableau (II.8).

Tableau II.8 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques saisonnières (1978/79 - 2009/10).

Station	Par.	Aut. (mm)	Hiv. (mm)	Pri. (mm)	Eté (mm)	Station	Par.	Aut. (mm)	Hiv. (mm)	Pri. (mm)	Eté (mm)
Mahoudia	Min.	0,0	0,0	13,4	0,0	Takhmaret	Min.	7,9	27,0	19,3	0,0
	Max.	153,6	193,7	154,4	66,5		Max.	149,3	194,3	164,2	75,1
	Moy.	66,6	89,6	77,7	12,3		Moy.	70,4	75,8	74,7	19,3
	σ	35,6	51,0	37,3	15,4		σ	39,3	36,9	39,6	22,0
	CV (%)	53,5	57,0	48,1	125,0		CV (%)	55,8	48,7	53,0	114,0
Sidi Bakhti	Min.	27,5	56,5	15,6	0,0	Sidi AEK Djlali	Min.	7,4	27,0	17,6	0,0
	Max.	390,3	455,9	247,5	92,0		Max.	131,5	159,7	161,1	42,3
	Moy.	122,4	188,3	132,6	22,7		Moy.	71,1	83,4	75,5	9,3
	σ	85,2	78,7	55,3	25,3		σ	34,1	37,7	32,9	11,0
	CV (%)	69,6	41,8	41,7	111,2		CV (%)	47,9	45,2	43,5	118,3
Rosfa	Min.	0,4	9,5	9,7	0,0						
	Max.	151,3	169,5	130,5	61,3						
	Moy.	49,8	59,6	54,9	14,3						
	σ	39,2	34,8	29,3	17,2						
	CV (%)	78,6	58,5	53,4	120,3						

Par : Paramètre statistique;

Aut : Automne; **Hiv** : Hiver; **Pri** : Printemps.

En analysant le tableau des coefficients de variation pour chaque saison des 5 stations étudiées on remarque que :

- Toutes les stations présentent de fortes variations avec une valeur maximale est de 125 % au niveau de la station de Mahoudia. Cette variation est observée en Eté. Ces résultats sont en conformité avec les conclusions faites auparavant à l'échelle mensuelle.
- La valeur minimale est observée au printemps avec 41,7 % au niveau de la station de Sidi Bakhti.

II.5.3. Distribution annuelle des précipitations

Le Nord-Ouest Algérien est soumis à des variations pluviométriques spatio-temporelles très irrégulières (Meddi, 2007), sous l'influence conjuguée de la mer, du relief, du sol et de la latitude, des zones climatologiques se succèdent à partir du littoral et se caractérisent par leurs faibles largeurs. L'irrégularité des précipitations constitue une donnée fondamentale du climat de l'Algérie (Seltzer, 1946).

La connaissance des précipitations moyennes annuelles demeure nécessaire pour l'étude du régime annuel. La variabilité des pluies sur de longues périodes d'observation, doit être précisée par des moyens statistiques (tableau II.9).

Tableau II.9 : Paramètres statistiques des précipitations annuelles, des stations retenues (1978/79 - 2009/10).

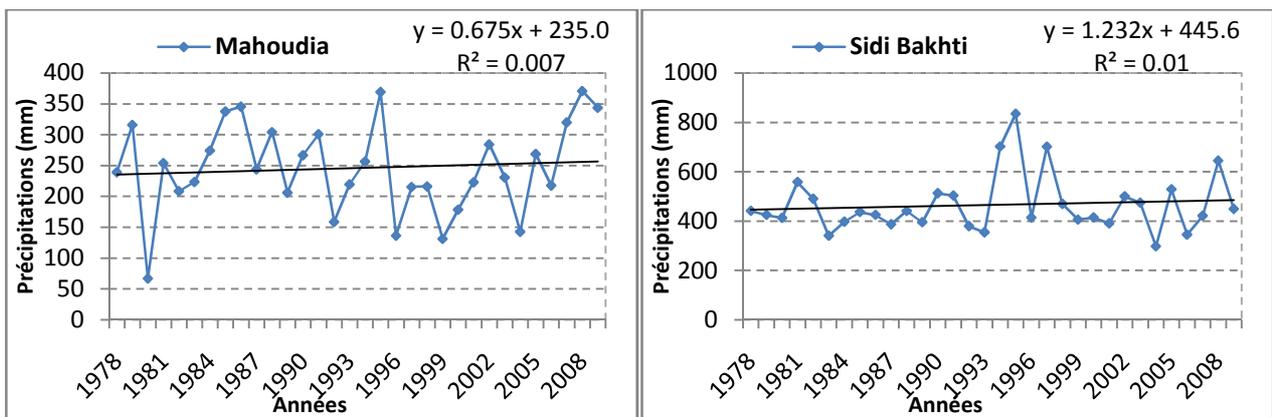
Stations	Minimum	Maximum	Moyenne	σ	CV (%)
Mahoudia	67,4	371,0	246,3	73,3	29,8
Sidi Bakhti	298,4	835,0	466,1	115,8	24,8
Rosfa	65,0	397,9	218,2	76,5	35,1
Takhmaret	120,5	401,0	242,4	64,8	26,7
Sidi AEK Djilali	135,6	405,0	235,3	55,6	23,6

Après avoir calculé les paramètres statistiques des pluies annuelles des stations choisies, on déduit que pour l'ensemble des stations retenues, le coefficient de variation annuel oscille entre 23,6 % et 35,1%. Les valeurs les plus faibles sont observées au niveau des stations de Sidi AEK Djilali et la station de Sidi Bakhti. La valeur la plus élevée est observée à la station de Rosfa. Cette étude statistique montre que :

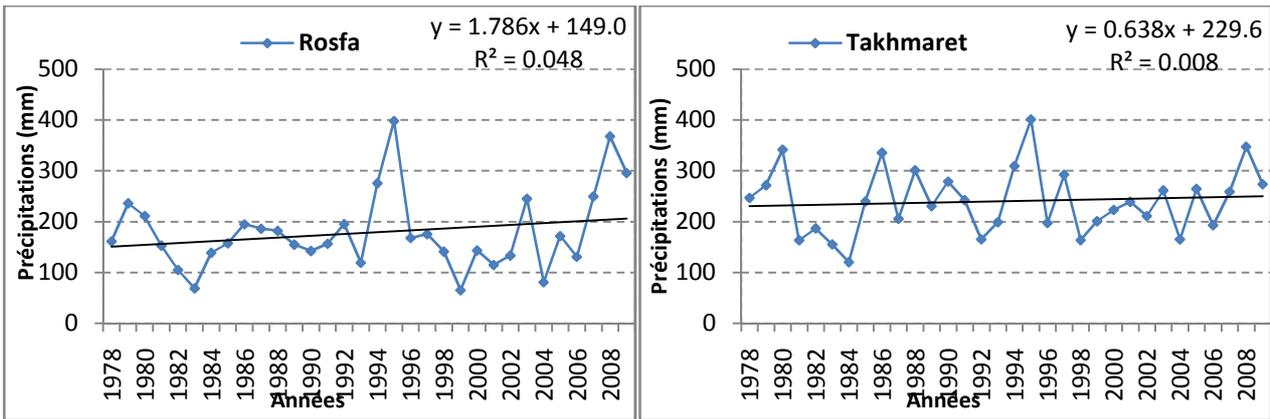
- Le coefficient de variation des pluies annuelles augmente progressivement du Nord vers le Sud de la zone d'étude.
- Le coefficient de variation est inversement proportionnel à l'échelle étudiée car la variation des précipitations annuelles est inférieure à celle des variations mensuelles.

II.5.3.1. Variation de la pluviométrie annuelle

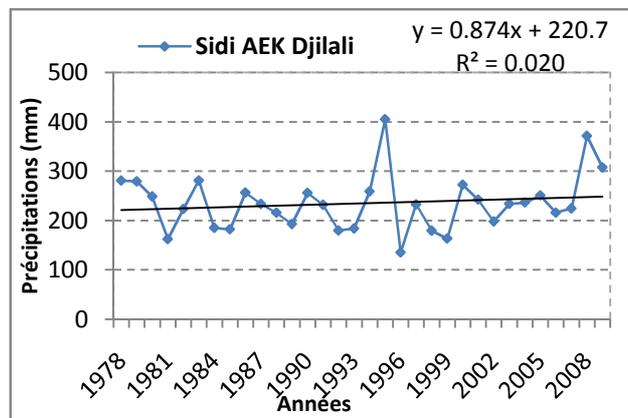
Afin d'évaluer la variabilité interannuelle des stations choisies, on procède à l'analyse des courbes de tendances (figure II.6, (a), (b), (c), (d) et (e)). Les graphes montrent une variation interannuelle très élevée avec une tendance à la hausse illustrée par les pentes positives des courbes de tendance.



a) Station de Mahoudia b) Station de Sidi Bakhti



c) Station de Rosfa d) Station de Takhmaret



e) Station de Sidi AEK Djilali.

Figure II.6 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance pour les stations choisies dans le bassin versant de l'oued Mina (1978/79 - 2009/10).

D'après la figure ci-dessus nous remarquons que les hauteurs maximales des précipitations atteignent 835 mm au niveau de la station de Sidi Bakhti au cours de l'année (1995/1996), tandis que la hauteur minimale est de l'ordre de 65 mm a été enregistrée à la station de Rosfa en (1999/2000).

II.6. Estimation de la pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant

Pour l'estimation de la pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant, 18 stations pluviométriques ont fait l'objet d'une étude sur la période s'étalant de 1978 à 2009. Les différentes coordonnées des stations sont définies dans le tableau (II.10).

Tableau II.10 : Coordonnées des stations pluviométriques choisies.

N°	Station	Code	X (Km)	Y (km)	Z (m)	N°	Station	Code	X (Km)	Y (km)	Z (m)
S1	Rahouia	012702	347,85	249,15	650	S10	Sidi Youcef	013204	305,60	169,10	1100
S2	Kef-Mehboula	013001	331,60	224,25	475	S11	Ain Hamara	013302	316,45	233,12	288
S3	Frenda	013002	348,60	197,00	990	S12	Takhmeret	013304	316,40	203,10	655
S4	Ain El-hadid	013004	334,50	197,00	829	S13	Oued El Abtal	013306	318,05	261,70	354
S5	MechraSafa	013101	351,00	233,20	655	S14	Sidi AEKDjilali	013401	309,00	244,50	225
S6	Djilali Benamar	013102	332,50	239,90	300	S15	El Hachem	013407	299,50	233,10	417
S7	Ain Kermes	013201	354,55	179,85	1162	S16	S.M.B.A	013410	308,85	255,18	145
S8	Rosfa	013202	330,60	179,50	960	S17	Mahoudia	013005	333,00	212,85	670
S9	Tiricine	013203	303,90	180,50	1070	S18	Sidi Bakhti	013103	343,40	217,90	925

Parmi les méthodes d'estimation de la pluviométrie moyenne annuelle dans un bassin versant nous avons utilisé la méthode de Thiessen.

II.6.1. Polygones de Thiessen

C'est une méthode purement géométrique et très utilisée, elle permet d'identifier à partir de la densité du réseau pluviométrique, les zones d'influences et la précipitation moyenne. Cette dernière se résume par la formule (II.5).

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A} \quad (\text{II.5})$$

avec :

P_{moy} : Précipitation moyenne annuelle en (mm);

A_i : Surface d'influence du pluviomètre i en (Km^2);

P_i : Précipitation au poste i en (mm);

A : Surface du bassin versant en (Km^2).

II.6.1.1. Principe de la méthode

- Les stations pluviométriques sont reportées sur le bassin versant selon leurs coordonnées Lambert ou UTM;
- Des séries de droites reliant les postes pluviométriques sont tracées sans s'entrecouper et forment ainsi des triangles;
- Au milieu de chaque côté du triangle, une médiatrice est tracée;
- L'intersection des médiatrices des triangles délimite la zone d'influence de chaque poste pluviométrique;

- La surface affectée à chaque poste pluviométrique planimétrée permet de calculer la précipitation moyenne P_{moy} sur l'ensemble du bassin (Touaïbia, 2004).

A l'aide du module « **Vertical Mapper** » les zones d'influences ainsi que les surfaces correspondantes de chaque poste pluviométrique pourront être facilement définies et cela sur la base de la méthode de Thiessen (figure II.7 et tableau II.11).

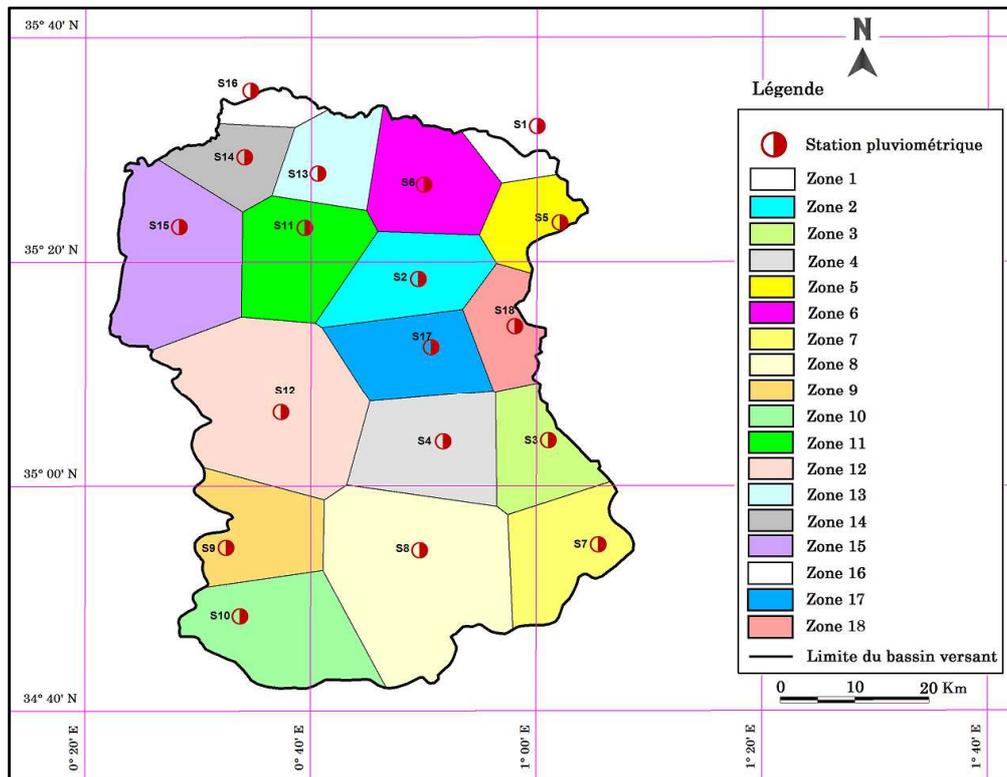


Figure II.7 : Polygones de Thiessen du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau II.11 : Pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant de l'oued Mina.

Par.\ Sta.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	P_{moy} (mm)
A_i (Km ²)	95,05	254,22	196,36	305,79	172,13	349,40	250,24	624,57	244,13	
P_{moy} (mm)	330,8	312,5	372,2	292,2	354,3	326,0	325,8	218,0	290,1	
Par.\ Sta.	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	
A_i (Km ²)	340,44	254,26	595,60	178,53	155,43	428,13	65,21	242,38	148,13	282,1
P_{moy} (mm)	283,5	251,9	242,4	254,9	235,2	269,9	220,7	246,2	466,0	

Par : Paramètre;

Sta: Station;

A_i : Surface d'influence du poste pluviométrique i en (Km²);

P_i : Précipitation moyenne annuelle du poste pluviométrique i en (mm);

A: Superficie du bassin versant en (Km²);

S_i : Station pluviométrique i.

La pluviométrie moyenne annuelle sur l'ensemble du bassin versant est estimée à 282,1 mm, la zone d'influence la plus grande est localisée au niveau de la station N°8 avec une superficie de 624,57 Km² et une pluviométrie moyenne annuelle de 218,0 mm. La plus petite zone d'influence est celle de la station N°16 à l'exutoire avec une superficie de 65,21 Km² et une pluviométrie de 220,7 mm.

II.7. Tests statistiques de détection des ruptures dans les séries climatiques

II.7.1. Définition d'une rupture

D'un point de vue statistique, une rupture peut être définie par un changement dans la loi des probabilités de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. Nous avons donc appliqué plusieurs tests statistiques de détection des ruptures sur les séries mensuelles complètes de précipitations.

II.7.2. Test de Pettitt (1979)

Ce test sur les rangs (non-paramétrique) est réputé pour sa robustesse et dérive de la formulation du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans la série chronologique X constitue l'hypothèse nulle H_0 . La statistique du test est donnée par les équations (II.6) et (II.7).

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{II.6})$$

avec:

$$i = 1, N \text{ et } j = t + 1, N$$

$$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (\text{II.7})$$

d'où :

$$\text{sgn}(Z) = 1 \text{ si } Z > 0;$$

$$\text{sgn}(Z) = 0 \text{ si } Z = 0;$$

$$\text{sgn}(Z) = -1 \text{ si } Z < 0.$$

Pettitt propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique K_N , définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à $N-1$. A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par la relation (II.8).

$$\text{Prob}(K_N > K) \approx 2 \exp\left(-\frac{6K^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (\text{II.8})$$

Pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé $\max |U_{t,N}|_{t=1, N-1}$ (Lespinas, 2008).

II.7.3. Statistique de Buishand (1982, 1984)

Ce test d'hypothèse est basé sur les hypothèses de normalité et de constance de la variance de la série. En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture, la statistique du test est donnée par les formules (II.9) et (II.10).

$$U = (N(N + 1))^{-1} \sum_{K=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x}\right)^2 \quad (\text{II.9})$$

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x - \bar{x}) \quad (\text{II.10})$$

Pour $K=1,2,3,\dots,N$ et D_x est l'écart-type de la série.

L'hypothèse nulle est l'absence de rupture dans la série. Si l'hypothèse nulle est rejetée, le test ne propose pas une estimation de la date de rupture. Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand (1982, 1984) à partir d'une méthode de Monte-Carlo. Cette méthode donne moins de poids aux premières et aux dernières valeurs de la série et s'avère donc plus performante pour tout changement de moyenne intervenant au milieu de la série. La statistique U est une statistique robuste qui reste valide même pour des distributions de la variable étudiée qui s'écartent de la normalité.

II.7.4. Procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977)

Cette procédure repose sur le modèle suivant (II.11) :

$$x_i \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 . Les variables τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus. τ et δ représentent respectivement la position de la rupture et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne. Le changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions à posteriori de τ et δ . Cette procédure fournit donc la probabilité que le changement se produise au moment τ dans une série où on suppose à priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même, elle donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur δ . L'estimation est d'autant plus précise que la dispersion est faible (Lespinas, 2008).

II.7.5. Procédure de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989)

Cette méthode consiste à découper la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. La segmentation est définie de la manière suivante:

Toute série x_i , où $i = i_1, i_2$ avec $1 \leq i_1 < i_2 \leq N$, constitue un segment de la série initiale des (x_i) avec $i = 1, 2, \dots, N$. Toute partition de la série étudiée initiale en m segments constitue une segmentation de rang m définie par :

- i_k , $k=1, 2, \dots, m$ le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ème}}$ segment;
- $n_k = i_k - i_{k-1} - 1$ la longueur du $k^{\text{ème}}$ segment;
- $\bar{x} = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i}{n_k}$ la moyenne du $K^{\text{ème}}$.

La quantité $D_m = \sum_{k=1}^m D_k = \sum_{k=1}^m \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x})^2$ est l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure est celle qui minimise D_m . Cette condition est nécessaire mais insuffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte suivante, selon laquelle les moyennes de 2 segments contigus doivent être significativement différentes. La pertinence de chaque nouvelle rupture est testée à l'aide du test de (Scheffé, 1959).

II.7.6. Programme « Khronostat »

Le logiciel **Khronostat** (Boyer, 2002) développé à l'IRD-HSM de Montpellier a été particulièrement utile dans la mise en œuvre des procédures statistiques mentionnées ci-dessus. Il permet notamment de visualiser et de stocker les résultats sous format numérique mais aussi graphique. En particulier, la visualisation des ellipses de contrôle associées au test de Buishand s'est avérée indispensable au repérage des dates de rupture. Le tableau (II.12) résume le calcul des tests de ruptures pour les cinq stations choisies durant la période (1978/79 - 2009/10).

Tableau II.12 : Tests statistiques et années de ruptures dans les séries pluviométriques étudiées.

St.	Méthode de Buishand	Méthode de Pettitt	Test de Lee et Heghinian	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport entre les deux moyennes (%)	Hubert	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport entre les deux moyennes (%)
S1	Non	Non	2006	236,01	345,03	31,60	Non	/	/	
S2	Non	Non	2007	460,57	547,27	15,80	Non	/	/	
S3	Non	Non	2006	165,57	304,17	45,60	2006	165,57	304,17	45,60
S4	Non	Non	2007	235,52	310,50	24,10	Non	/	/	
S5	Non	Non	2007	233,80	324,10	28,88	Non	/	/	

St. : Stations pluviométriques choisies

D’après les tests de vérification du caractère aléatoire, de normalité et les résultats obtenus sur les stations retenues, il ressort que toutes les stations enregistrent une tendance à la hausse de la pluviométrie annuelle en 2006 et 2007. D’après les tests effectués pour chaque station nous remarquons que les méthodes de Buishand et Pettitt n’ont révélé aucune rupture, contrairement aux tests de Lee et Heghinian, Hubert (figure II.8).

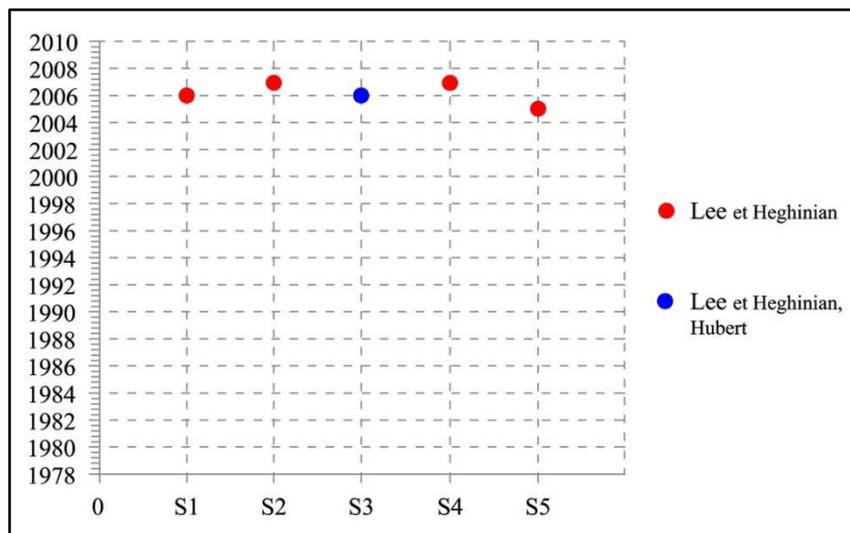


Figure II.8 : Identification de la période des ruptures entre (1978/79 - 2009/10).

II.8. Conclusion

La méthode des doubles masses établie pour les stations choisies (Mahoudia, Sidi Bakhti, Rosfa, Takhmaret et Sidi AEK Djilali sur 32 ans (1978/79 - 2009/10) révèle une homogénéisation des données pluviométriques annuelles. Les valeurs du coefficient de variation ne semblent pas suivre la grandeur de la hauteur pluviométrique car plus l’échelle est grande plus les précipitations sont stables. L’indicatif saisonnier le plus dominant dans la zone d’étude est de type HPAE (Hiver, Printemps, Automne, Eté).

La mise en étude de 18 stations montre que la lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant estimée par la méthode de Thiessen est de 282,1 mm pour la période (1978/79 - 2009/10).

Les précipitations moyennes annuelles calculées au niveau de chaque poste pluviométrique avec la méthode de Thiessen montrent une décroissance du Nord vers le Sud et de l'Est vers l'Ouest. Cette variabilité spatiale demeure le facteur principal de l'érosion hydrique car les zones susceptibles d'être érodées sont respectivement décroissantes du Nord vers le Sud et de l'Est vers l'Ouest.

Les tests statistiques de ruptures effectués pour les cinq stations montrent que les deux années 2006 et 2007 présentent une rupture avec une variation positive allant de 15,8 à 45,6%.

Chapitre III

Evaluation de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina

III.1.Introduction

Les hydro-géomorphologues utilisent de plus en plus d'outils d'analyse quantitative pour estimer les flux, hydriques ou solides, qui transitent à l'échelle des bassins versants. Ils portent leur attention sur les interactions amont/aval et sur les nombreuses relations verticales/horizontales qui agissent sur la réponse hydrologique (Fleurant *et al.*, 2013). A cet effet, dans ce chapitre, l'objectif principal est de quantifier le taux d'érosion du bassin versant de l'oued Mina par l'analyse morphométrique du réseau hydrographique et de comparer les résultats obtenus avec les mesures réelles. Préalablement une étude bibliographique sera présentée dans le domaine de l'érosion hydrique, du transport solide et de l'envasement des barrages.

III.2. Erosion hydrique

III.2.1. Définition de l'érosion hydrique

L'érosion est un phénomène naturel par le biais duquel au moyen d'agents météoriques (ex : pluie, vent,...etc.). Le sol est transporté d'un endroit à un autre. L'érosion est définie à travers les processus suivants : le détachement accompagné ou non de creusement, le transport des matériaux arrachés et leur dépôt subséquent (Gaillard, 2001).

III.2.2. Processus de l'érosion hydrique

L'eau des précipitations qui martèle le sol est qui ruisselle en surface peut alors arracher, transporter et redistribuer ces particules vers le bas des pentes, jusque dans les cours d'eau. Si la vitesse d'écoulement diminue suffisamment, les particules les plus denses sédimenteront les premières tandis que les plus petites iront enrichir les secteurs avals des versants. L'érosion hydrique implique ainsi l'arrachement, le transport et, éventuellement, la sédimentation du matériel érodé (Biro, 1981; Le Cœur et Gautier, 1996).

III.2.3. Formes de manifestation de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique peut se manifester sous différentes formes; sur le sol, on retrouve l'érosion pluviale (splasherosion), l'érosion en nappe (sheeterosion), l'érosion en rigoles (rillerosion) et

l'érosion par ravinement (gullyerosion) alors qu'en rivière, on retrouve l'érosion du lit (streamederosion) et l'érosion des berges (streambankerosion) (Zachar, 1982).

III.2.4. Facteurs de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique qui affecte les sols méditerranéens est fonction de multiples facteurs qui, selon Morgan (1986), semblent être les mêmes partout dans le monde.

III.2.4.1. Facteurs naturels

Les facteurs naturels sont liés essentiellement aux conditions locales (climatiques, morphométriques...etc.) de la zone en question, elles se divisent comme suit :

a/ Le climat

Lors d'averses exceptionnelles, le ruissellement de sols limoneux encroûtés en permanence peut augmenter de 15 % à 60-90 %. Les ravines acquièrent des tailles de l'ordre du mètre lors des événements exceptionnels (Castro *et al.*, 2000).

b/ La végétation

L'érosion des sols est fortement contrôlée par la couverture végétale. La production de matière organique est limitée dans les milieux méditerranéens arides, ce qui rend les terres très exposées à l'érosion hydrique.

c/ La topographie

Sur les pentes fortes, l'eau de pluie ruisselle vite et cause une érosion grave. Dans les milieux semi-arides et arides, le gradient de la pente est corrélé positivement avec le recouvrement de la surface du sol par des fragments de roches qui agissent en diminuant le ruissellement et la perte des sols (Abrahamas et Parsons, 1991; Cooke *et al.*, 1993; Simanton et Toy, 1994).

III.2.4.2. Facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques restent soumis à l'action de l'homme dans le bassin versant en modifiant quelques caractéristiques (déforestation, ...etc.) de la zone en question et se définissent comme suit :

a/ Les incendies

Le déboisement illégal détériore les forêts existantes. Ceci favorise fortement le ruissellement et aboutit à une forte érosion par la suite (Benchaabane, 1997). Mais après les incendies, la

colonisation par les plantes réduit l'érosion des sols et devient inférieure à celle existant avant le feu (Garcia-Ruiz *et al.*, 1996).

b/ L'utilisation des serres

L'extension des cultures sous serre dans les régions côtières de la Méditerranée et les travaux de préparation du sol nécessaires pour leur construction provoquent des taux de dénudation locaux importants et soumettent les sols à l'érosion. Une fois installées, les serres peuvent concentrer le ruissellement d'une manière spectaculaire (Bou Kheir, 1998).

c/ L'urbanisation

L'urbanisation stocke le ruissellement ou au contraire favorise son cheminement. Cela peut accroître par conséquent sensiblement les risques d'érosion: le CEMAGREF (1986) donne des valeurs moyennes des coefficients de ruissellement attribuées aux différentes catégories d'utilisation du sol : 0,05 pour les espaces boisés; 0,10 pour les terres cultivées; 0,35 pour les habitations individuelles denses; 0,50 pour les habitations collectives et 0,60 pour les zones industrielles. Ainsi, les différents états de surface et leur aptitude au ruissellement, dépendent sur un territoire, de la nature de l'occupation du sol (Collinet et Valentin, 1979; Courault, 1989).

- **Baisse de la population**

S'il y a une baisse suffisamment importante de la population, les aménagements fonciers ne sont plus entretenus comme il le faudrait, les ouvrages d'évacuation des eaux concentrées s'obturent progressivement; ils débordent et sont emportés par le ravinement. Le phénomène peut prendre une allure catastrophique irréversible si les pluies d'orage sont suffisamment fortes (Henensal, 1987).

- **Surpopulation rurale**

Selon Combes (1982) et Neboit (1983) conduisaient les gens à défricher et à cultiver des terrains trop difficiles à protéger contre l'érosion (Henensal, 1987).

d/ Risques liés au développement des villes et des infrastructures

Les sites de construction sont très sensibles à l'érosion. Les grands chantiers de lotissement et de construction urbaine maintiennent les sites nus et vulnérables pendant un à trois ans. La période du danger d'érosion le plus important persiste sur les sites des maisons individuelles pendant trois à douze mois (Henensal, 1987).

e/ Les banquettes et terrasses DRS

Selon Flotte (1981), les banquettes ont donné en Algérie de bons résultats sur les pentes modérées et toutes les fois qu'il y a eu un bon reboisement. Mais les banquettes en pentes fortes non boisées ont été décevantes, des risques importants de ravinement accéléré peuvent en effet survenir (Henensal, 1987).

f/ Mécanisation de l'agriculture et compactage des sols

L'action de compactage agit, d'une part, par la diminution de la porosité de l'ensemble du sol, d'autre part, par une accentuation de la semelle des labours (zone très compacte à 20 cm de profondeur environ). Ces deux phénomènes empêchent l'infiltration des eaux et favorisent le ruissellement et la battance et donc l'érosion (Henensal, 1987).

h/ Le surpâturage

L'apparition de nombreuses ravines proviennent des eaux de ruissellement non retenues par les forêts surpâturées. En effet, le sol soumis au pâturage intensif se tasse, devient plus compact, sa perméabilité diminue et le ruissellement de l'eau s'accroît ce qui entraîne des pertes de terre considérables. Ce fort ruissellement aboutit à la formation de profondes ravines lorsqu'il atteint des terres cultivées (Laouinaet al., 2000).

III.2.5. Générique de l'érosion pluviale

Le phénomène de l'érosion hydrique passe par plusieurs étapes jusqu'à atteindre un stade critique, la figure (III.1) montre l'évolution de de l'érosion pluviale.

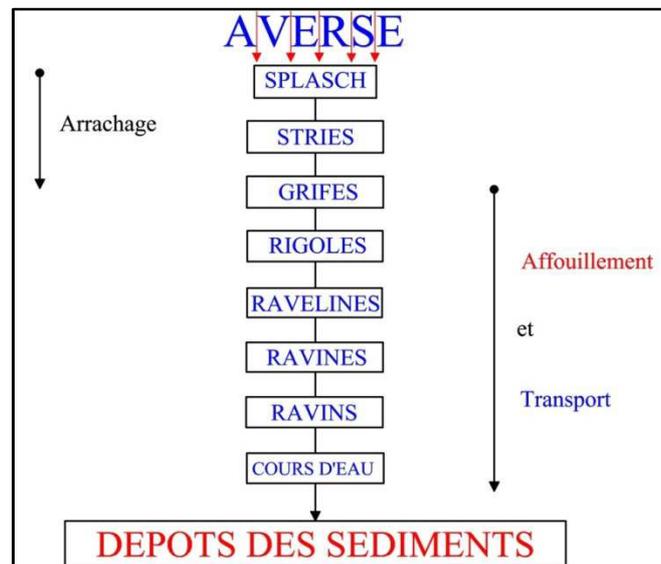


Figure III.1 : Générique de l'érosion pluviale (Touaibia, 2009).

III.2.6. Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique engendre des fins dévastatrices sur le milieu naturel ainsi que sur les infrastructures, les conséquences sont résumées comme suit :

- Pertes en sol;
- Colmatage des sols : sols lourds (formation de croute de battance);
- exhaussement de lit d'oued;
- Détarage des stations hydrométriques;
- Dépôts des sédiments sur les routes, auto route, plage, port...etc;
- Formation intensive du réseau d'écoulement;
- Envasement et sédimentation des barrages (aspect le plus grave en Algérie) ([Touaibia, 2009](#)).

III.3. Transport solide

III.3.1. Définition

Le transport de sédiments est défini comme étant la migration des particules (argiles, limons, sables,...) dans les cours d'eau pouvant s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit du fait des forces tractrices liées au courant. Il constitue la seconde phase de l'érosion, la dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement, elle dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie. Le champ d'exploitation de vitesse varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval ([Zeggane, 2005](#)).

III.3.2. Modes de transport solide

III.3.2.1. Transport solide en suspension

Le transport en suspension concerne les éléments les plus fins placés dans un écoulement turbulent. En eau calme, les particules tombent sous l'action de leur poids, la particule est mise en suspension et se déplace à la vitesse de l'écoulement (figure III.2). Contrairement au charriage, la suspension n'est pas limitée par la capacité de transport du cours d'eau. Les particules en suspension transitent de l'amont vers l'aval dans le lit de la rivière, sauf en cas de forte perturbation de l'écoulement comme des retenues ou des lacs. ([Mano, 2008](#)).

III.3.2.2. Transport solide par charriage

Le charriage désigne le transport sur le fond du lit d'éléments non cohésifs (figure III.2). Les éléments transportés subissent des forces de traînée et de portance induites par l'écoulement et la

gravité. Lorsque les conditions sont réunies, ces éléments se mettent en mouvement par glissement ou par roulement, tout en restant en contact avec le lit de la rivière. Les sédiments concernés sont en général les plus grossiers : sables, graviers, galets, voir blocs (Mano, 2008).

III.3.2.3. Saltation

La saltation est définie comme étant le rebondissement des particules de diamètre moyen d'un point à un autre jusqu'à ce qu'ils arrivent à la cuvette du barrage, ce mode de transport est moins rapide que la suspension, car le transfert est tributaire de la force du courant et du diamètre ou la taille du matériau considéré (figure III.2).

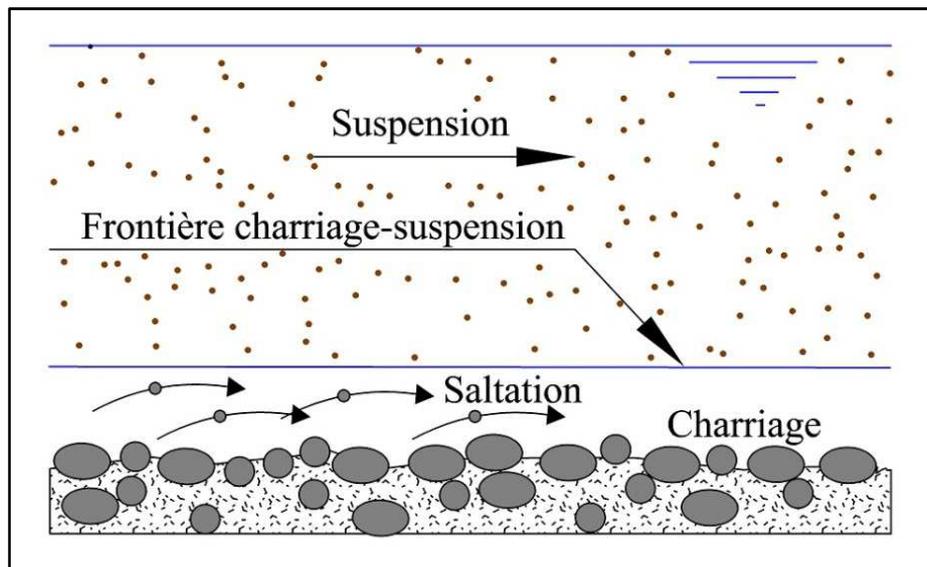


Figure III.2 : Distinction entre les modes de transport solide en rivière.

III.3.3. Processus du transport solide

Le mouvement des grains s'organise selon l'intensité de l'écoulement qui les met en mouvement, au-delà d'un certain seuil, l'écoulement est trop faible pour faire bouger les sédiments, puis, quand le débit augmente, quelques grains commencent à se mouvoir par roulement et saltation. Ce mouvement s'étend ensuite à l'ensemble des sédiments de surface. Dans le cas de sédiments grossiers, la mobilisation totale du lit nécessite des pentes du lit élevées ou des conditions hydrauliques extrêmes, alors qu'elle est courante dans le cas de lits sableux.

Avec l'augmentation de l'intensité de l'écoulement, l'épaisseur de couche de saltation augmente aussi, jusqu'à ce que les trajectoires des grains puissent occuper toute la colonne d'eau. Il s'agit d'un processus continu, et un critère permettant de distinguer le transport par charriage (proche du fond) et le transport en suspension sera donc arbitraire.

Dans le cas de rivières de gravier, le transport solide est généralement trop faible pour donner lieu à la suspension. La suspension se trouve plutôt dans les rivières de sable. Pour celles-ci, le transport solide s'accompagne généralement de dunes (Belleudy, 2007).

III.3.4. Conséquences du transport solide

Le transport solide dans les oueds à des conséquences néfastes sur le régime d'écoulement, nous citons parmi eux :

- Risques de débordements existants ou consécutifs à une remontée du lit(photo III.1);
- Impact de la suppression ou de la modification des débordements sur les débits maxima en aval;
- Abaissement des lignes d'eau sur les nappes et sur les zones humides;
- Abaissement des fonds sur la tenue des ouvrages, ponts, seuils, protections de berge;
- Risques d'érosion des infrastructures;
- Risques d'érosion et d'inondation des terres agricoles (photo III.2);
- Dégradation des prises d'eau;
- Impact sur le paysage et la qualité générale de la rivière (Roussel, 1999).





Cliché, TOUBAL A.K (16/02/2013)

Photo III.1 :Exhaussement du lit de l'oued Haddad,
Station hydrométrique de Sidi Abdelkader
El-Djilali.

Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013)

Photo III.2 :Risque d'inondation des terres agricoles
situées sur les berges de l'oued El-Abd.

III.4. Envasement des barrages

L'eau est menacée par sa quantité et sa qualité par l'envasement progressif des barrages, actuellement l'Algérie est touchée par ce phénomène qui ne cesse de s'accroître entraînant de lourdes pertes économiques. Malgré la construction de nouveaux barrages, l'Algérie enregistrera un déficit en eau de 1 milliard de m³ d'ici l'an 2025(Remini, 2006).

III.4.1. Définition de l'envasement des barrages

L'envasement est défini comme le dépôt de sédiments fins, constitués de particules de roches et de limon/argile. L'envasement est donc une forme de sédimentation avec de la vase.

III.4.2. Causes de l'envasement

III.4.2.1. Facteurs naturels

L'envasement des barrages est l'une des conséquences secondaires de l'érosion hydrique, c'est pourquoi les causes de la sédimentation sont en majeure partie ceux de l'érosion cités en (III.2.4)

a/ Forme du bassin versant

Si l'on considère les caractéristiques de deux bassins identiques. La forme du bassin versant influe sur le temps de concentration de ce dernier, car un barrage situé dans un bassin ramassé s'envase plus rapidement qu'un autre situé dans un bassin allongé.

III.4.2.2. Facteurs anthropiques

Parmi les facteurs anthropiques accélérant la dégradation des barrages nous citons les problèmes de gestion qui aggravent de façon accentuée l'état de ce dernier :

a/ Non ouverture des vannes de vidanges en période de crues

Cette action rend l'accumulation de la vase en croissance accélérée dans la cuvette du barrage, à chaque période de crue le chef d'exploitation du barrage doit ouvrir les vannes pour faire évacuer un grand pourcentage de sédiments vers l'aval du barrage.

b/ Blocage des vannes

Pour la bonne manœuvre des vannes et leur entretien, les lâchures d'eau de barrage en période de sécheresse sont nécessaires pour éviter un déséquilibre de l'écosystème entre l'amont et l'aval, le graissage de ces dernières s'avère nécessaire pour le bon fonctionnement, leur blocage en période de crues rend le piégeage des sédiments facile et augmente l'envasement du lac.

III.4.3. Processus de l'envasement des barrages

Le processus de sédimentation est une conséquence de deux phénomènes, l'érosion hydrique et le transport solide dans les cours d'eau, les photos(III.3)montrent les différentes formes de ces derniers.

III.4.3.1. Erosion hydrique

L'érosion hydrique correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro-transport. Ce phénomène est très répandu en Afrique du Nord (photo III.3, (a))(Remini et Remini, 2003).

III.4.3.2. Transport solide

Une fois ce matériau solide arrivé dans les cours d'eau, il sera transporté par la force du courant. Les concentrations des sédiments sont très élevées suivant les cours d'eau, et l'importance des crues (photo III.3, (b)) (Remini et Remini, 2003).

III.4.3.3. Piégeage des sédiments et mécanisme de sédimentation

Une fois la crue arrivée au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un « delta » en amont de la retenue. Les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, se tasser, et à se consolider(photo III.3, (c))(Remini et Remini, 2003).



(a) Erosionhydrique



(b) Transportsolide



(c) Envasement des barrages

((a) et (b) clichés, TOUBAL A.K (16/02/2013))

((c) cliché D.R.E de Relizane (2005))

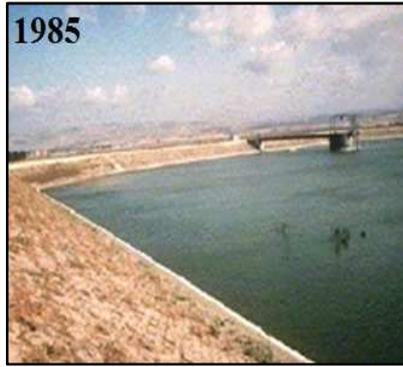
PhotoIII.3 : Formes réelles duprocessus de sédimentation des retenues.

III.4.4. Conséquences de l'envasement des barrages

La sédimentation dans les barrages pose d'énormes problèmes en amont, en aval et au niveau du réservoir lui-même. Elle entraîne la réduction de la capacité utile du barrage et le blocage des organes de vidange. La sédimentation peut mettre la stabilité de l'ouvrage en danger. Les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par les canaux, à partir des barrages, se déposent dans ces ouvrages, réduisent leur débitance, et rendent difficile leur exploitation (Remini et Remini, 2003).

III.4.4.1.Réduction de la capacité

Passage d'un barrage de faible taux d'envasement à un barrage de fort taux d'envasement; les photos suivantes montrent l'évolution de la cuvette du barrage Merdja Sidi Abed de 1985 jusqu'en 2009, (Photo III.4, (a), (b) et (c)).



(a) Mise en eau du barrage



(b) 20 ans après



(c) 24 ans après

((a) et (b) Clichés, D.R.E de Relizane (1985 et 2005))

((C) Cliché, TOUBAL A.K (Août 2009))

PhotoIII.4:Evolution de la retenue du barrage de MerdjaSidiAbedentre (1985/2009).

III.4.4.2. Sécurité de l'ouvrage

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, par la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase. Ceci se traduit par l'accroissement de la masse spécifique qui peut atteindre 1,8 t/m³ (figure III.3) (Remini et Remini, 2003).

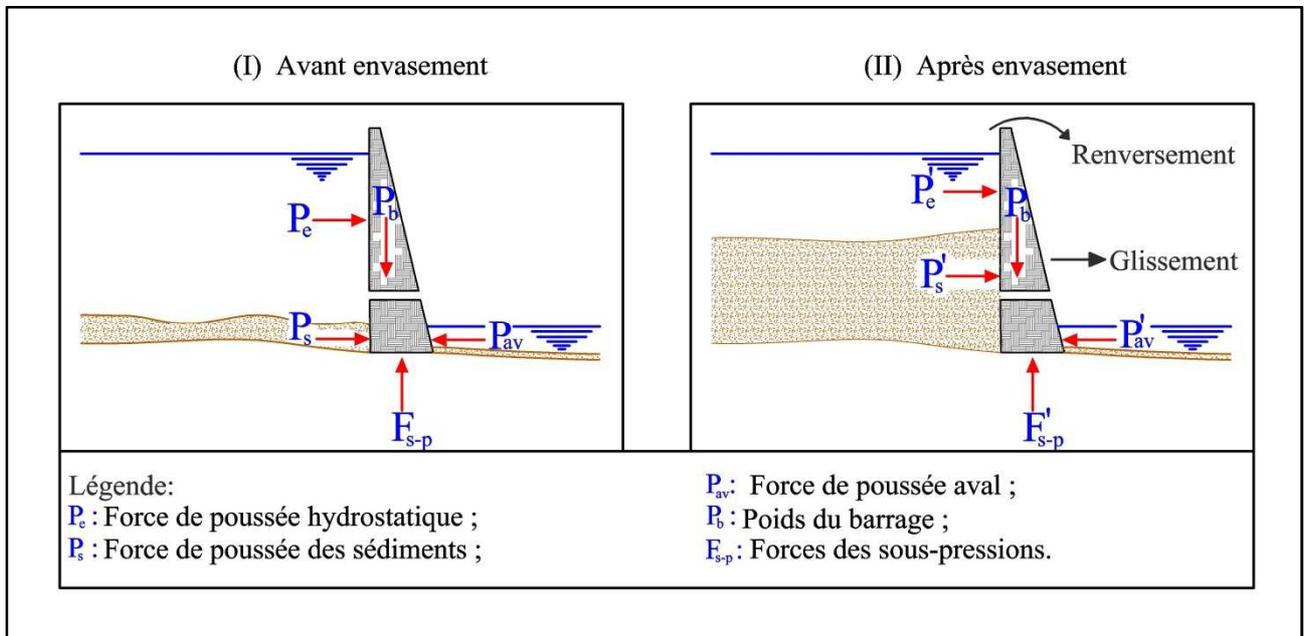


Figure III.3 : Risques associés à l'envasement d'un barrage.

III.4.4.3. Blocage des vannes

La présence des courants de densité dans une retenue accélère la sédimentation, et peut avoir comme impact l'obturation des organes de vidange. La non maîtrise du mécanisme des courants de densité peut avoir un effet néfaste sur les vannes de fond.

En effet, l'ouverture tardive des vannes de fond, par rapport à l'arrivée des courants de densité, favorise la consolidation des vases près des pertuis de vidange et rend plus difficile leurs manœuvres(Remini et Remini, 2003).

III.4.4.4. Sédimentation dans les canaux d'irrigation

Un autre problème délicat posé par la sédimentation qui s'étend cette fois-ci à l'aval du barrage. En effet, l'irrigation par l'eau chargée provoque le dépôt des sédiments dans les canaux. La section mouillée diminue avec le temps et le débit d'écoulement par conséquent. Ce problème impose leur entretien, et leur dévasement d'une manière périodique(Remini et Remini, 2003).

III.5. Synthèse récapitulative

Les différents phénomènes présentés dans la première partie du chapitre (érosion hydrique, transport solide et envasement des barrages) et leurs techniques de mesure sont synthétisés dans le tableau(III.1).

Tableau III.1 : Synthèse récapitulative sur les phénomènes de l'érosion hydrique, du transport solide et de l'envasement des barrages.

Phénomène	Types	Causes	Méthodes de mesure	Conséquences
Erosion hydrique	<p>1-Erosion en nappe 2-Erosion linéaire a-Erosion en griffes b-Erosion en rigoles c-Erosion par ravinement</p>	<p>1- Facteurs naturels - Le climat - La végétation - La topographie - Les sols - La lithologie 2- Facteurs anthropiques - L'utilisation des terres - Les incendies - L'utilisation des serres - L'urbanisation - Baisse de la population - Surpopulation rurale - Développement des villes et des infrastructures - Absence d'entretien des banquettes et terrasses DRS - Compactage des sols - Surpâturage.</p>	<p>1-Méthode de mesure de l'effet Splash (coupe de morgan) 2-Méthode des parcelles expérimentales 3-Méthode des repères.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes en sol - Colmatage des sols - Exhaussement de lit d'oued -Détarage des stations hydrométriques - Dépôts des sédiments sur les routes - Formation intensive du réseau d'écoulement - Sédimentation des barrages.
Transport solide	<p>1-Suspension 2-Saltation 3-Charriage</p>	Erosion hydrique	<p>1-Transport solide en suspension - Echantillonneur par intégration selon la profondeur - Échantillonneurs à intégration par point - Méthode par exploration de champs de vitesse - Echantillonneur à pompe - Mesure laser - Jauges nucléaires (Césium 137) 2-Transport solide par charriage - Fosse artificielle - La trappe transversale - Nasses de prise en rivière - Détecteur hydrophonique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - débordements existants ou consécutifs à une remontée du lit - Abaissement des lignes d'eau sur les nappes et sur les zones humides - Abaissement des fonds sur la tenue des ouvrages - Risques d'érosions des infrastructures - Risques d'érosions et inondations des terres agricoles - Dégradation des prises d'eau - Impact sur le paysage et la qualité générale de la rivière.
Envasement des barrages	<p>1-Envasement classique 2-Envasement par courant de densité</p>	<p>1-Facteurs naturels - Même que ceux de l'érosion hydrique - Forme du bassin versant. 2- Facteurs anthropiques - Non ouverture des vannes de vidanges</p>	<p>1-Levé topo-bathymétrique a-Bathymétrie par nivellement b-Bathymétrie par sondeur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la capacité - Sécurité de l'ouvrage - Blocage des vannes - Sédimentation dans les canaux d'irrigation - Eutrophisation.

III.6. Modèles d'estimation de l'érosion hydrique

La modélisation d'un phénomène tel que l'érosion hydrique, le transport solide et la sédimentation des barrages peut fournir des informations utiles pour la mise en œuvre des mesures de lutte sur les bassins versants afin de conserver les ressources en sol et diminuer le transport de sédiments vers les cours d'eau, à cet effet une présentation des différents modèles d'estimation les plus connus sera effectuée.

III.6.1. Définition de la modélisation

De manière générale, la modélisation d'un système donné permet de faire avancer la compréhension du fonctionnement d'un système modélisé et de prédire des états futurs du système en fonction de différentes sollicitations (mode prédictif; modification des variables d'entrée) ou d'évaluer la réponse du système à différents scénarios d'usage; variations des paramètres et des conditions aux frontières (Villeneuve *et al.*, 1998).

III.6.2. Quantification de l'érosion hydrique

Différentes approches de quantification de l'érosion hydrique ont été développées dans le monde entier. Ces dernières sont classées selon la chronologie de chacun d'eux (tableau III.2).

Tableau III.2 : Classification des modèles d'estimation d'érosion hydrique (Testa, 2000).

Acronyme	Nom du modèle	Année	Référence
USLE	Universal Soil Loss Equation	1958	Wischmeier et Smith, 1978
Gavrilovic	Modèle de Gavrilovic	1959	Gavrilovic et Zemljic, 1971
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation	1977	Beasley et Altri, 1980
RUSLE	Revised USLE	1978	Renard et Altri, 1987
SLEMSA	Soil Loss Estimator for Southern Africa	1978	Elwell et Altri, 1978
CREAMS	Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems	1980	Knisel, 1980
AGNPS	Agricultural Non Point Source Model	1981	Foster et Altri, 1989
KINEROS	Kinematic Erosion Simulation	1981	Smith, 1981
EROSION	Erosion	1982	Fleming et Altri, 1984
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	1984	Williams et Altri, 1984
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basin	1985	Williams et Altri, 1987
SHE/SHESED	Système Hydrologique Européen	1986	Abbott, Bathurst et Altri, 1992
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	1987	Leonard et Altri, 1987
KYERMO	Kentucky Erosion Model	1988	Hirschi et Altri, 1988
WEPP	Water Erosion Prediction Project	1989	Nearing et Altri, 1989
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	1993	Arnold <i>et al.</i> , 1993

III.7. Indices morphométriques

III.7.1. Historique des indices morphométriques

Les premières utilisations de la morphométrie en hydrologie datent de la fin du 18^{ème} siècle. En 1884, Kestlin emploie une formule pour déterminer le débit pour des petits bassins versants dans laquelle les variables sont la surface du bassin et un coefficient dépendant de la longueur du drain principal. La première carte avec des isolignes représentant le débit moyen spécifique est attribuée à Newell en 1892 (Anon, 1854; in Zavoianu, 1985).

Les travaux de l'Ecole d'Hydrologie de Russie vont par la suite marquer un tournant important : la surface, l'altitude moyenne et la longueur du drain principal suffisent désormais pour caractériser les écoulements sur la base de formules empiriques. Les données morphométriques sont également de plus en plus utilisées pour corroborer des hypothèses scientifiques (Zavoianu, 1985).

En utilisant les indices morphométriques, Jovanovic (1940) veut dans ses travaux quantifier l'influence de différents facteurs sur l'allure du profil en long. Mais les données sommaires à partir desquelles Jovanovic est parti, et le fait qu'on ignore à l'époque les modalités de transport des sédiments, expliquent pourquoi ses résultats sont passés pour « irréalistes » (Zavoianu, 1985).

Les hydrologues vont parallèlement tirer profit de la morphométrie pour mieux comprendre la dynamique des processus hydrologiques, notamment par le biais du système d'indexation des réseaux hydrographiques et des lois de développement des cours d'eau établis par Horton (1932, 1945).

A partir des années 1950, l'utilisation du système de classification Hortonien se propage rapidement. La morphométrie est considérablement enrichie par les travaux de nombreux chercheurs américains (Strahler, 1952; Schumm, 1956; Leopold et Miller, 1956; Hack, 1957; Melton, 1957; Morisawa, 1958; Scheidegger, 1966;...).

Les recherches de Strahler sont importantes à mentionner car, après avoir complété la classification d'Horton, elles ont fourni les bases à de nombreux concepts et lois basées sur la physique, les mathématiques et la statistique. Les recherches anglo-saxonnes démarquent également en portant sur les relations morphométriques et sur l'application conjointes de modèles mathématiques et de méthodes statistiques (figure III.4) (Doornkamp, 1968; Chorley, 1969; Gregory et Walling, 1973; in Douvinet et al., 2008).

III.7.2. Classification et utilité des indices morphométriques

Ces indices peuvent être divisés en 4 classes : 14 indices de forme, 19 indices de pente, 9 indices de réseau et 15 indices « croisés » utilisant deux des trois composantes (figure III.5). Les indices de forme s'attachent à décrire la forme d'un bassin. Les indices de volume servent à décrire le relief d'un bassin et à analyser la répartition des altitudes (Delcaillau, 2004). Les indices de réseaux sont utilisés pour mesurer l'organisation hiérarchique du réseau hydrographique. Quant aux indices croisés, ils permettent de croiser deux variables morphologiques : la densité de drainage rapportée par exemple une longueur (la longueur cumulée des cours d'eau) par une surface (l'aire du bassin); l'index topographique T_i de Beven (1997) fait lui, le ratio entre l'aire du bassin et une mesure de volume (la pente moyenne).

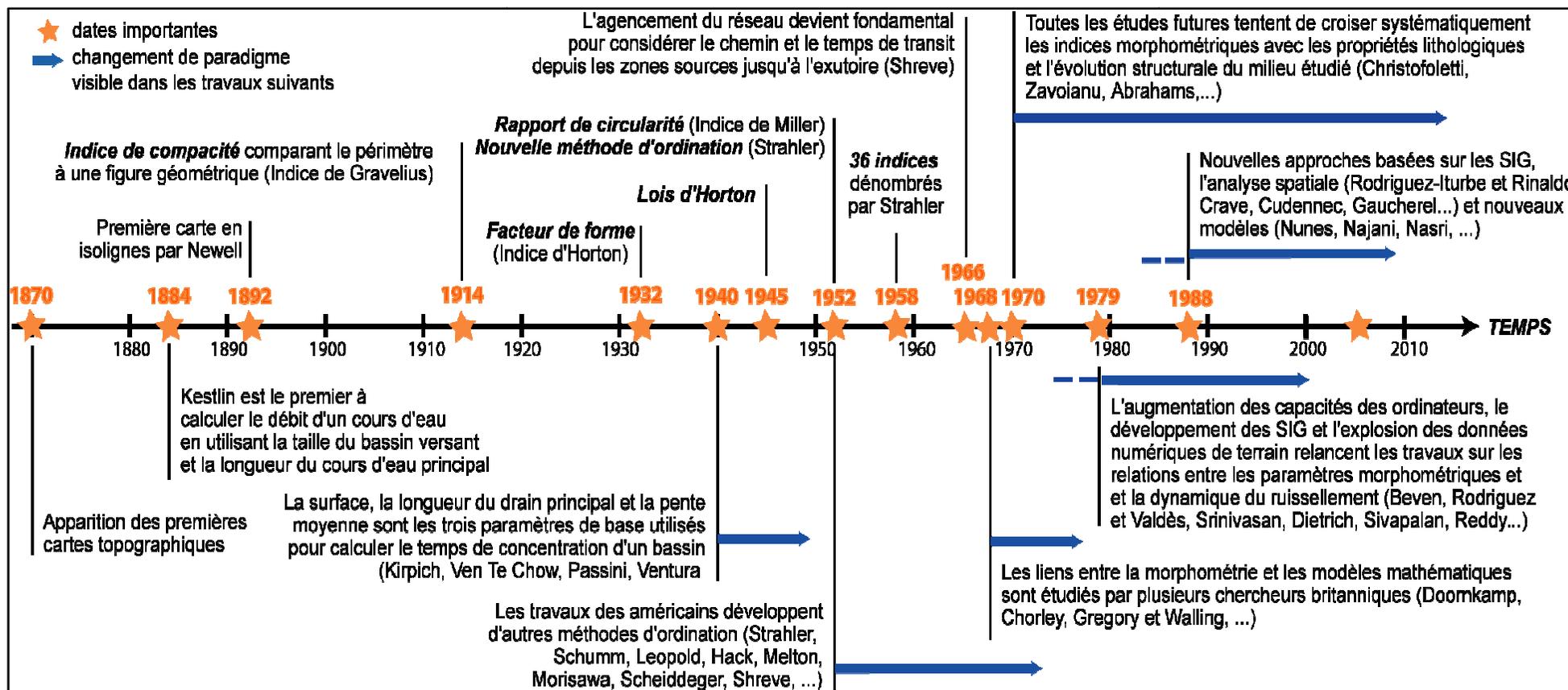


Figure III.4 : Place et importance des indices morphométriques en hydrologie (Douvinet et al., 2008).

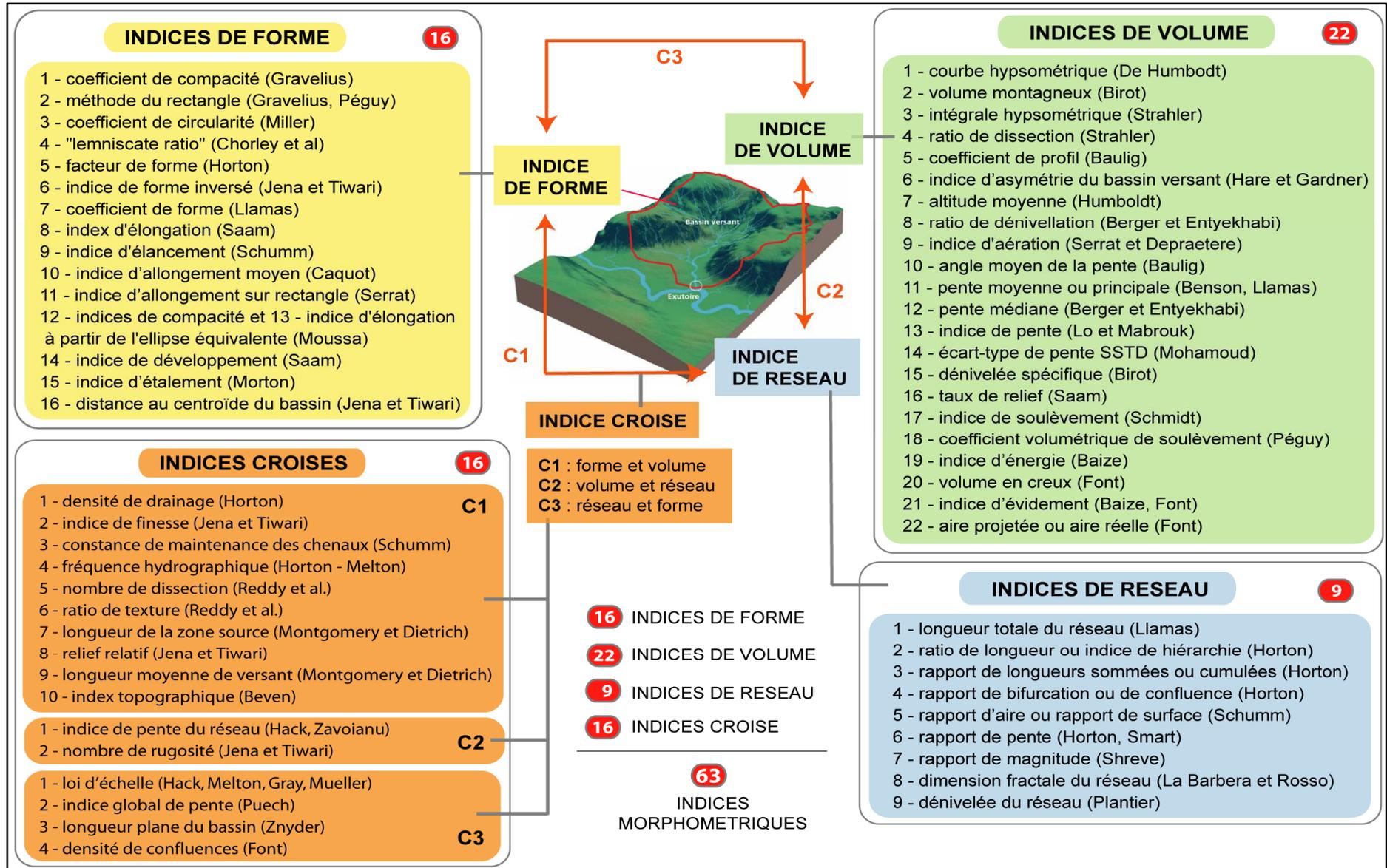


Figure III.5 : Typologies des indices morphométriques couramment utilisés en hydrologie (Douvinet et al., 2008).

III.8. Etat des lieux du bassin versant de l'oued Mina

Pour faire l'état des lieux du bassin versant à l'amont du barrage S.M.B.A, notre programme se divise en deux destinations différentes :

- Le 02/02/2013 : visite de la station hydrométrique de Oued El-Abtal;
- Le 16/02/2013 : visite de la station hydrométrique de Sidi AEK El-Djilali.

Au cours de nos opérations nous avons pu noter :

- L'exode rural de plusieurs agglomérations dû à l'insécurité (photo III.5, (a), (b) et (c));
- Une forte proportion de terrains nus dégradés (photo III.6, (a), (b) et (c));
- Différentes formes de manifestation de l'érosion hydrique (Erosion en griffes, en rigoles, ravins...) (photo III.7, (a), (b) et (c));
- Un paysage déformé par l'érosion hydrique;
- Une importante ramification du réseau d'écoulement (photo III.8, (a), (b) et (c));
- Des charriages et dépôts sédimentaires importants dans les oueds (photo III.9, (a), (b) et (c));
- Des surpâturages pour le peu de végétation existante (photo III.10, (a), (b) et (c)).



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013)

a) :OuledBouaza. b) :OuledBouaza.c) : Masmoud.

Photo III.5 : Exode Rural.



Cliché, TOUBAL A.K (16/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013)

a) :Khacheb.d) : OuledBouaza.c) :Masmoud.

Photo III.6 : Pertes en sols énormes associés à des terrains nus.



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (16/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013)

a) :Oued El-Abtal d) : Masmoude e) :Oued El-Abtal

Photo III.7 : Différentes formes de manifestation de l'érosion hydrique.



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (16/02/2013)

a) :Khachebb b) :Masmoude c) :OuledBouaza

Photo III.8 : Ramification du réseau d'écoulement.



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (16/02/2013)

a) :Oued El-Abdb) :Oued Haddadc) :Oued Haddad

Photo III.9 : Présence de charriage et dépôts sédimentaires dans les cours d'eau.



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013) Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013)

a) :Masmoudb) :OuledBouazac) :Oued El-Abtal

Photo III.10 : Surpâturage.

III.9. Analyse Géomorphologique Quantitative (A.G.Q)

III.9.1. Historique

L'Analyse Géomorphologique Quantitative se base sur des méthodes développées depuis longtemps par des géomorphologues américains (Horton 1932, 1945; Strahler 1952, 1954, 1956, 1957a, b, 1958). Ces méthodes ont été introduites plus tard en Italie (Avena et Giuliano 1967; Avena et al. 1967; Avena et Lupia Palmieri 1969). Il a été démontré, par la suite, l'importance de ces méthodes en terme de possibilité d'évaluation de l'ampleur des phénomènes érosifs (Baldassarre et al. 1980; Cicacci et al. 1977, 1980, 1983, 1987, 1988; Lupia Palmieri 1983); Baldassarre et Bazzofi (1998); Baldassarre et al. (2001); Baldassarre et Palumbo (2009) et récemment par Ouechtati et Baldassarre (2011) sur une région semi-aride en Tunisie ainsi qu'en Algérie par Benkadja et al. (2012).

III.9.2. Définition

L'Analyse Géomorphologique Quantitative (A.G.Q) est une méthode d'évaluation de l'érosion hydrique et de l'identification de la structure des bassins versants par l'analyse morphométrique, elle donne une image précise des processus impliqués dans la dynamique fluviale et de l'érosion qui en résulte (Benkadja et al., 2012).

III.9.3. Equation du modèle A.G.Q

Le nombre, la densité et l'indice d'anomalie hiérarchique notés respectivement G_a , g_a , et Δ_a , sont des paramètres définis par Avena et al. (1967) pour quantifier en détail le degré de hiérarchie du réseau hydrographique.

Pour estimer l'érodabilité par une analyse géomorphologique quantitative, l'équation (III.1) suivante a été proposée par Cicacci et al. (1987) :

$$\text{Log}T_u = 1,4478 + 0,32619D + 0,1025 \Delta_a \quad (\text{III.1})$$

Avec :

T_u : Indice de l'érosion en (t/Km²);

D : Densité de drainage en (Km/Km²);

Δ_a : Indice d'anomalie hiérarchique.

Cette méthode est basée sur la détermination de l'unité en moyenne annuelle de l'écoulement d'un cours d'eau trouble, noté T_u . Ce facteur est représentatif de la moyenne de l'érodabilité des terres des bassins versants (Cicacci et al., 1987). Le paramètre " T_u " reflète la quantité de sédiments en

suspension transportés en une année par l'oued, par unité de surface du bassin versant. Il est l'indice de l'érosion (Benkhadja et al., 2012).

III.9.4. Quelques travaux réalisés

III.9.4.1. En Algérie

Pour la première fois en Algérie Benkhadja et al. (2012) ont appliqué le modèle (A.G.Q) pour l'estimation du taux d'érosion dans le bassin versant de l'oued K'sob (Nord-Est Algérien), situé dans un climat semi-aride, doté d'une superficie de 1484 Km² avec une pente moyenne égale à 0,14 et une altitude moyenne de 1060m. L'Analyse Géomorphologique Quantitative a permis la synthèse des résultats illustrés dans le tableau (III.3) ci-après :

Tableau III.3: Paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued K'sob.

Paramètre	Valeur
Densité de drainage (D) (Km/Km ²)	3,48
Index d'anomalie hiérarchique Δ_a	1,11
Tu (t/Km ² /an)	524

Cette méthode fournit une estimation des pertes en sol moyenne exprimée par l'indice d'érosion "Tu" égale à 524 t Km⁻² an⁻¹, soit une quantité de 777600 tonnes/an (Benkhadja et al., 2012).

III.9.4.2. En Tunisie

Pour la première fois en Tunisie Ouechtati et Baldassarre. (2011) ont quantifié l'érosion du bassin versant de Siliana et du sous-bassin de Lakhmess. La zone d'étude couvre une superficie de 1036 Km². Le relief est assez plat et dominé par la présence des montagnes. Le climat dominant est de type semi-aride. L'application de l'Analyse Géomorphologique Quantitative a permis d'observer les résultats illustrés dans le tableau (III.4).

Tableau III.4: Indice d'érosion Tu pour le bassin versant de Siliana.

Paramètre	Bassin versant Lakhmess	Bassin versant Siliana
Index d'anomalie hiérarchique Δ_a	1,14	1,13
Densité de drainage (D)	3,51	3,33
Tu (t/Km ² /an)	513,06	446,10

L'application de l'A.G.Q montre que le flux de turbidité unitaire moyen annuel de l'oued Siliana est estimé à 446,1 (t/Km²/an), soit environ 463000 tonnes érodées annuellement du bassin versant entier. Pour l'oued Lakhmess, l'indice de l'érosion est estimé à 513,06 (t/Km²/an), soit environ 60440 tonnes érodées annuellement pour le sous bassin versant de Lakhmess (Ouechtati et Baldassarre, 2011).

III.9.4.3. En Italie

Santangelo et al. (2013) ont étudié les relations entre les glissements de terrain et la disposition du réseau de drainage par la méthode classique et l'Analyse Géomorphologique Quantitative dans une vallée inter-montagne d'une superficie de 120 Km² (la haute vallée de la rivière de Sinni). L'Analyse Géomorphologique Quantitative du réseau de drainage a été effectuée pour évaluer l'influence des processus de glissements de terrain sur les propriétés morphométriques du réseau de drainage. En particulier, le degré d'organisation hiérarchique du réseau de drainage est évalué à travers la densité de l'anomalie hiérarchique. Les relations empiriques entre le rendement des sédiments en suspension et certains paramètres géomorphologiques du réseau de drainage a permis l'estimation des taux de dénudation à court terme dans la zone d'étude (Santangelo et al., 2013).

III.10. Historique de classification d'un réseau hydrographique

La première tentative de classification des cours d'eau fut réalisée par Gravelius en 1914. Dans cette classification, le cours d'eau le plus long, de la source à l'exutoire, est celui d'ordre 1. Les chenaux alimentant directement celui d'ordre 1 sont d'ordre 2, ceux alimentant un tronçon d'ordre 2 sont d'ordre 3, et ainsi de suite jusqu'aux cours d'eau les plus petits. En 1945, l'ingénieur hydrotechnique américain Horton inversa le système de classification précédent, attribuant le premier ordre aux cours d'eau naissants les plus petits. Le cours d'eau d'ordre 2 sera alors un cours d'eau recevant un ou plusieurs tronçons d'ordre 1, et uniquement d'ordre 1. Quand un tronçon d'ordre 2 rejoint un autre d'ordre 2, on obtient un cours d'eau d'ordre 3, et ainsi de suite. De même, les chercheurs Panov (1948), Strahler (1952), Scheidegger (1965), et Shreve (1966), parmi beaucoup d'autres, étudièrent cette problématique et tentèrent d'améliorer les théories de classification des cours d'eau.

Dans notre cas nous avons utilisé l'approche de Strahler. Les cours d'eau ayant pour extrémité amont une source sont d'ordre 1. La confluence de deux cours d'eau d'ordre n en donne un d'ordre $(n + 1)$, et la confluence d'un cours d'eau d'ordre $(n + 1)$ avec un d'ordre $(n + 1)$ donne un cours d'eau d'ordre $(n + 2)$. L'ordre du tronçon arrivant à l'exutoire est donc l'ordre maximum du bassin (figure III.6) (Plantier, 2003).

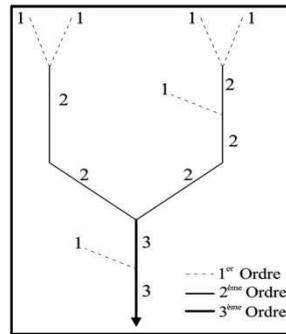


Figure III.6 : Classification de Strahler du réseau hydrographique (Strahler, 1964).

III.11. Analyse morphométrique du réseau hydrographique

L'analyse morphométrique consiste à extraire les différentes caractéristiques d'un réseau hydrographique notamment la longueur des cours d'eau, la sinuosité...etc.

III.11.1. Arborescence du réseau hydrographique

Dans cette partie du chapitre nous utiliserons le logiciel «**River Tools 2.4**» pour l'extraction et la hiérarchisation du réseau hydrographique de la zone d'étude. La classification du réseau d'écoulement est basée sur l'approche de Strahler. La figure (III.7) illustre le résultat de l'opération.

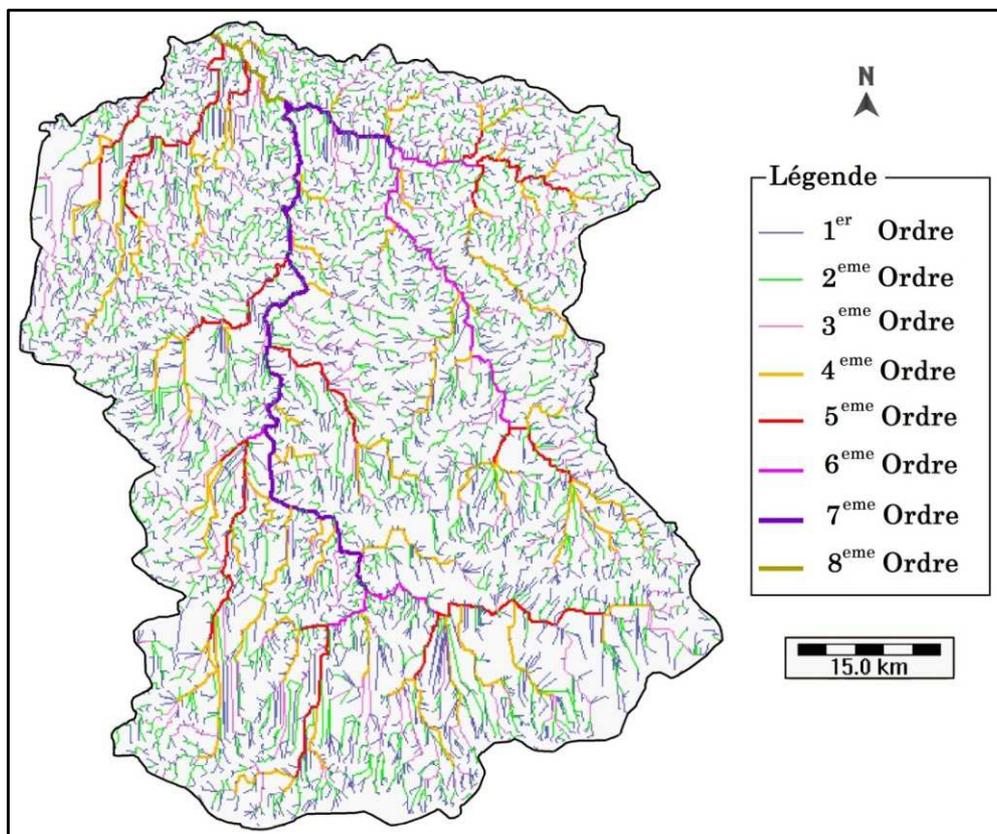


Figure III.7 : Classification de Strahler du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.

D'après la carte du réseau hydrographique établie par le programme, nous remarquons une ramification décroissante du Nord vers le Sud. Il en résulte que pour le bassin versant de la Mina, le nombre total des cours d'eau (permanents ou temporaires) N_i , est égal à 10073, répartis entre divers ordres hiérarchiques, l'ordre supérieur du cours d'eau principal est l'ordre 8 (tableau III.5).

Tableau III.5 : Caractéristiques générales du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.

Ordre i	Nbre	Longueur (Km)				Sinuosité				Densité de drainage (Km/Km ²)			
		Min.	Max.	Ecart	Moy.	Min.	Max.	Ecart	Moy.	Min.	Max.	Ecart	Moy.
1	8121	0,02	10,20	10,18	0,38	0,99	5,22	4,23	1,07	0,28	30,63	30,34	4,96
2	1501	0,02	15,69	15,67	1,54	0,99	3,65	2,66	1,17	1,51	14,71	13,2	4,54
3	355	0,03	17,61	17,58	3,53	0,99	2,22	1,23	1,23	2,32	7,34	5,02	4,28
4	72	0,32	26,13	25,81	8,07	0,99	1,97	0,98	1,29	3,50	5,21	1,71	4,22
5	16	0,02	35,10	35,08	14,16	1,00	1,71	0,71	1,29	3,68	4,68	1,00	4,16
6	5	3,16	48,13	44,97	16,43	1,29	1,55	0,26	1,36	3,94	4,49	0,55	4,21
7	2	16,27	84,96	68,69	50,61	1,33	1,39	0,06	1,36	4,05	4,22	0,17	4,13
8	1	15,68	15,68	0	15,68	1,37	1,37	0	1,37	4,14	4,14	0	4,14
Total	10073												

Ordre i : Numéro d'ordre attribué à l'affluent selon la classification de Strahler;

Nbre : Nombre d'affluent (chevelu hydrographique);

Min : Minimum de chaque paramètre calculé;

Max : Maximum de chaque paramètre calculé;

Moy : Moyenne du paramètre calculé;

Longueur : Longueur de l'affluent en (Km);

Sinuosité : Coefficient de sinuosité, il est égal au rapport entre la longueur curviligne et la distance entre les points extrêmes du tracé;

Ecart : Différence entre le minimum et le maximum de chaque paramètre calculé.

D'après les calculs effectués avec le logiciel « **River Tools 2.4** », on constate une augmentation de l'ordre hiérarchique correspondant à une diminution du nombre de cours d'eau. La prédominance est enregistrée au niveau du 1^{er} et du 2^{ème} ordre avec 95,52% (figure III.8).

Dans la mesure où les longueurs des cours d'eau oscillent entre 0,02 et 84,96 Km; les valeurs minimales caractérisent le 1^{er} et le 2^{ème} ordre alors que la valeur maximale représente l'ordre 7.

La sinuosité présente des valeurs minimales identiques évaluées à 0,99 allant du 1^{er} au 4^{ème} ordre, la plus grande est observée au niveau du 1^{er} ordre avec une valeur de 5,22, cette dernière est corrélée

à la distance curviligne et la distance linéaire entre les deux extrémités du cours d'eau. L'augmentation de la sinuosité s'élève avec l'augmentation de la distance curviligne.

La densité de drainage oscille entre 0,28 et 30,63 est observée au niveau du 1^{er} ordre. Ce paramètre est tributaire de la longueur du cours d'eau et de la surface drainée.

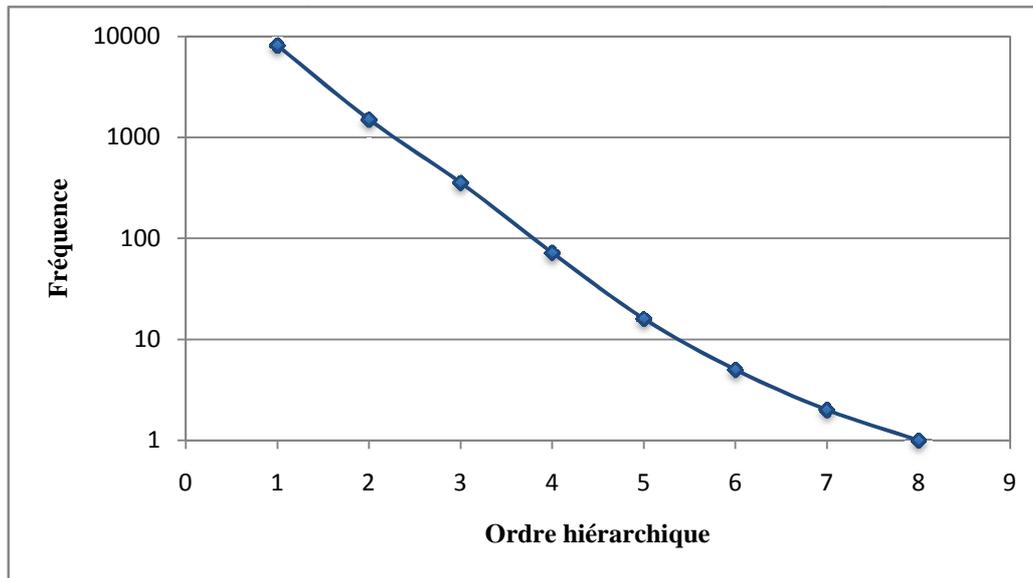


Figure III.8 : Relation entre la fréquence du cours d'eau et l'ordre de hiérarchisation.

III.11.2. Paramètres hiérarchiques du réseau hydrographique

III.11.2.1. Fréquence directe d'un cours d'eau

Il représente le nombre de cours d'eau d'ordre i qui se déversent dans un cours d'eau d'ordre $i + 1$.

III.11.2.2. Fréquence anormale

La fréquence anormale est définie comme étant le nombre de cours d'eau d'ordre i qui se déversent dans un cours d'eau d'ordre supérieur à $i + 1$ (formule III.1).

$$N_{ai} = N_i - N_{di} \text{ (III.1)}$$

N_{ai} : Fréquence anormale d'ordre i ;

N_i : Fréquence d'un cours d'eau d'ordre i ;

N_{di} : Fréquence directe d'ordre i .

III.11.2.3. Rapport de bifurcation

Il est défini comme étant le rapport entre le nombre de cours d'eau d'ordre i et le nombre d'ordre $i+1$, il est exprimé par la formule (III.2).

$$Rbi = \frac{N_i}{N_{i+1}} \text{(III.2)}$$

avec :

Rbi: Rapport de bifurcation;

N_i : Nombre de cours d'eau d'ordre i ;

N_{i+1} : Nombre de cours d'eau d'ordre $i+1$.

III.11.2.4. Moyenne pondérée des rapports de bifurcation

Elle est donnée par la formule (III.3).

$$Rb^0 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n Rbi \text{(III.3)}$$

avec :

Rb⁰: Rapport de bifurcation direct;

n: Nombre hiérarchique du cours d'eau principal;

Rbi: Rapport de bifurcation.

III.11.2.5. Rapport de bifurcation direct

Ce rapport décrit la structure du réseau hydrographique sans considérer l'anomalie hiérarchique. (Avena et al., 1967; in Guarnieri et Pirrotta, 2008). C'est-à-dire la confluence des segments de l'ordre i dans un segment d'ordre $i + 2, i + 3 \dots$ etc (formule III.4).

$$Rbdi = \frac{N_{di}}{N_{i+1}} \text{(III.4)}$$

avec :

Rbdi: Rapport de bifurcation direct;

N_{di} : Représente le nombre de segments d'un cours d'eau donné qui se déverse dans un cours d'eau d'ordre supérieur;

N_{i+1} : Nombre de segments du prochain ordre supérieur.

III.11.2.6. Moyenne pondérée des rapports de bifurcation directs

Elle est donnée par la formule (III.5).

$$Rbd^0 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n Rbdi \text{ (III.5)}$$

avec :

Rbd^0 : Rapport de bifurcation direct;

n : Nombre hiérarchique du cours d'eau principal;

$Rbdi$: Rapport de bifurcation direct.

III.11.2.7. Indice de bifurcation

Cet indice représente la différence entre le rapport de bifurcation et le rapport de bifurcation direct (formule III.6). Cela dépend de la présence d'anomalies hiérarchiques dans le réseau et peuvent donner utile informations sur la typologie des processus d'érosion actifset le degré d'évolution d'un bassin (Guarnieri et Pirrotta, 2008).

$$Ibi = Rbi - Rbdi \text{ (III.6)}$$

avec :

Ibi : Indice de bifurcation;

Rbi : Rapport de bifurcation;

$Rbdi$: Rapport de bifurcation direct.

III.11.2.8. Moyenne pondérée des indices de bifurcation

Elle est donnée par la formule (III.7).

$$Ib^0 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n Ibi \text{ (III.7)}$$

III.11.2.9. Nombre d'anomalie hiérarchique

Il correspond au nombre minimal de segments du premier ordre nécessaire pour rendre le réseau parfaitement hiérarchique (formule III.8) (Avena et al., 1967; in Guarnieri et Pirrotta, 2008).

$$G_a = \sum_{i=1}^{S-2} \sum_{r=i+2}^s N_{i,r} * f_{i,r} \text{ (III.8)}$$

avec :

$N_{i,r}$: Nombre de cours d'eau anormales d'ordre i est qui se déversent dans un cours d'eau d'ordre r ;

d'où :

$$f_{i,r} = 2^{r-2} - 2^{i-1}$$

Un réseau hydrographique étant dit conservatif lorsqu'il est constitué d'un nombre minimal de cours d'eau nécessaire à produire l'ordre le plus élevé du même réseau (Melton, 1958).

III.11.2.10. Indice d'anomalie hiérarchique

L'indice d'anomalie hiérarchique est défini comme étant le rapport entre le nombre d'anomalie hiérarchique et le nombre des cours du premier ordre,(formule III.9).

$$\Delta_a = \frac{G_a}{N_1} \text{(III.9)}$$

Δ_a : Index d'anomalie hiérarchique;

G_a : Nombre d'anomalie hiérarchique;

N_1 : Nombre de segment du premier ordre du réseau hydrographique.

Le tableau (III.6) récapitule les différentes formules des paramètres morphométriques cités ci-dessus, les résultats des calculs relatifs à ces paramètres sont illustrés dans le tableau (III.7).

Tableau III.6 : Synthèse des paramètres morphométriques à déterminer pour un bassin versant.

Paramètre	Définition	Unité	Formule Note
A	Surface	Km ²	/
P	Périmètre	Km	/
Ni	Fréquence de cours d'eau d'ordre i	/	/
Ndi	Fréquence directe d'ordre i	/	= Nombre de cours d'eau d'ordre i qui se déversent dans un cours d'eau d'ordre i+1.
Nai	Fréquence anormale d'ordre i	/	= Nombre de cours d'eau d'ordre i qui se déversent dans un cours d'eau d'ordre supérieur à i + 1. On a donc : Nai = Ni - Ndi.
Rbi	Rapport de bifurcation des cours d'eau d'ordre i	/	Rbi = Ni/Ni+1
Rb⁰	Moyenne pondérée des rapports de bifurcation	/	$Rb^0 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n Rb_i$
Rbdi	Rapport de bifurcation direct des cours d'eau d'ordre i		Rbdi = Ndi/Ni+1
Rbd⁰	Moyenne pondérée des rapports de bifurcation directs	/	$Rbd^0 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n Rbdi$
Ibi	Indice de bifurcation des cours d'eau d'ordre i	/	Ibi=Rbi-Rbdi
Ib⁰	Moyenne pondérée des indices de bifurcation	/	$Ib^0 = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n Ibi$ =Nombre de cours d'eau d'ordre 1 nécessaire pour rendre conservatif* le réseau hydrographique $G_a = \sum_{i=1}^{s-2} \sum_{r=i+2}^s N_{i,r} * f_{i,r}$ $N_{i,r}$: Est le nombre de cours d'eau anormales d'ordre i est qui se déversent dans un cours d'eau d'ordre r ; $f_{i,r} = 2^{r-2} - 2^{i-1}$ Un réseau hydrographique étant dit conservatif lorsqu'il est constitué d'un nombre minimal de cours d'eau nécessaire à produire l'ordre le plus élevé du même réseau (Melton, 1958).
ga	Densité d'anomalie hiérarchique	/	ga=Ga/A
Δa	Indice d'anomalie hiérarchique	/	Δa= Ga/N1

Tableau III.7 : Paramètres d'organisation hiérarchique.

Ordre i	Ni	Ndi	Nai	Rbi	Rb ⁰	Rbdi	Rbd ⁰	Ibi	Ib ⁰
1	8121	N ₁₋₂ = 7270	851	5,41		4,84		0,57	
2	1501	N ₂₋₃ = 1194	307	4,23		3,36		0,86	
3	355	N ₃₋₄ = 291	64	4,93		4,04		0,89	
4	72	N ₄₋₅ = 52	20	4,50	3,82	3,25	3,40	1,25	0,73
5	16	N ₅₋₆ = 12	4	3,20		2,40		0,80	
6	5	N ₆₋₇ = 5	0	2,50		2,50		0	
7	2	N ₇₋₈ = 2	0	2,00		/		/	
8	1	/	1	/		/		/	
Total	10073								

Ni :Fréquence de cours d'eau d'ordre i;

Ndi :Fréquence directe d'ordre i;

Nai :Fréquence anormale d'ordre i;

Rbi :Rapport de bifurcation des cours d'eau d'ordre i;

Rb⁰ :Moyenne pondérée des rapports de bifurcation;

Rbdi :Rapport de bifurcation direct des cours d'eau d'ordre i;

Rbd⁰ :Moyenne pondérée des rapports de bifurcation directs;

Ibi :Indice de bifurcation des cours d'eau d'ordre i;

Ib⁰ :Moyenne pondérée des indices de bifurcation.

III.11.2.11. Analyse et interprétation des résultats

Rapport de bifurcation, rapport de bifurcation direct, indice de bifurcation

Ces paramètres sont corrélés à la structure géométrique et à l'organisation réciproque des cours d'eau. Par conséquent, leurs valeurs indiquent le degré de hiérarchisation atteint par le réseau hydrographique, et comment ils peuvent contribuer aussi à la détermination de ses tendances évolutives (Cicacci *et al.*, 1983).

Une valeur minimale correspond généralement à un réseau hydrographique presque parfaitement hiérarchisé. Des valeurs de Rb^0 comprises entre 3 et 4 sont considérées témoigner d'un bon degré d'organisation hiérarchique des réseaux hydrographiques correspondants.

Des valeurs de Rb^0 comprises entre 4 et 5 témoignent d'un faible degré d'organisation hiérarchique des réseaux hydrographiques (Ouechtati, 2009).

Des valeurs de Rb^0 égales à ou voisines de 6 correspondent à des réseaux hydrographiques en voie de développement ou bien fortement conditionnés par des facteurs litho-structuraux.

Notre zone d'étude caractérisée avec une valeur de 3,82 témoigne d'un bon degré d'organisation hiérarchique du réseau hydrographique.

Le rapport de bifurcation direct Rbd^0 , qui évalue l'affluence des cours d'eau d'ordre i sur le cours d'eau d'ordre immédiatement supérieur ($i + 1$), permet de définir d'une manière plus précise l'organisation du réseau hydrographique. La valeur de Rbd^0 relevée dans la zone d'étude est de 3,40 ce qui indique aussi d'un bon degré d'organisation.

Pour comparer les cours d'eau qui constituent le réseau hydrographique avec ceux qui sont effectivement reliés en une succession hiérarchique régulière et pour montrer l'incidence des affluents anormaux, on a calculé l'indice de bifurcation Ib^0 , paramètre adimensionnel qui indique la structure moyenne de la portion anormale du réseau considéré. Pour le bassin versant de l'oued Mina $Ib^0 = 0,73$ présente une structure hiérarchique ordonnée et un degré de désordre hiérarchique faible pour le réseau hydrographique par rapport à la surface très étendue du bassin versant.

III.11.2.12. Etat du réseau hydrographique

Pour déterminer le stade évolutif d'un bassin versant, il est possible d'appliquer la relation statistique formulée par Melton (1958) reliant la fréquence des cours d'eau (N) et la densité de drainage (D). Ce paramètre, déjà vérifié par d'autres auteurs « Dramis et Gentili en 1977 ». Melton met en relation la fréquence et le développement linéaire des cours d'eau avec la surface du bassin versant. Selon les observations de Melton, pour :

$N/D^2 = 0,694 \Rightarrow$ Le réseau hydrographique est au stade de maturité discrète;

$N/D^2 < 0,694 \Rightarrow$ Le réseau hydrographique correspondant est au stade évolutif mature avec une modeste organisation hiérarchique;

$N/D^2 > 0,694 \Rightarrow$ Le réseau hydrographique de maturité avancée est caractérisé par des réseaux hydrographiques complexes et évolués (Melton, 1958).

Le résultat de calcul du rapport de Melton relatif à la zone d'étude est illustré dans le tableau (III.8).

Tableau III.8 : Rapport de Melton.

Ordre du réseau hydrographique	Densité de drainage	Rapport de Melton
N	$D_d (km/km^2)$	N/D^2
8	4,14	0,47

a/ Analyse et interprétation des résultats

Le rapport de Melton est égal à 0,47 pour le bassin versant de l'oued Mina. Cette valeur est inférieure au seuil de maturité optimale (0,694). Donc, on peut dire que le réseau hydrographique correspondant à la zone d'étude est au stade évolutif, pas tellement mature, mais encore en voie de développement.

III.12. Estimation de l'érodabilité par l'Analyse Géomorphologique Quantitative « A.G.Q »

Il est possible de caractériser le bassin alimentant la retenue du barrage S.M.B.A à l'aide de certains paramètres géomorphologiques quantitatifs comme la densité d'anomalie hiérarchique, l'indice d'anomalie hiérarchique et la densité de drainage. De tels paramètres pourraient être utilisés pour l'estimation de l'érodabilité des terrains et sa variabilité spatiale, à travers la résolution de certaines équations de régression aboutissant à la détermination de l'écoulement turbide unitaire moyen annuel «Tu ». Ce paramètre traduit la quantité (en terme de masse) des matériaux transportés en suspension en une année par le cours d'eau, par unité de surface du bassin versant (Lupia Palmieri, 1983).

III.12.1. Calcul des paramètres du modèle « A.G.Q »**III.12.1.1. Densité de drainage**

La densité de drainage a été définie dans le chapitre I (Page 17).

III.12.1.2. Indice d'anomalie hiérarchique

Nombre, densité et indice d'anomalie hiérarchique

Une définition plus précise de l'état de hiérarchisation des réseaux hydrographiques, en plus de la fréquence des affluents anomaux, doit aussi considérer l'incidence de ces derniers par rapport aux ordres propres des cours d'eau récepteurs. Ainsi, pour quantifier, de manière détaillée, la portion hiérarchiquement anormale du réseau hydrographique, les paramètres suivants ont été retenus: nombre, densité et indice d'anomalie hiérarchique selon Avena et al. (1967).

Ces paramètres, en plus de quantifier de manière précise le degré de hiérarchisation atteint par un réseau hydrographique, peuvent être utiles pour une comparaison pratique entre divers bassins versants. Ces paramètres sont indépendants des dimensions des bassins (Avena et al., 1969).

Les calculs relatifs au nombre, densité et l'indice d'anomalie hiérarchique du bassin versant de l'oued Mina sont représentés dans le tableau (III.9).

Tableau III.9 :Nombre, Indice et densité d'anomalie hiérarchique relatifs au réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.

Ordre dusegment de réception	Fréquence anormale						Facteur de multiplication						produit partiel						Nbred'anomalie hiérarchique	Ga	ga	Δa
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6				
3	395	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	395	-	-	-	-	-	395	9745	1,99	1,2
4	192	146	-	-	-	-	3	2	-	-	-	-	576	292	-	-	-	-	868			
5	129	82	27	-	-	-	7	6	4	-	-	-	903	492	108	-	-	-	1503			
6	57	41	13	7	-	-	15	14	12	8	-	-	855	574	156	56	-	-	1641			
7	67	33	22	11	2	-	31	30	28	24	16	-	2077	990	616	264	32	-	3979			
8	11	5	2	2	2	-	63	62	60	56	48	-	693	338	120	112	96	-	1359			

Ga :Nombre d'anomalie hiérarchique;

ga :Densité d'anomalie hiérarchique;

Δa :Indice d'anomalie hiérarchique.

a/ Analyse et interprétation des résultats

Pour le bassin versant, la valeur de g_a est presque égale à 2, elle indique un degré d'anomalie hiérarchique non considérable. Ces valeurs dépendent des conditions lithologiques (affleurement de roches calcaires, sols argileux peu profonds), climatiques (intensité des pluies) et topographiques comme la pente, qui peuvent influencer le développement du réseau hydrographique.

Pour l'indice d'anomalie hiérarchique, le bassin versant admet une valeur peu élevée de Δa égale à 1,2. Ce résultat est dû aux affluences d'ordre mineur faiblement anomaux, qui se déversent directement dans le cours d'eau principal dont l'ordre est largement supérieur.

Ces paramètres, en plus de quantifier de manière précise le degré de hiérarchisation atteint par un réseau hydrographique, peuvent être utiles pour une comparaison pratique entre divers bassins versants (Avena et al., 1969).

Les calculs correspondant au taux d'érosion de la zone d'étude avec le modèle A.G.Q sont rassemblés dans le tableau (III.10).

Tableau III.10 : Taux d'érosion du bassin versant de l'oued Mina (1978/2003).

Δa	$Dd(Km/Km^2)$	Log Tu	Tu($t/Km^2/an$)	Tu 10^6 (t/an)	Tu 10^6 (t)	Tu(Hm^3) (1978/03)
1,20	4,14	2,92	834,10	4,09	106,26	66,415

b/ Analyse des résultats

L'application du modèle A.G.Q dans le bassin versant de l'oued Mina révèle une érosion spécifique évaluée à $834,1 t/Km^2/an$ soit $4,09 \times 10^6$ tonnes seraient érodées annuellement, ce qui correspond à $66,415 Hm^3$ de sédiments érodés en 26 ans entre 1978 (mise en eau du barrage S.M.B.A) et 2003 (dernier levé bathymétrique).

III.12.2. Ecart entre le modèle A.G.Q et les mesures réelles

III.12.2.1. Comparaison avec le levé bathymétrique de l'année (2003)

L'application d'un modèle dans une zone d'étude nécessite toujours des valeurs observées sur terrain, et cela afin de valider la fiabilité de tel ou tel approche adéquate à la zone considérée.

Dans notre cas, la fiabilité du modèle sera référée au dernier levé bathymétrique du barrage S.M.B.A (2003) situé à l'exutoire du bassin versant de l'oued Mina, ou tous les sédiments érodés seront transportés à la cuvette du barrage par le réseau hydrographique.

L'écart entre le modèle A.G.Q et les mesures réelles se calcul par la formule (III.10), les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau (III.11).

$$\Delta = \frac{Y' - Tu}{Y'} \times 100 \text{ (III.10)}$$

avec :

Δ : Ecart entre le modèle A.G.Q et le levé bathymétrique en (%);

Y' : Envasement du barrage S.M.B.A entre (1978/2003) mesuré avec le levé bathymétrique en (Hm^3);

Tu : Taux de sédiments érodés dans le bassin versant de l'oued Mina entre (1978/2003) estimé avec le modèle A.G.Q en (Hm^3).

Tableau III.11 : Ecart entre le modèle A.G.Q et les mesures réelles.

$Tu(\text{Hm}^3)$ (1978/03)	$Y'(\text{Hm}^3)$ (1978/2003)	Δ (%)
66,415	81,291	18,3

a/Analyse et interprétation des résultats

En comparant la valeur trouvée par le modèle A.G.Q au résultat trouvé avec le levé bathymétrique, nous remarquons une sous-estimation de la valeur de l'envasement du barrage S.M.B.A, car le résultat trouvé ne représente que 81,7% de la valeur d'envasement trouvée par levé bathymétrique, le modèle A.G.Q ne considère que la fraction transportée en suspension par les oueds alors que l'envasement du barrage S.M.B.A est causé aussi par un charriage de fond.

L'application de ce modèle en Tunisie par [Ouchtati et Beldessare\(2011\)](#) montre qu'elle sous-estime aussi le taux d'érosion du bassin versant de Siliana. La valeur estimée par l'A.G.Q ne représente que 30% de la valeur réelle mesurée. Pour la première fois en Algérie le modèle A.G.Q a été appliqué par [Benkhadja et al. \(2012\)](#), la valeur obtenue par bathymétrie est 1,5 fois plus élevée que celle obtenue par l'A.G.Q.

III.12.2.2. Comparaison avec le transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003)

Afin d'obtenir un écart bien estimé entre le modèle A.G.Q et le taux d'érosion du bassin versant de l'oued Mina, il faut additionner les volumes de désenvasement du barrage S.M.B.A durant l'exploitation entre (1978/2003) par les organes de vidange au volume de vase trouvé par le levé bathymétrique de (2003) (tableau III.12).

a/ Volumes de désenvasement par les organes de vidange (1978/2003)

Depuis la mise en eau du barrage (1978) les exploitants tentent de préserver la capacité utile du barrage lors des crues saisonnières ainsi que la pérennité de l'ouvrage, pour cela l'évacuation d'une partie des sédiments aux alentours de la digue est primordiale.

Le désenvasement du barrage S.M.B.A se fait au moyen de la chasse des courants de densité par:

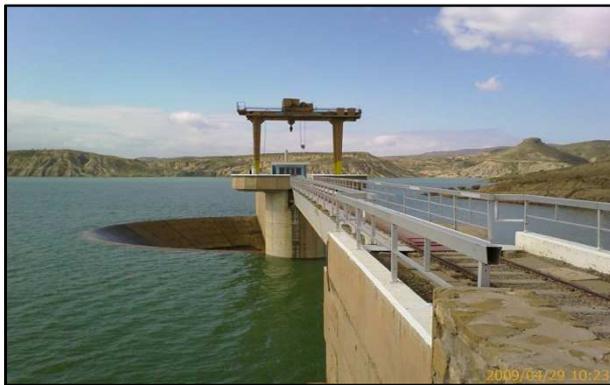
- ✓ La vidange de fond rive gauche(photo III.11);
- ✓ La vidange de fond rive droite;
- ✓ Les vannettes de dévasement;
- ✓ Le jet creux (chapitre VI ; photo VI.10).



Cliché, KalkoulOmar(03/03/2014)

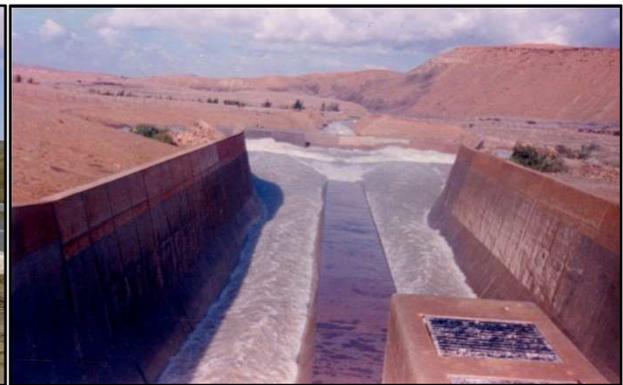
Photo III.11 : Chasse de la vase par vidange de fond rive gauche.

Le déversement des eaux excédentaires par l'évacuateur de crues reste négligeable sur le plan quantité de sédiments évacués, car le déversoir à tendance à évacuer de l'eau claire (photo III.12 et III.13).



*Cliché, Direction du barrage S.M.B.A
(29/04/2009)*

Photo III.12 : Déversement des eaux claires excedentaires par l'évacuateur de crues



*Cliché, Direction du barrage S.M.B.A
(29/04/2009)*

Photo III.13 : Evacuation des eaux claires excedentaires par l'ouvrage de rejet

Tableau III.12 : Ecart entre le modèle A.G.Q et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003).

Année	V _{V.R.G} (Hm ³)	V _{V.R.D} (Hm ³)	V _{V.O.D} (Hm ³)	V _{vase^{ann}} (Hm ³)	V _{vase^{chassé}} (Hm ³) (1978/2003)	Y' (Hm ³) (1978/2003)	Y'' (Hm ³) (1978/2003)	Tu (Hm ³) (1978/03)	Δ (%)
1978	/	/	/	0	47,201	81,291	128,492	66,415	48,31
1979	0,41	0,02	0,49	0,92					
1980	0,13	1,15	0,18	1,46					
1981	0,02	0,04	/	0,05					
1982	0,34	1,19	/	1,53					
1983	/	/	/	0					
1984	/	0,01	/	0,01					
1985	0,08	0,01	/	0,08					
1986	0,06	0,07	/	0,13					
1987	0,45	1,77	2,71	4,93					
1988	0,02	0,07	0,24	0,33					
1989	0,07	0,04	0,83	0,93					
1990	0,07	0,07	0,23	0,37					
1991	0,13	0,12	0,81	1,06					
1992	0,01	0,00	0,02	0,03					
1993	1,61	0,10	2,88	4,60					
1994	1,04	0,03	1,32	2,40					
1995	0,01	0,06	0,05	0,12					
1996	0,05	0,03	3,41	3,49					
1997	0,06	20,00	0,10	20,16					
1998	/	/	0,20	0,20					
1999	0,11	/	0,04	0,15					
2000	0,42	/	0,47	0,89					
2001	0,63	/	1,55	2,18					
2002	0,26	/	0,27	0,53					
2003	0,53	/	0,12	0,65					

V_{V.R.D} : Volume des sédiments évacué par la vidange rive droite en (Hm³);

V_{V.R.G} : Volume des sédiments évacué par la vidange rive gauche en (Hm³);

V_{V.O.D} : Volume des sédiments évacué par les orifices de dévasement en (Hm³);

V_{vase^{ann}} : Volume total des sédiments évacués par les organes de vidange durant l'année considérée en (Hm³);

V_{vase^{chassé}} : Volume total des sédiments évacués par les organes de vidange entre (1978/2003) en (Hm³);

Y' : Envasement du barrage S.M.B.A entre (1978/2003) mesuré par levé bathymétrique en (Hm³);

Y'' : Transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003) en (Hm³);

Tu : Taux de sédiments érodés dans le bassin versant de l'oued Mina estimé avec le modèle A.G.Q entre (1978/2003) en (Hm³);

Δ : Ecart entre les résultats issus du modèle A.G.Q et le volume total des sédiments arrivés à la retenue du barrage en (%) (formule III.10).

$$\Delta = \frac{Y'' - Tu}{Y''} \times 100 \text{ (III.10)}$$

b/ Analyse et interprétation des résultats

D'après les bilans annuels effectués par les exploitants du barrage entre 1978 et 2003 nous remarquons qu'un volume de 47,201Hm³ a été évacué par les organes de vidange, cette valeur dépend des apports solides entrant à la retenue du barrage.

L'écart entre le modèle A.G.Q et le volume total des sédiments piégés est évalué à 48,31%, ce pourcentage est trop élevé, ce qui diminue les chances de son applicabilité dans la zone d'étude. Cette non-conformité entre le modèle A.G.Q et les mesures réelles revient aux causes suivantes :

- Le modèle prend en compte les matériaux transportés par suspension dans les oueds et néglige le charriage (Ouchtati et Beldessare, 2011);
- Le degré de similarité entre les caractéristiques des bassins expérimentaux et la zone d'étude (Ouchtati et Beldessare, 2011);
- L'équidistance du levé topographique qui s'élève à 50 m, cette grande échelle néglige plusieurs chevelus qui sont à la base du calcul de l'indice d'anomalie hiérarchique, qui sous-estime à son tour l'évaluation du taux d'érosion hydrique dans le bassin versant (figure III.9).

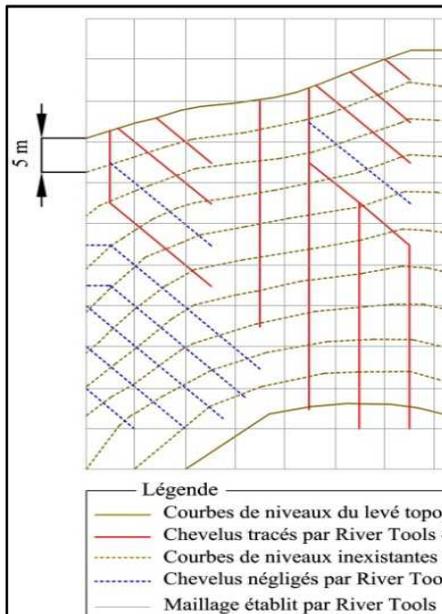
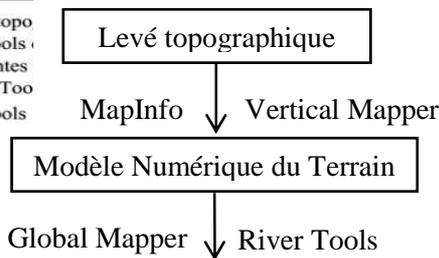
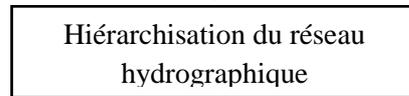
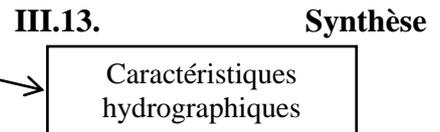
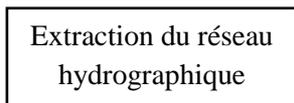


Figure III.9 : Chevelus Tools.



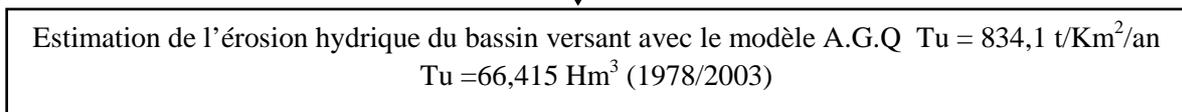
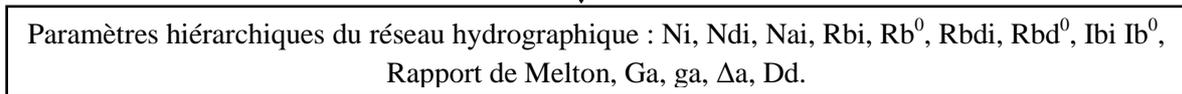
négligés par le logiciel River



récapitulative

Afin de bien montrer les explorées lors de ce chapitre une

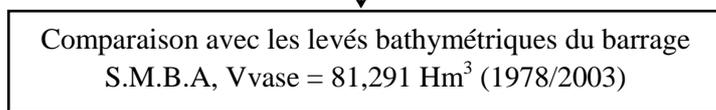
étapes synthèse



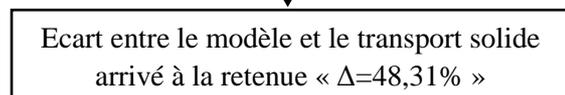
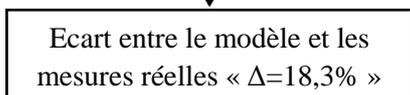
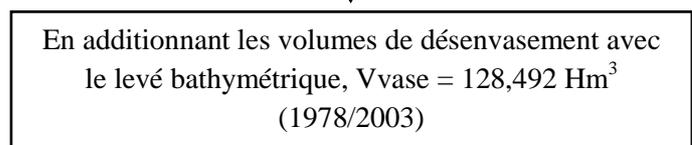
récapitulative

sous

forme détaillé est établi



d'organigramme (figure III.10).



98

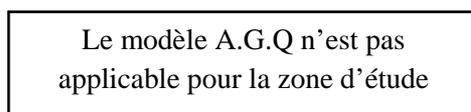


Figure III.10 : Organigramme des principales étapes effectuées pour l'estimation du taux d'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina.

III.14. Conclusion

Selon la classification de Strahler, le bassin versant de l'oued Mina possède une ramification du réseau hydrographique d'ordre 8. Les résultats de l'analyse morphométrique du bassin versant témoignent d'un bon degré d'organisation hiérarchique du réseau hydrographique. Le rapport de Melton démontre que le réseau hydrographique est au stade évolutif encore en voie de développement.

L'Analyse Géomorphologique Quantitative du bassin versant révèle une érosion spécifique de $834,1\text{t/Km}^2/\text{an}$ soit $4,09 \times 10^6$ tonnes correspondant à $66,41\text{Hm}^3$ de sédiments érodés entre (1978/2003).

En se référant aux mesures bathymétriques du barrage S.M.B.A effectuées en 2003 ($V_{\text{vase}} = 81,291 \text{ Hm}^3$) nous remarquons que le modèle appliqué sous-estime la valeur obtenue de 18,3%, cependant en augmentant les volumes de désenvasement évacués par les organes de vidange durant l'exploitation (1978/2003) au mesures réelles, le volume total des sédiments arrivés à la retenue du barrage serait de $128,492 \text{ Hm}^3$, à cet effet l'écart s'élève jusqu'à 48,31%. Enfin on pourrait dire que le modèle A.G.Q n'est pas applicable pour l'estimation de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina.

Chapitre IV

Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A

IV.1. Introduction

En Algérie, la sédimentation des barrages prend de plus en plus de l'ampleur. La méconnaissance de la quantification de l'érosion rend la tâche difficile à l'ingénieur chargé de l'étude et de l'exploitation du barrage quant au calcul de la tranche morte et à la durée de vie de l'ouvrage (Touaïbia *et al.*, 1992). Dans ce chapitre nous avons pour objectif principal de déterminer le taux d'envasement du barrage S.M.B.A avec le modèle P.I.S.A et de le comparer avec les résultats des mesures réelles.

IV.2. Evolution de la retenue du barrage S.M.B.A

➤ **En 1978 :**

D'après l'étude initiale du projet faite par le bureau d'étude français Coyne et Bellier (1970) la retenue du barrage avait à l'origine un volume total de 241,025 Hm³ avec une côte NGA de 130 m (figure IV.1).

➤ **En 1986 :**

Lors du levé bathymétrique effectué en 1986 par l'entreprise GEOKART (Pologne), un volume de 16 Hm³ de perte en eau a été relevé depuis la mise en eau du barrage (1978) avec un volume restant égal à 225,580 Hm³. Une dénivelée de vase d'environ 10 m est visible entre la courbe de l'année de mise en eau et 8 ans plus tard, conséquence d'un envasement progressif de la retenue du barrage (figure IV.2).

➤ **En 2003 :**

En 2003 l'entreprise française GEOID en collaboration avec le Laboratoire des Etudes Maritimes (L.E.M) d'Alger ont réalisé des travaux conjoints sur le taux d'envasement du barrage estimé à 72 Hm³ ce qui donne un volume utile restant de 153,710 Hm³. Entre 1986 et 2003 un volume considérable a été perdu par le transport des sédiments dans les cours d'eau (figure IV.3).

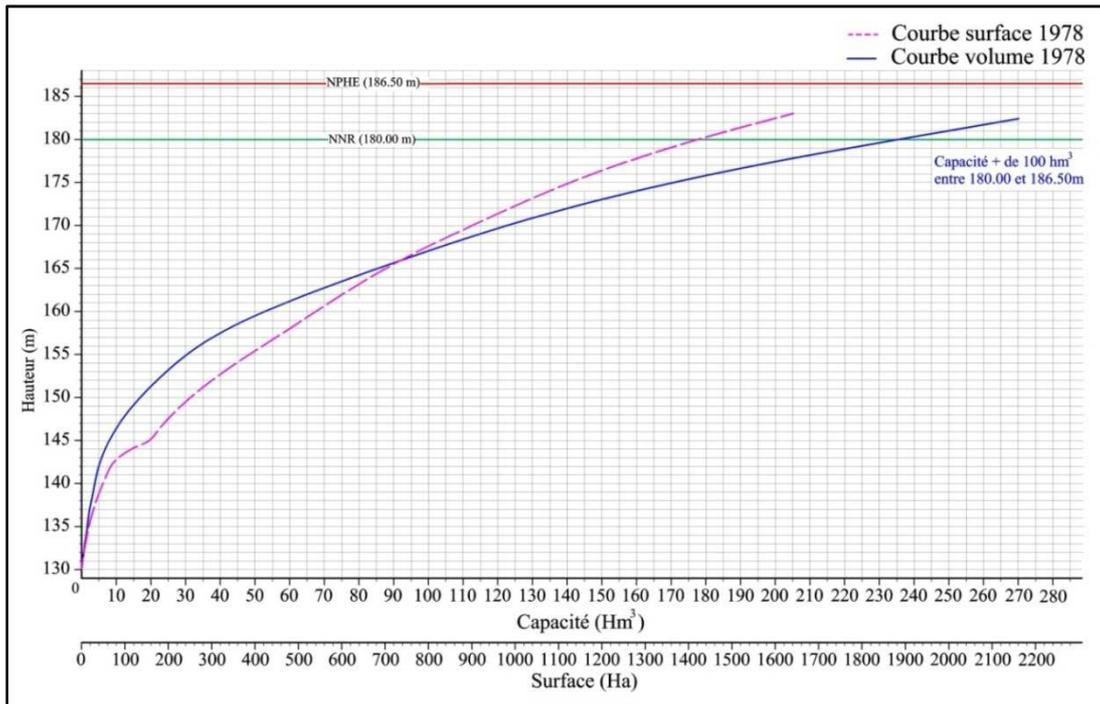


Figure IV.1 : Courbe Hauteur/Capacité/Surface du barrage S.M.B.A en 1978.

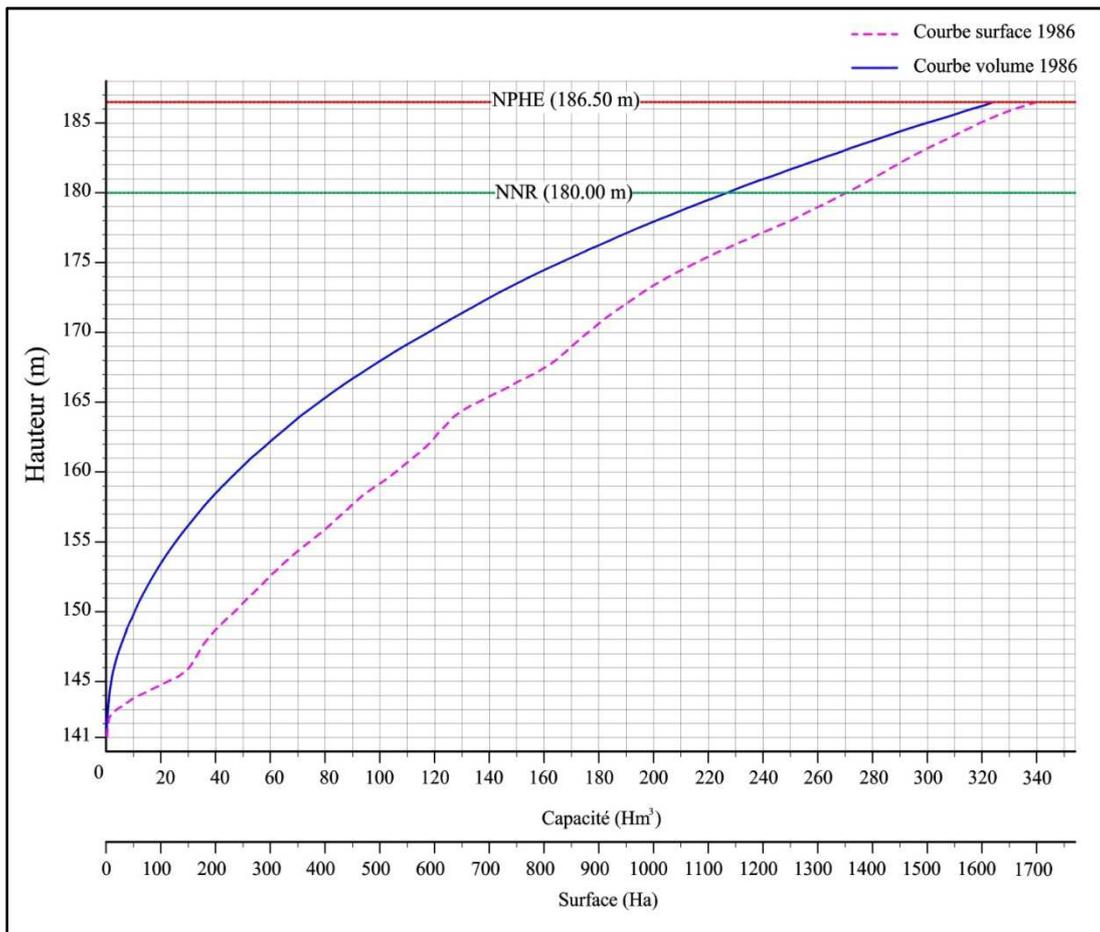


Figure IV.2 : Courbe Hauteur/Capacité/Surface du barrage S.M.B.A en 1986.

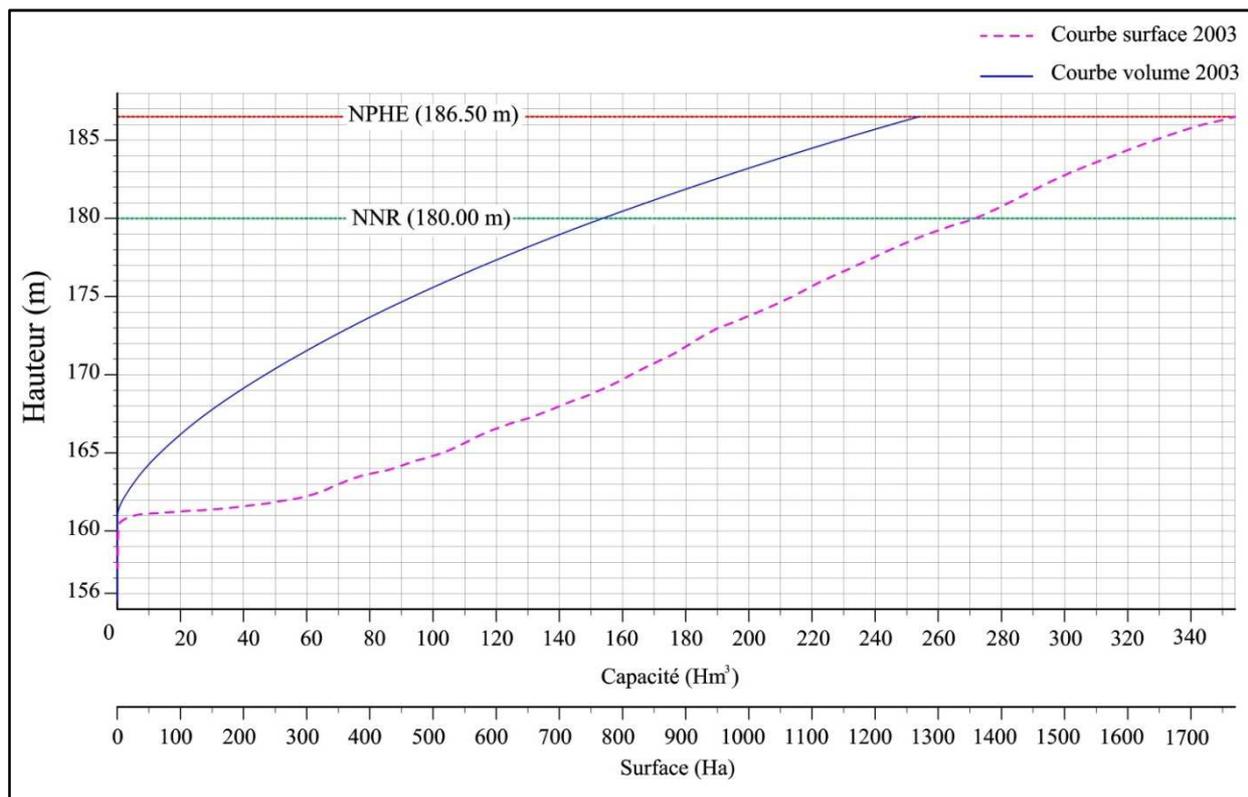


Figure IV.3 : Courbe Hauteur/Capacité/Surface du barrage S.M.B.A en 2003.

IV.2.1. Comparaison des courbes

L'étude des deux courbes capacité/hauteur de l'année 1986 et de l'année 2003 présentent des allures semblables. Le décalage qui existe entre les 2 courbes restelié directement à l'accroissement de l'envasement du barrage.

En rapport également avec l'envasement, les courbes hauteur/surface présentent un décalage tendant à se réduire avec l'altitude.

Les deux courbes hauteur/surface se rapprochent au-delà de l'altitude 174 m et la variation de la surface devient quasiment la même pour les deux périodes. Ceci est prévisible mais indique également que l'effet de l'envasement affecte la surface jusqu'à l'altitude 174 m.

IV.2.2. Interprétation

L'évolution de la perte en capacité analysée à partir de la mise en service du barrage en 1978 est récapitulée dans le tableau (IV.1) comme suit :

Tableau IV.1 : Evolution de la capacité du barrage S.M.B.A entre (1978/2003).

/	1978 - 1986	1986 - 2003	Total
Perte de capacité en (Hm ³)	9,42	71,871	81,291
Perte moyenne annuelle en (Hm ³)	1,35	6,31	/

IV.3. Evolution de l'envasement du barrage S.M.B.A

IV.3.1. Evolution temporelle de l'envasement du barrage S.M.B.A

En se basant sur les trois dates évènementielles du barrage S.M.B.A (1978/1986/2003) on obtient trois points caractérisant le volume de vase dans ce dernier, la figure (IV.4) illustre l'évolution temporelle de la vase au fil des années.

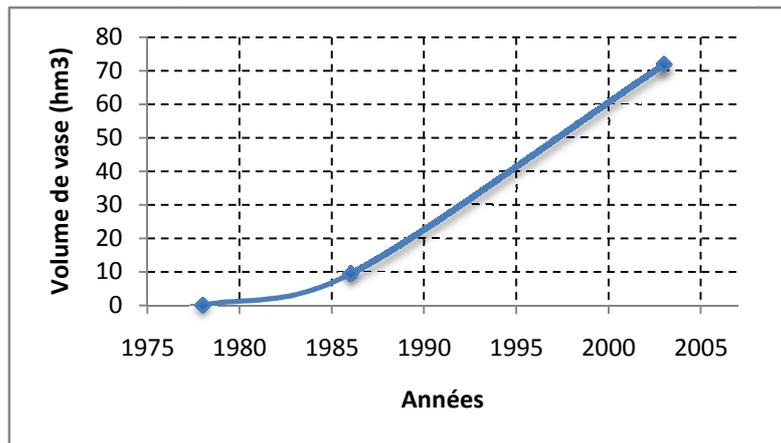


Figure IV.4 : Evolution temporelle de l'envasement du barrage S.M.B.A.

D'après l'évolution de l'allure du graphe nous remarquons que l'envasement du barrage S.M.B.A n'est pas un phénomène linéaire, il est lié aux conditions locales de la zone en question à savoir :

- L'instabilité de la pluviométrie au courant des années (évolution temporelle);
- L'agressivité des pluies;
- Les fluctuations des quantités de matériaux érodés du bassin versant;
- Les variations annuelles du transport solide dans les oueds;
- L'absence ou l'existence de chasses des courants de densité en périodes des crues;
- La compétence des gestionnaires du barrage;
- Restant soumise à l'autorité administrative et échappant aux directives techniques les consignes d'exploitation du barrage n'ont pu être appliquées à la lettre.

D'après [Achite et Meddi\(2005\)](#). La variation du taux des apports solides et liquides entre stations peut s'expliquer d'une part par la variabilité du régime d'écoulement dans les sous-bassins étudiés (variabilité spatio-temporelle des précipitations) et d'autre part par la variabilité des caractéristiques hydromorphométriques où le transfert des matières en suspension se produit au cours des crues violentes qui surviennent généralement en automne.

IV.3.2. Evolution spatiale de la retenue du barrage entre (1978/2003)

Huit profils en travers ont été réalisés sous Topocadversion 3.0

Quatre profils en travers sont communs avec ceux levés par le bureau d'étude Geokart (P1 : du point B52 au point B1, P4 : du point B50 au point B2, P16 : du point B41 au point B8, P18 : du point B40 au point B10). Quatre autres profils ont été choisis par le consortium LEM/GEOID. Ces profils ont été retenus en fonction de plusieurs critères :

- Points denses dans la zone désirée;
- Zone en courbe où l'envasement est plus important;
- Une répartition correcte le long du chantier.

Ces profils sont nommés PGL1 (du point SGL7 à SGL8), PGL2 (du point SGL1 à SGL2), PGL3 (du point SGL3 à SGL4), PGL4 (du point SGL6 à SGL5) (figure IV.5).

L'échelle horizontale de ces profils correspond à l'échelle du plan topographique et bathymétrique soit du 1/5000. Ce choix permet une meilleure lecture des plans. L'échelle verticale a été fonction du plan de comparaison et des profils existants (1978 et 1986).

En effet, les profils de 1978 et de 1986 ont été reportés à partir d'un scan des plans existants avec mise à l'échelle (figure IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9) (Geoid, 2003).

Remarque : Compte tenu de l'objet de notre étude qui porte sur l'évaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A, nous allons prendre en considération seulement les profils en travers ayant présenté une évolution au cours des années (1978/1986/2003). Le tableau (IV.2) illustre les diverses dénivelées maximales entre les différentes campagnes de levé bathymétrique.

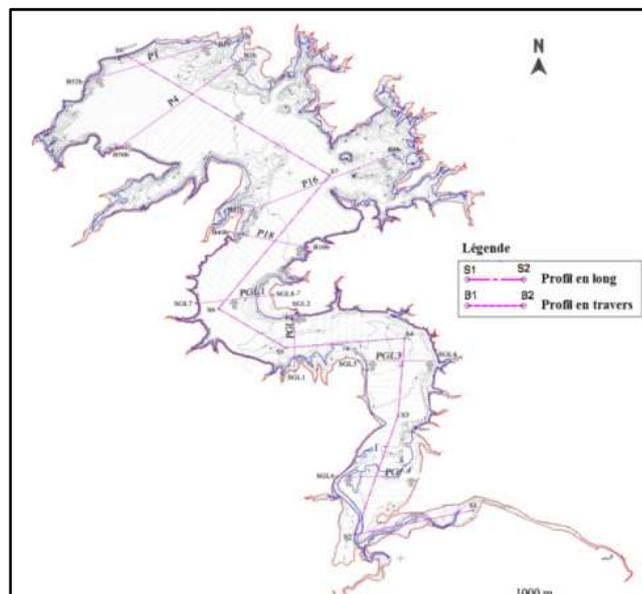


Figure IV.5 : Plan de position des profils en travers (Geoid, 2003).

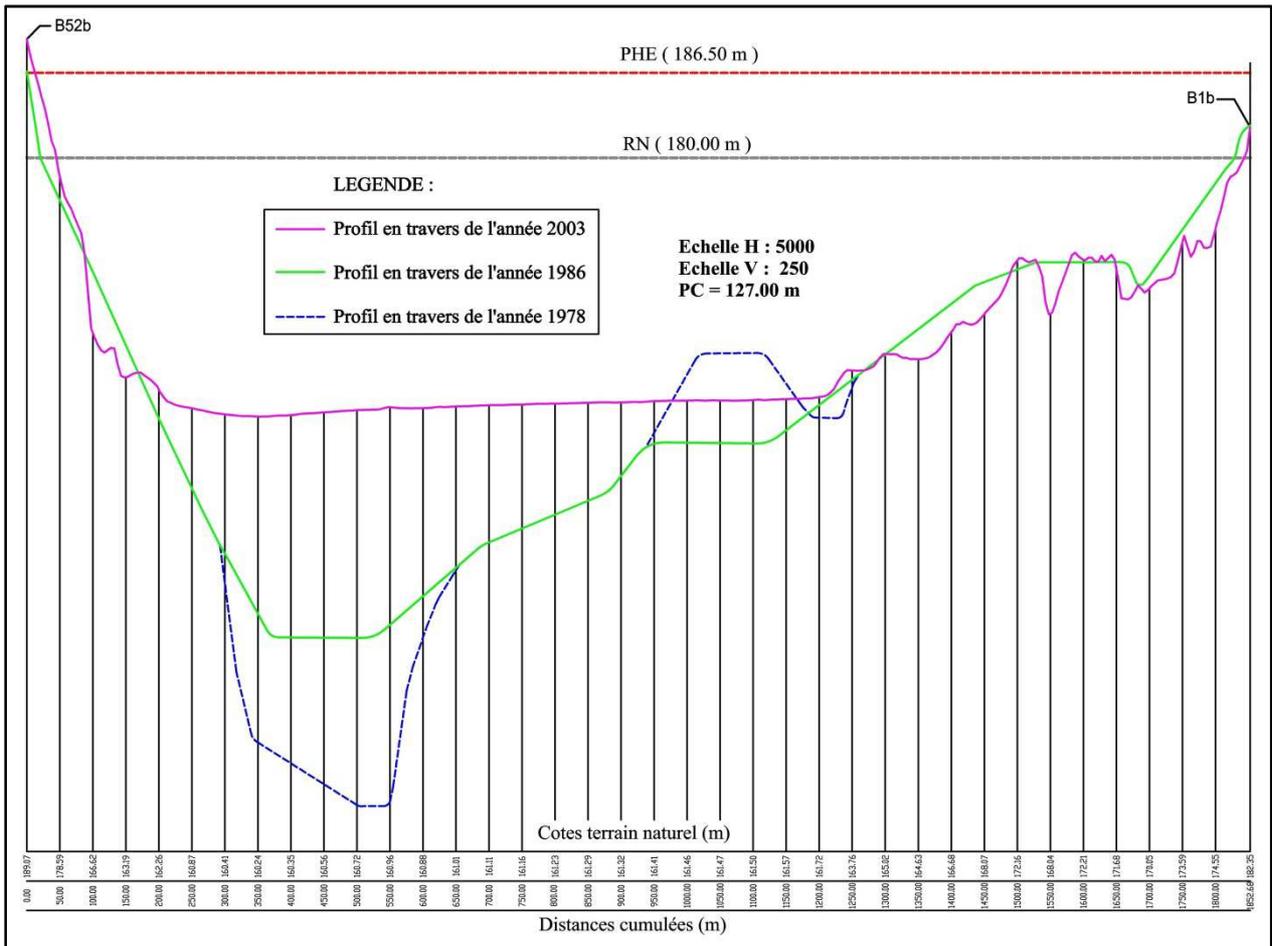


Figure IV.6 : Profil en travers P1(Geoid, 2003).

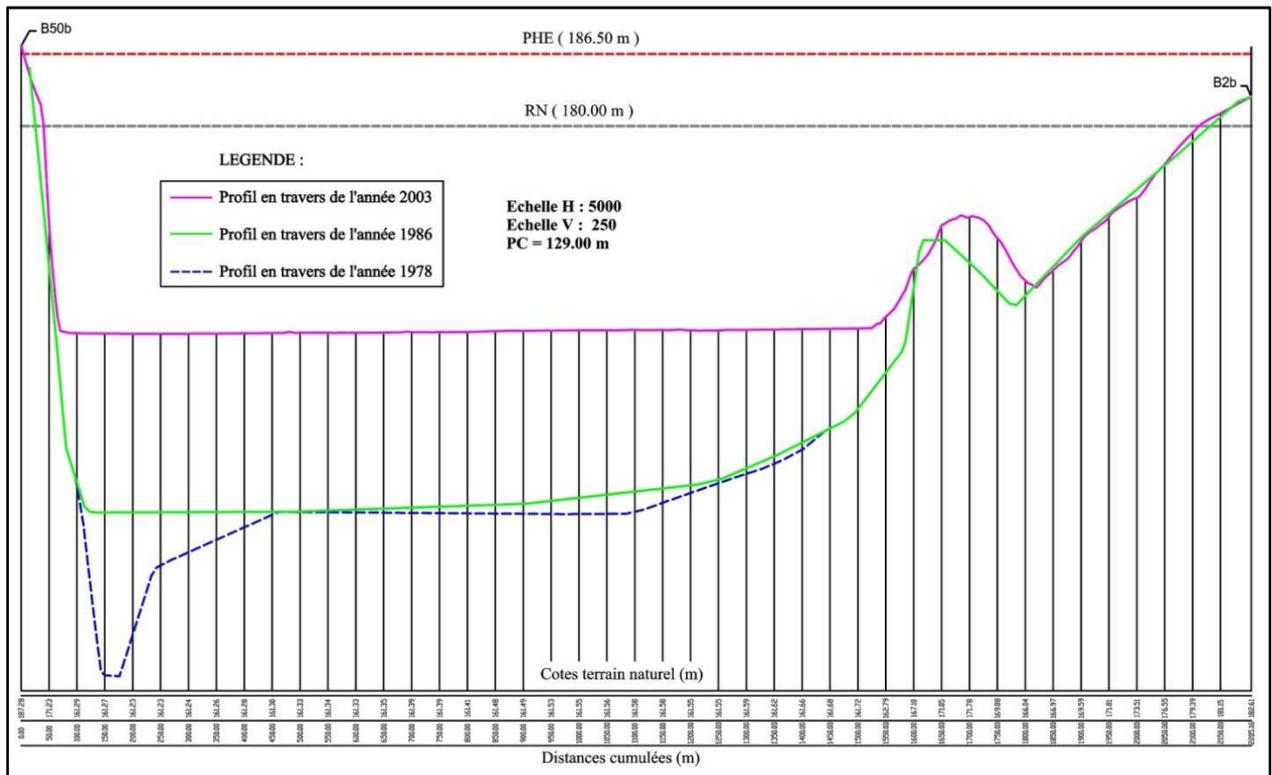


Figure IV.7 : Profil en travers P4(Geoid, 2003).

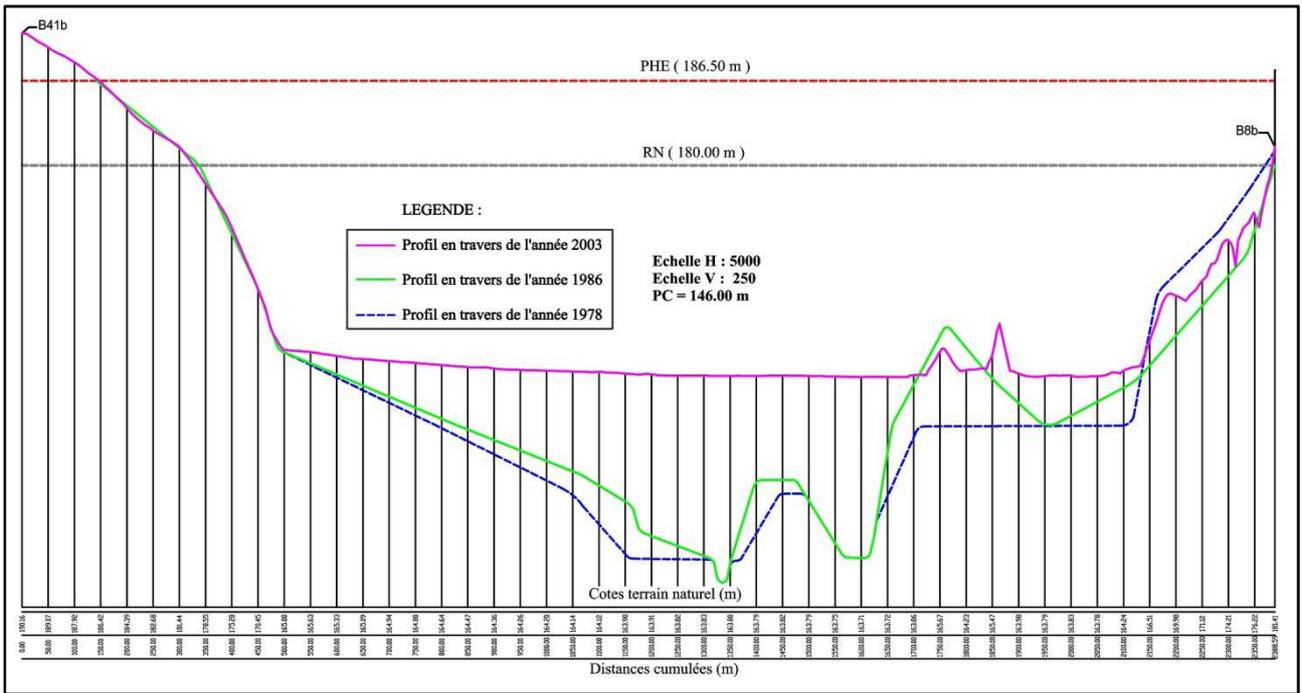


Figure IV.8 : Profil en travers P16(Geoid, 2003).

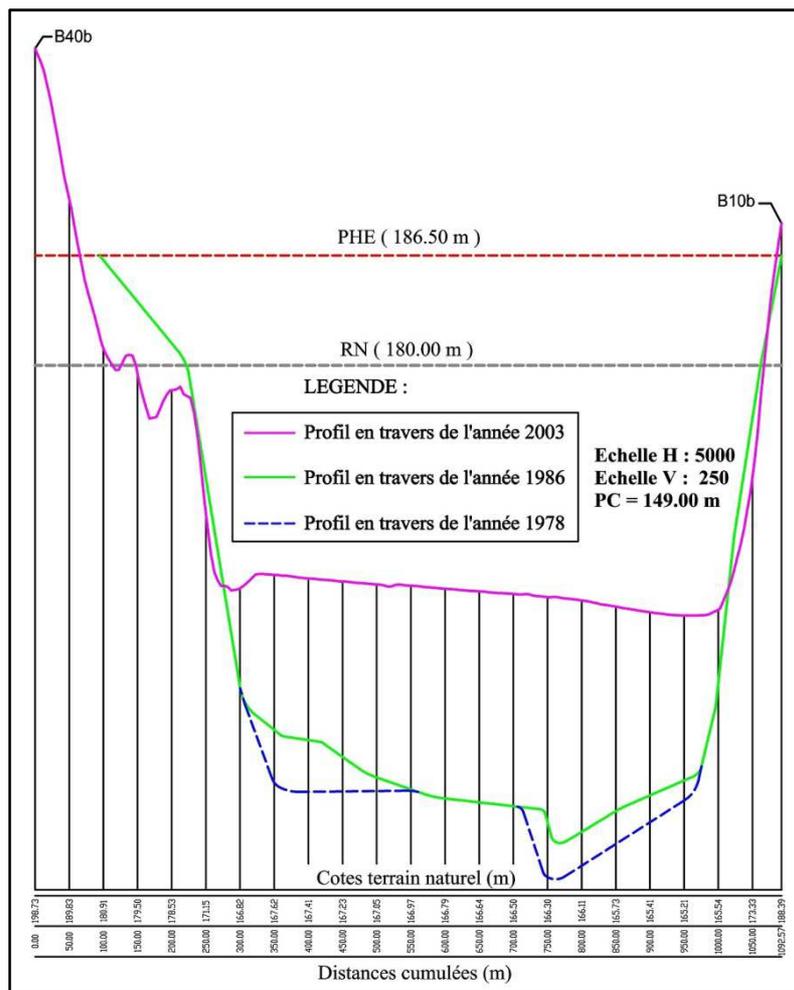


Figure IV.9 : Profil en travers P18(Geoid, 2003).

Tableau IV.2 : Dénivelées entre les différents profils en travers de la retenue du barrage S.M.B.A au fil des années (1978/2003).

Profil	Côtes NGA (m) 1978	Côte NGA (m) 1986	Dénivelée max (m) 1978 / 1986
P1	130,5	143,9	13,4
P4	130,3	145,1	14,8
P16	159,9	167,5	7,6
P18	149,6	151,9	2,3
/	Côte 1986 (m)	Côte 2003 (m)	Dénivelée max (m) 1986 / 2003
P1	143,9	160,9	17,0
P4	145,1	161,2	16,1
P16	147,9	161,9	13,9
P18	151,9	166,3	14,4
/	Côte 1978 (m)	Côte 2003 (m)	Dénivelée max (m) 1978 / 2003
P1	130,5	160,9	30,4
P4	130,3	161,2	30,9
P16	147,9	161,9	13,9
P18	149,6	166,3	16,7

IV.3.2.1. Analyse et interprétation des résultats

a/ Profil en travers P1

En l'espace de 8 ans (1978/1986) une dénivelée de 13,4m a été enregistrée par l'entreprise GEOKART et entre (1986/2003) ce fut presque la même hauteur relevée (17 m) par l'entreprise GEOID.

Le profil P1 est situé près de la digue du barrage, cette zone est considérée comme zone de dépôts car presque tout les sédiments érodés du bassin versant sont acheminés par les oueds. Ces particules sont transportés jusqu'à ce que les lignes de courants soient stoppées par les vannes de vidange fermées et la digue du barrage (figure IV.10 et IV.11), il faut ajouter une certaine quantité des sédiments érodés dans les deux rives du barrage.

b/ Profil en travers P4

En 1986 le niveau du lit de l'oued a augmenté de 14,8m, en le comparant à celui de l'année 2003 il a encore augmenté de 16,1m mais la quantité de sédiments est considérable, d'après le profil horizontal on déduit que le profil P4 correspond à une zone de repos total loindu rayon d'action lors de l'ouverture de la vanne de vidange.

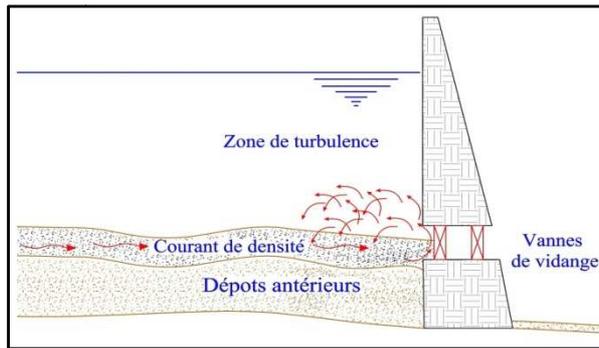


Figure IV.10 : Rupture des lignes de courant du courant de densité.

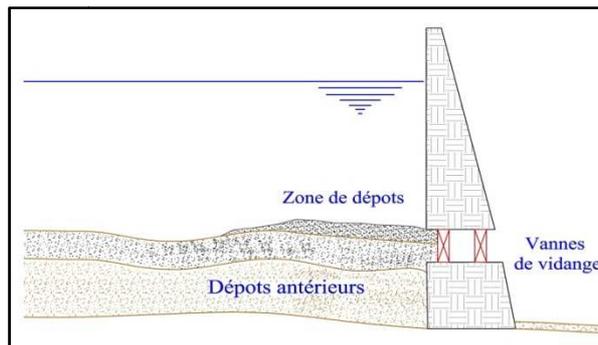


Figure IV.11 : Dépôts des sédiments près de la digue.

c/ Profil en travers P16 et P18

Les profils en travers se trouvent dans une méandre caractérisée par une érosion d'autant plus rapide que la crue est violente. Ces érosions particulièrement accentuées dans les zones concaves des méandres, font reculer les berges et sont à l'origine de la déformation des lits des rivières. Ce recul des berges peut être parfois excessivement rapide (figure IV.12).

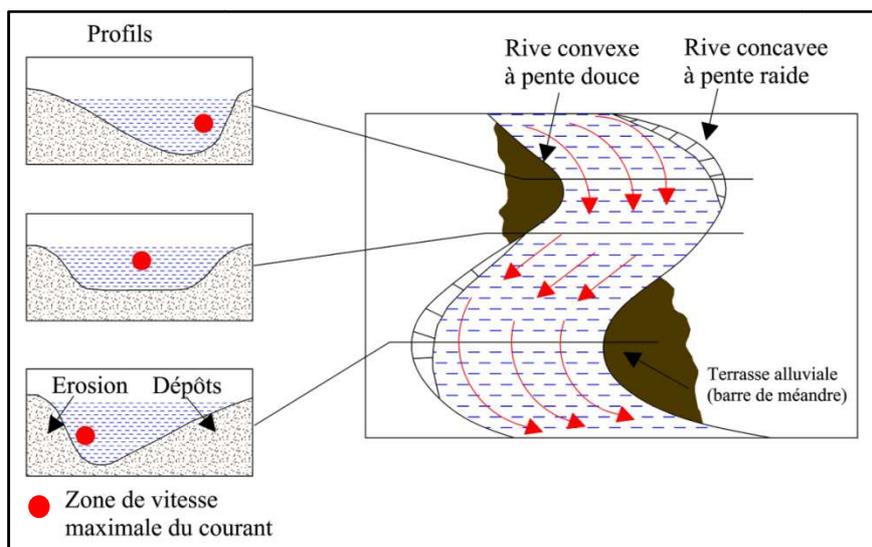


Figure IV.12 : Erosion des berges.

IV.3.3.Évolution de la topographie de la retenue du barrage S.M.B.A

La figure (IV.13) a été élaborée avec la combinaison de plusieurs logiciels notamment : **Autocad 2007, Covadis 8.1, Ulead Photo Impact 7.0...**etc, en effet la superposition du levé topographique avant la mise en eau du barrage avec le levé bathymétrique de 1986 et celui de 2003 ont montré :

- Une dénivelée due a la sédimentation relevée entre 1978 et 2003 avec un maximum de 30,27m et un minimum de 1,78m;
- Dans certains points une érosion du lit de l'oued a été enregistrée allant de -0,92 à -7,85m;

Remarque :Le signe (-) signifie une dépression due à une érosion du lit de l'oued.

La variation de la topographie au fil des années s'explique par :

- Les crues d'automne survenant après de longs mois de sécheresse fortement chargée (Achiteet Meddi 2005);
- Le retard de plusieurs jours apporté à l'ouverture des vidanges par le fait que le chef d'exploitation n'était pratiquement pas libre de procéder aux manœuvres nécessaires, toute chasse constituant une gêne pour l'aval et apparaissant peut être aux autorités locales comme un gaspillage inadmissible (Coyne et bellier, 1985);
- Les dépressions dues aux lignes de courants provoquées par les fortes crues.

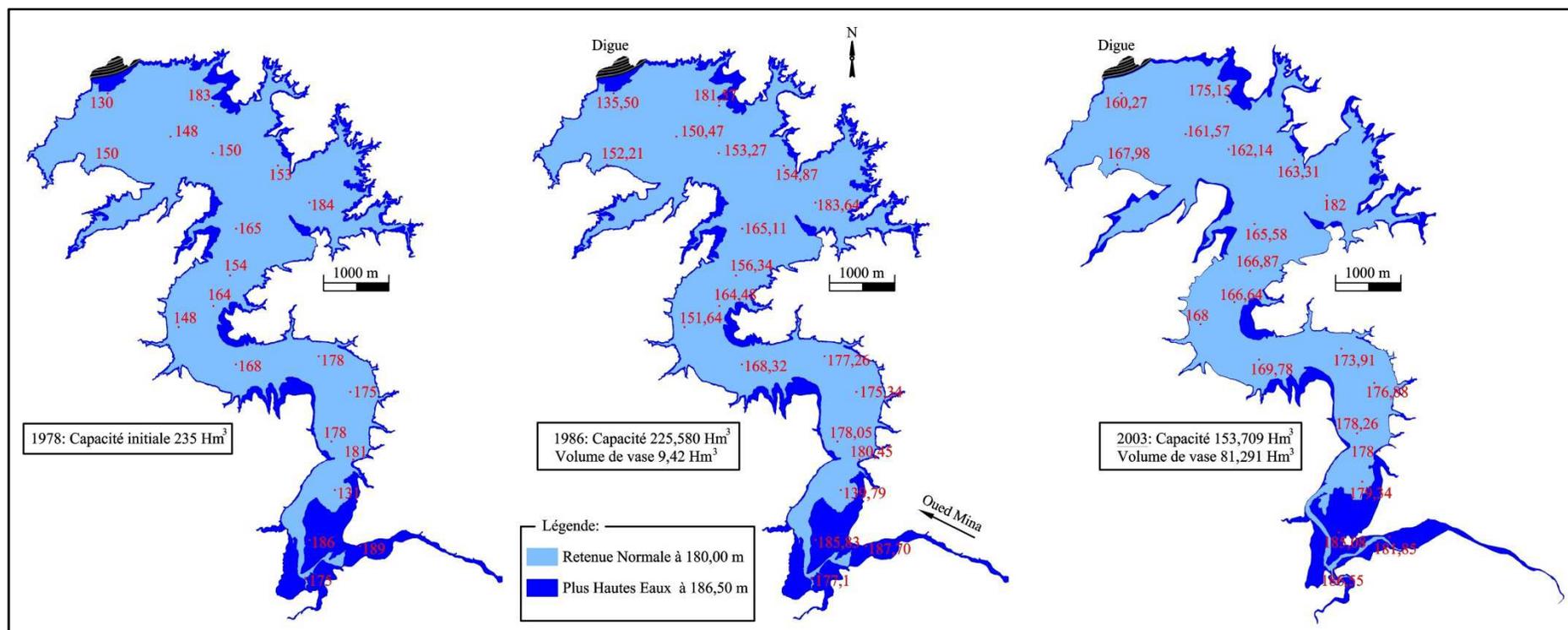


Figure IV.13 : Evolution de la retenue du barrage S.M.B.A entre 1978 et 2003.

IV.4. Etat des lieux de la retenue du barrage S.M.B.A

Au moyen d'une embarcation maritime avec l'agent d'exploitation du barrage S.M.B.A, nous avons photographié l'état des lieux des berges près de la digue et à l'amont du barrage. La cote du plan d'eau sur l'échelle limnimétrique était à 171m ce qui correspond à un volume de 55,230Hm³ avec une surface de 863,02ha. Le facteur gênant notre inspection est dû à l'inondation partielle de la retenue du barrage limitant en partie le déroulement de nos opérations (figure IV.14).

Suite à notre visite des berges de la retenue du barrage, nous avons noté les observations suivantes :

- L'exode rural de plusieurs habitants en amont et à proximité même du barrage (photo IV.1);
- La présence de pâturages malgré l'exode rural (photo IV.2);
- La présence de toutes les formes de manifestation de l'érosion hydrique (photo IV.3);
- Les glissements et effondrements rocheux qui réduisent la capacité du barrage (photo IV.4);
- La présence de pompage illicite (photo IV.5).

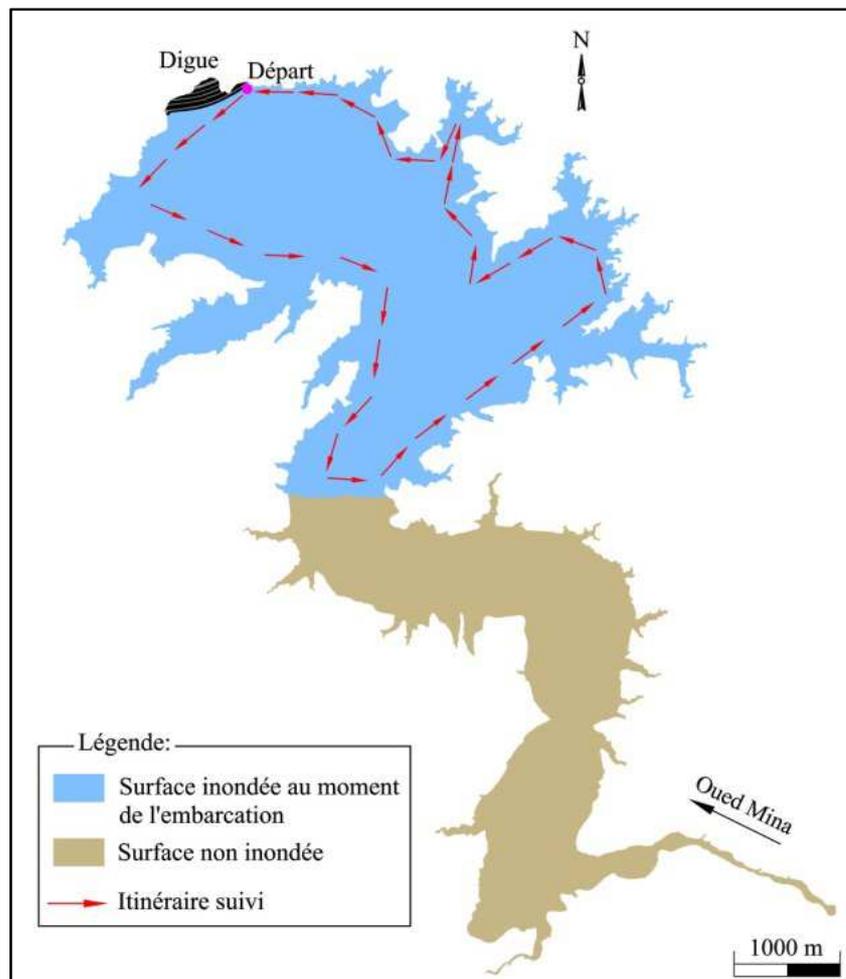


Figure IV.14 : Itinéraire de l'embarcation dans la retenue du barrage S.M.B.A.



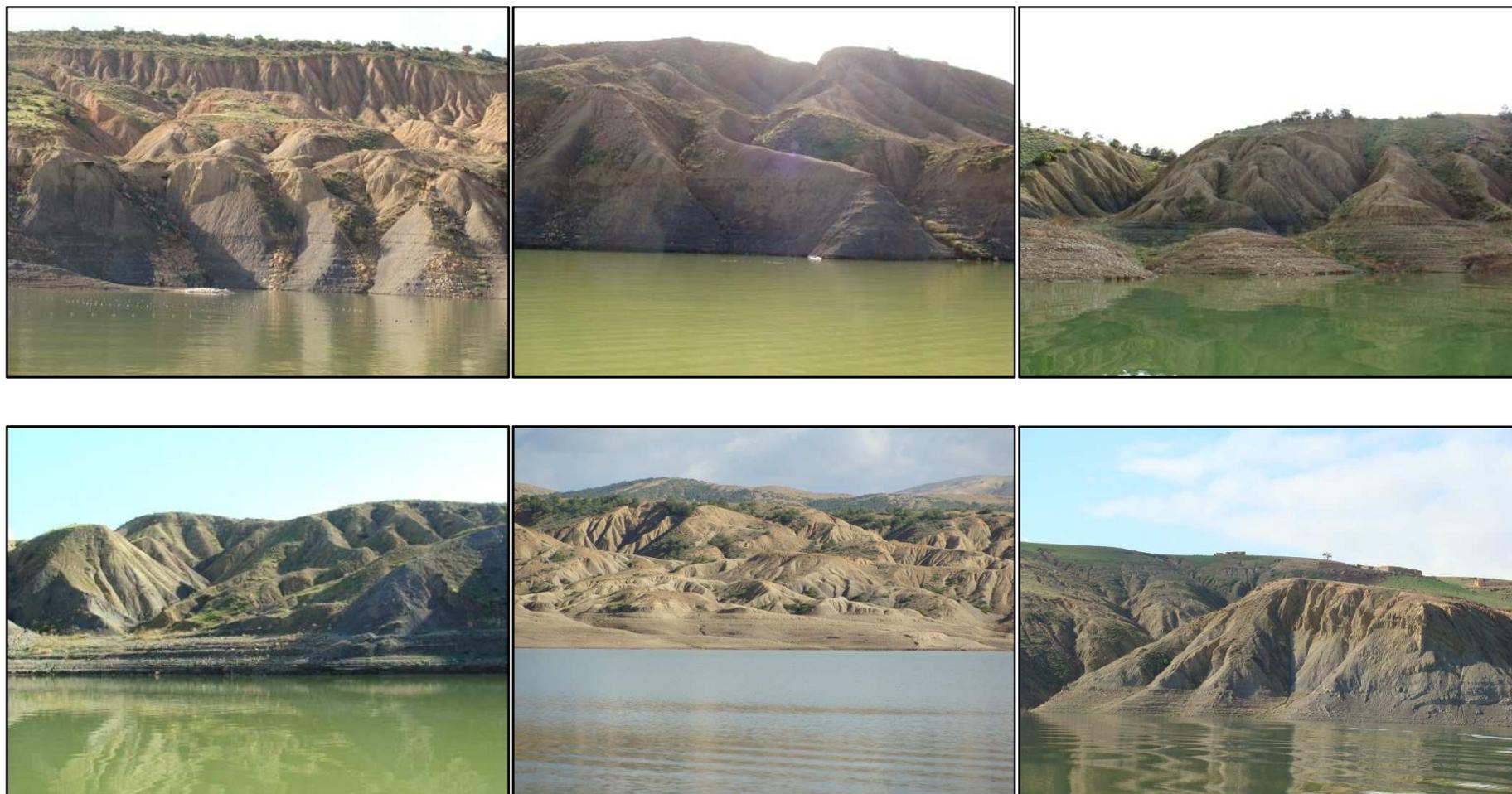
Cliché, TOUBAL A.K (27/12/2012)

PhotoIV.1 : Exode rural.



Cliché, TOUBAL A.K (27/12/2012)

PhotoIV.2 : Surpâturage sur les berges du barrage S.M.B.A.



Cliché, TOUBAL A.K (27/12/2012)

PhotoIV.3 : Erosion hydrique des berges du barrage S.M.B.A.



Cliché, TOUBAL A.K (27/12/2012)

PhotoIV.4 : Glissement rocheux.



Cliché, TOUBAL A.K (27/12/2012)

PhotoIV.5 : Pompage illicite.

IV.5. Modèle P.I.S.A (Previsioni Interimento Serbatoi Artificiali)

IV.5.1. Historique

P.I.S.A est un modèle de prédiction de l'envasement dans les réservoirs artificiels (en italien: Previsioni Interimento Serbatoi Artificiali). Il a été utilisé dans 42 ouvrages de mobilisation italiens (barrages) par Bazzofi et al. (1996, 1997, 1998, 2000, 2003), Ouechtati et Baldassare, (2011) en Tunisie et Benkhadja et al, (2012) en Algérie.

IV.5.2. Définition

Le modèle de prévision de l'envasement dans les réservoirs artificiels (P.I.S.A) est un modèle paramétrique statistique de régression linéaire multiple, conçu pour l'évaluation de la sédimentation dans les réservoirs. Il a été formulé pour être facilement et rapidement applicable, sans avoir besoin de données recueillies directement sur terrain, mais à partir des variables d'entrée obtenue à partir de la cartographie traditionnelle et l'analyse des séries chronologiques des variables hydrologiques.

IV.5.3. Equation du modèle

Le modèle P.I.S.A se base sur des paramètres climatiques, morphologiques et physiques d'un bassin versant, qui peut fournir une prévision du taux moyen annuel de sédimentation dans les réservoirs artificiels exprimées en $m^3.Km^{-2}$ de sédiments. Il permet alors une estimation indirecte de l'érosion des sols en amont du barrage (formule IV.1) (Benkhadja et al., 2012).

$$Y = 425,9334 - 1,3898 A + 102,9576 (S_{ER})^{0,5} - 9,84435 P_{EN} - 0,31 \bar{p} + 116,718 D \quad (IV.1)$$

Avec:

Y: Indice de sédimentation exprimé par le volume annuel de sédiments humides versés dans le barrage par unité de surface du bassin versant en ($m^3.Km^{-2}$);

A: Superficie du bassin versant en (Km^2);

S_{ER}: La surface érodable correspondant à la surface cultivable ajoutée à 1/16 de la surface non cultivée agroforestière en (Km^2);

P_{EN}: Pente moyenne du bassin versant en (Grades);

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

D: Densité de drainage en ($Km.Km^{-2}$).

IV.5.4. Avantages du modèle P.I.S.A

L'avantage de ce modèle réside dans la formulation pour une application en phase de projet de construction d'un barrage dans des zones aux données hydrologiques insuffisantes voire absentes. Le second avantage réside dans son applicabilité à des bassins versants de différentes tailles, contrairement au modèle universel de perte en sol USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier et Smith, 1978) par exemple qui n'est applicable qu'au niveau d'une parcelle expérimentale.

Toutefois, le modèle peut être utilisé pendant la phase de fonctionnement du réservoir, pour :

- Assurer la gestion et les actions y afférentes;
- Réduire les arrivées de sédiments au niveau du barrage et les impacts négatifs qui en découlent sur l'environnement (Bazzoffi et Baldassarre, 2000);
- Rétablir la capacité d'origine de la retenue du barrage (Ouechtati et Baldassarre, 2011).

IV.6. Quelques travaux réalisés

IV.6.1. En Algérie

Pour la première fois en Algérie Benkhadja et al. (2012) ont évalué l'envasement du barrage K'sob appartenant au bassin versant de l'oued K'sob avec le modèle P.I.S.A. Le résultat final établi par ce modèle est $Y=1822 \text{ m}^3\text{Km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Soit une érosion spécifique annuelle égale à 2915 tKm^{-2} . Cette étude atteste de la fiabilité du modèle P.I.S.A pour l'estimation des pertes en sols et l'envasement d'un barrage dans une zone semi-aride.

IV.6.2. En Tunisie

Pour la première fois en Tunisie Ouechtati et Baldassarre (2011) ont évalué l'envasement des barrages de Siliana et Lakhmess situés dans le bassin versant de Siliana.

Les résultats trouvés pour les deux bassins sont illustrés dans le tableau (IV.3)

Tableau IV.3 : Indice d'envasement pour les bassins versants de Siliana et de Lakhmess.

Bassin étudié	A (Km ²)	S _{ER} (Km ²)	P _{en} (%)	P (mm)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)
LakHmess	117,80	80,88	8,79	500	1356,60	2034,90
Siliana	1036,62	779,43	7,47	470	2025,10	3037,65

L'indice d'envasement estimé avec le modèle P.I.S.A pour le bassin versant est égal à $1356,6 \text{ m}^3/\text{Km}^2.\text{an}$, l'intégration des volumes de désenvasement des barrages dans les calculs des volumes de sédiments implique une nette tendance à l'augmentation des valeurs réelles des pertes en sols.

Ainsi, ils ont constaté, pour le barrage de Siliana, une compatibilité entre les estimations issues du modèle P.I.S.A et les mesures réelles.

IV.7.Evaluation de l'envasement du barrage S.M.B.A

IV.7.1.Méthodologie à suivre

En appliquant le modèle P.I.S.A sur le bassin versant de l'oued Mina (4900 Km²) on obtient une valeur négative, ce qui explique qu'il n'est applicable que pour les micros bassins; pour ce faire on procède à la digitalisation du découpage des sous-bassins établis par l'A.N.R.H sur la carte du Réseau Hydroclimatologique et de la Surveillance de la Qualité des Eaux (Edition 2005).

IV.7.2.Calcul des paramètres du modèle

IV.7.2.1.Surface érodable

La surface érodable est définie comme étant la superficie vulnérable à la dégradation sous l'influence des facteurs naturels et anthropiques.

Le regroupement des surfaces caractéristiques (surfaces cultivables et non cultivables) a été réalisé au moyen du logiciel MapInfo à partir de la carte d'occupation des sols du bassin versant de l'oued Mina dont la date de l'image satellite est celle de « 2003 » d'une résolution de « 30 m » (figure IV.15) à savoir :

- Les surfaces cultivables constituent les étendues où l'homme intervient dans un but économique (agriculture, ... etc);
- Les surfaces non cultivables correspondent aux étendues boisées, relativement denses, occupées par un ou plusieurs peuplements d'arbres et d'espèces associées où l'homme n'intervient pas (forêts, ... etc).

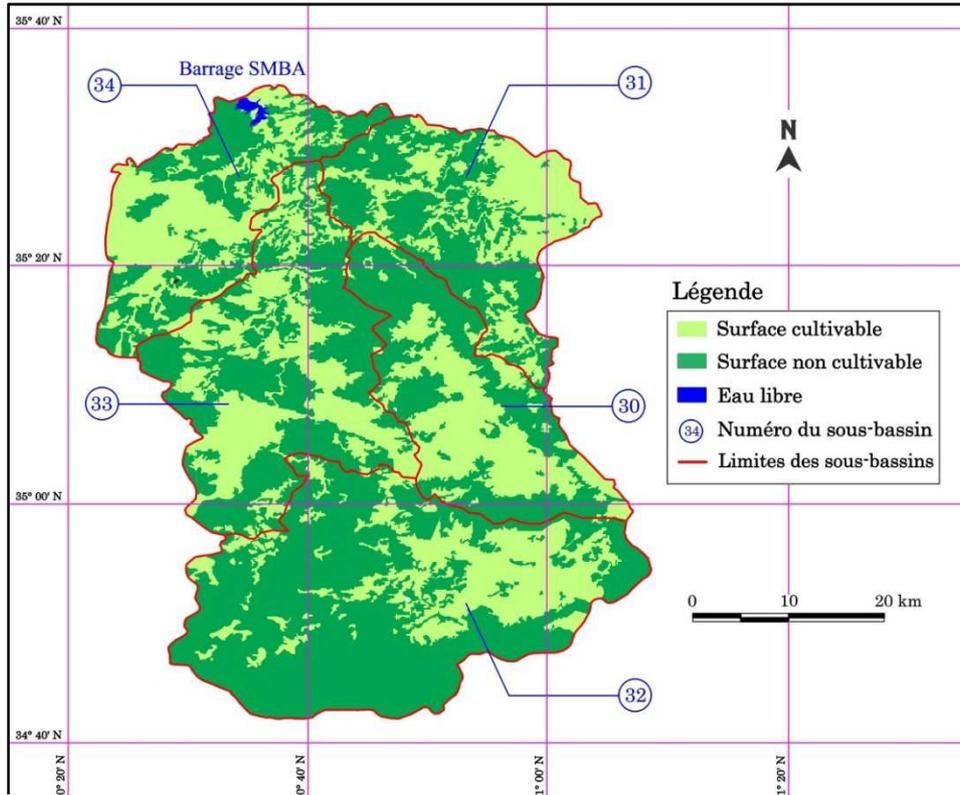


Figure IV.15 : Surfaces caractéristiques du bassin versant de l’oued Mina.

Les surfaces cultivables et non cultivables sont déduites de la carte des surfaces caractéristiques, la formule (IV.2) illustre le calcul de la surface érodable.

$$S_{ER} = S_c + \left(\frac{1}{16}\right) \cdot S_{nc} \text{ (IV.2)}$$

avec :

S_{ER} : Surface érodable du sous-bassin considéré en (Km²);

S_c : Surface cultivable, elle concerne les terres agricoles en (Km²);

S_{nc} : Surface non cultivées agroforestière en (Km²).

Le tableau (IV.4) rassemble les calculs relatifs à la surface érodable de la zone d’étude.

Tableau IV.4 : Surface érodable de chaque sous bassin.

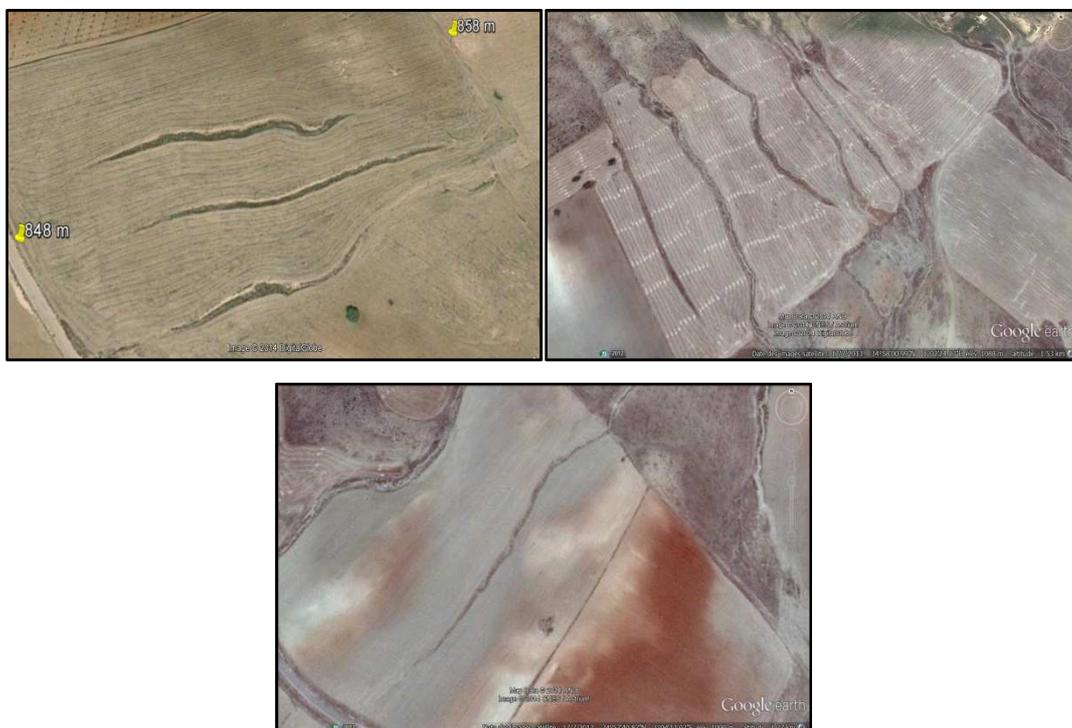
Sous-bassin	A (Km ²)	Surface cultivable (Km ²)	Surface non cultivable (Km ²)	Surface cultivable (%)	Surface non cultivable (%)	Surface érodable (Km ²)	Surface érodable (%)
30	753,3	304,34	448,96	40,40	59,60	332,40	44,13
31	900,0	299,23	600,77	33,25	66,75	336,77	37,42
32	1488,0	261,25	1226,75	17,56	82,44	337,92	22,71
33	1063,2	322,54	740,66	30,34	69,66	368,83	34,69
34	695,5	232,71	462,79	33,46	66,54	261,63	37,62

a/ Analyse et interprétation des résultats

Le sous-bassin 30 occupe une grande surface érodable avec un pourcentage de 44,13%, alors que Les sous-bassins (31-33-34) présentent des résultats rapprochant de la surface érodable. La partie sud du sous-bassin 32 ne révèle que 22,71%.

D'après les calculs effectués, la surface érodable affecte surtout les surfaces cultivables. Cette prédominance touche les sols labourés vulnérables à tous les facteurs naturels de nature à dégrader leur état physique tel que : le martèlement par l'impact Splash, le facteur anthropique dû en grande partie à l'agriculteur qui a tendance à labourer le sol suivant la pente alors qu'il aurait dû les réaliser en parallèle aux courbes de niveau. C'est pourquoi en période de crue, le ruissellement associé à la pente crée une érosion en rigole qui se métamorphose avec le temps si elle n'est pas traitée à temps (figure IV.16). La surface érodable semble avoir une influence significative sur la vitesse de sédimentation (le signe du coefficient de régression associé à la variable est positif); plus la surface érodable est grande, plus la production de sédiments est élevée (Testa, 2000).

En Algérie, sur des parcelles peu couvertes, pendant les orages d'automne, le ruissellement journalier maximal est passé de 19 à 32 % jusqu'à atteindre 70-85 % lors des averses importantes en hiver (Arabi et Roose, 1989).



Google Earth, (2013)

Figure IV.16 :Présence d'érosion dans un sol labouré (bassin versant de l'oued Mina).

IV.7.2.2.Pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant

S'étalant depuis la mise en eau du barrage S.M.B.A jusqu'au dernier levé bathymétrique (1978/2003), 18 stations pluviométriques du bassin versant ont été mises en étude pour l'estimation de la pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant.

a/ Polygones de Thiessen

1/ Méthodologie entamée

Vu l'applicabilité du modèle P.I.S.A sur les micros-bassins on est contraint d'appliquer la méthode des polygones de Thiessen sur chaque sous-bassin formant le bassin versant de l'oued Mina.

Avec le Module(**Vertical Mapper**) on a pu appliquer les polygones de Thiessen sur la zone d'étude (figure IV.17). En isolant chaque sous-bassin on obtient les surfaces des zones d'influence de chaque poste pluviométrique. Les résultats obtenus avec la méthode de Thiessen sont définis dans le tableau (IV.5).

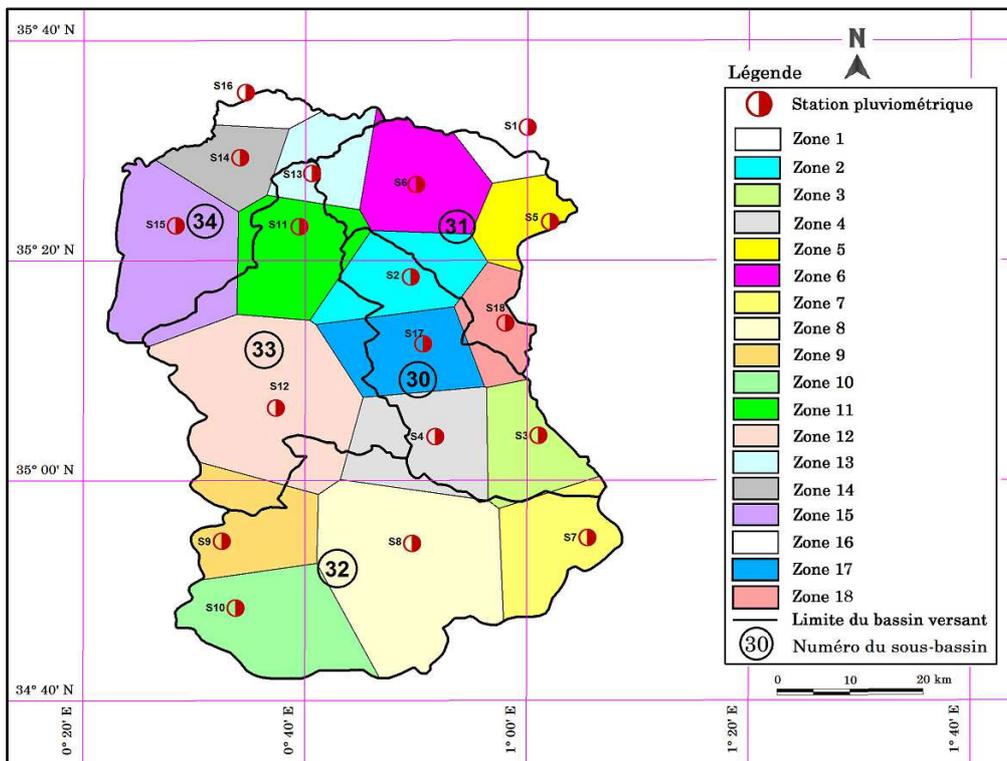


Figure IV.17 : Polygones de Thiessen du bassin versant de l'oued Mina.

En analysant les polygones de Thiessen nous remarquons que la station 8 détient la plus grande zone d'influence avec une superficie de 624,57Km² localisée dans le sous-bassin 32. La plus petite concerne la station 6 avec 3,4Km² dans le sous-bassin 34.

Tableau IV.5 : Pluviométrie moyenne annuelle des sous-bassins.

Sous-bassin	A (Km ²)	Paramètre	S2	S3	S4	S7	S11	S17	S18		P _{moy} (mm)
30	753,3	Ai (Km ²)	126,70	191,70	185,50	14,70	12,27	183,71	38,73	/	305,9
		P _{moy} (mm)	318,3	358,1	278,8	312,3	247,2	239,0	470,1		
31	900	Paramètre	S1	S2	S5	S6	S11	S13	S17	S18	327,0
		Ai (Km ²)	95,05	90,22	172,13	346	17,62	68,51	1,074	109,4	
		P _{moy} (mm)	334,2	318,3	334,3	298,7	247,2	246,9	239,0	470,1	
32	1488	Paramètre	S3	S4	S7	S8	S9	S10	S12	/	236,1
		Ai (Km ²)	4,66	56,57	235,54	624,57	173,07	340,44	53,14		
		P _{moy} (mm)	358,1	278,8	312,3	169,9	269,6	278,8	237,9		
33	1063,2	Paramètre	S2	S4	S9	S11	S12	S13	S15	S17	248,9
		Ai (Km ²)	37,30	63,72	71,06	199,63	542,46	38,00	53,43	57,60	
		P _{moy} (mm)	318,3	278,8	269,6	247,2	237,9	246,9	267,2	239,0	
34	695,5	Paramètre	S6	S11	S13	S14	S15	S16		/	250,7
		Ai (Km ²)	3,40	24,74	72,02	155,43	374,70	65,21			
		P _{moy} (mm)	298,7	247,2	246,9	227,6	267,2	214,4			

avec :

A : Superficie du sous-bassin en (Km²);

Ai : Superficie de la surface d'influence du poste pluviométrique en (Km²);

Pi : Pluviométrie moyenne annuelle de la station pluviométrique (1978/2003) en (mm);

Si : Station pluviométrique;

P_{moy} : Pluviométrie moyenne annuelle du sous-bassin considéré en (mm).

b/ Analyse et interprétation des résultats

L'application des polygones de Thiessen indique une valeur maximale de 327mm pour le sous-bassin 31, alors qu'une valeur minimale de 236,1 mm est enregistrée au niveau du sous-bassin 32, les deux sous-bassins 33 et 34 présentent des valeurs presque identiques respectivement 248,9 et 250,7mm. La pluviométrie moyenne du sous-bassin 30 est estimée à 305,9 mm.

L'examen de la pluviométrie moyenne annuelle de chaque sous-bassin nous permet de noter une décroissance d'Est en Ouest et du Nord au Sud à cause des facteurs ci-dessous énumérés :

- L'altitude de positionnement des postes pluviométriques;
- L'exposition des stations pluviométriques;
- La caractéristique de la variabilité spatiale de la pluviométrie au Nord de l'Algérie qui varie d'Est en Ouest;
- La variabilité des vents caractérisant la zone;
- Situation du sous-bassin 32 aux portes du grand sud (éloignement par rapport à la mer).

IV.7.2.3. Pente moyenne de chaque sous-bassin

L'approche méthodologique présentée dans cette partie consiste au calcul de la pente moyenne propre à chaque sous-bassin (figure IV.18) en considérant les paramètres liés aux calculs (tableau IV.6).

Remarque : la formule de la pente moyenne est mentionnée dans la page 17.

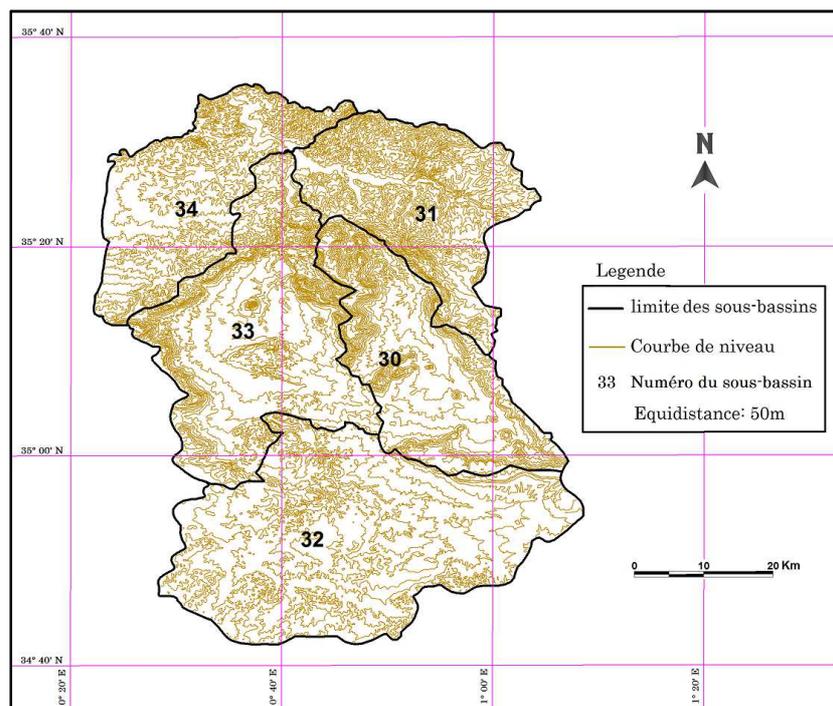


Figure IV.18 : Carte topographique du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau IV.6 :Détermination de la pente moyennede chaque sous bassin.

Sous bassin	A (Km ²)	D (m)	L (Km)	Im (‰)	Im (%)	Im (Grade)
30	753,3	50	1805	119,8	11,98	7,60
31	900,0	50	2265	125,8	12,58	7,98
32	1488,0	50	2269	76,2	7,62	4,84
33	1063,2	50	2473	116,3	11,63	7,38
34	695,5	50	1664	119,6	11,96	7,59

a/ Analyse et interprétation des résultats

Le sous-bassin 32 représente la pente moyenne la plus faible du bassin versant avec 7,62%, ceci revient à ce que cette zone située aux portes du Sud. Le sous-bassin 31 reste le plus accidenté avec une pente moyenne de 12,58%. Les sous-bassins (30-33-34) présentent des résultats rapprochant dans un intervalle allant de 11,63 à 11,98 %.

Nous remarquons un resserrement des courbes de niveaux élevé dans le sous-bassin 31, conséquence d'une zone accidentée à l'inverse du sous-bassin 32 où les courbes de niveaux espacées mettent en évidence un terrain assez fort. Les sous-bassins (30-33-34) présentent une topographie presque identique.

IV.7.2.4.Densité de drainage

La méthode présentée dans cette partie est l'isolation totale de chaque sous-bassin(figure IV.19) et le calcul de chaque densité de drainage propre au sous-bassin (tableau IV.7). La formule de la densité de drainage est mentionnée dans la page 17.

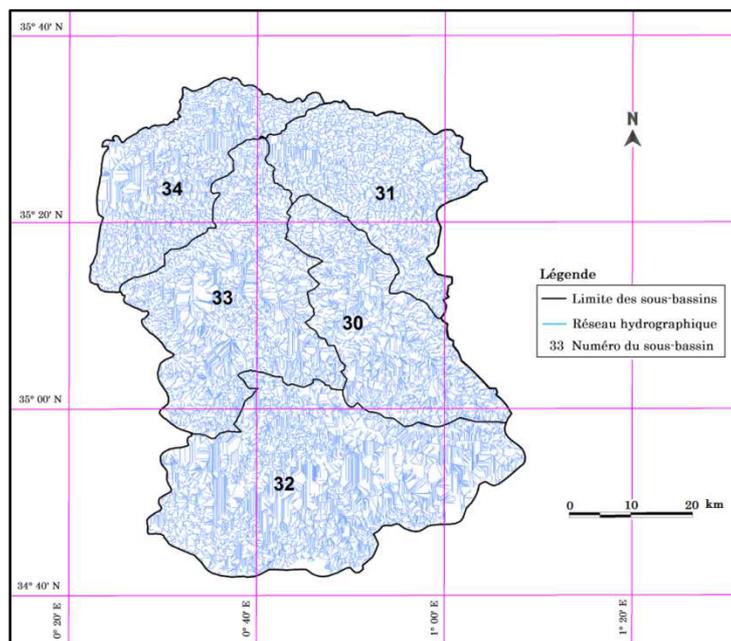


Figure IV.19 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau IV.7 : Densité de drainage de chaque sous-bassin.

Sous bassin	A (Km ²)	Li (Km)	D _d (Km/Km ²)
30	753,3	2444	3,24
31	900,0	2325	2,58
32	1488,0	5823	3,91
33	1063,2	3767	3,54
34	695,5	2304	3,31

a/ Analyse et interprétation des résultats

Le sous-bassin 32 de meure le siège d'une forte densité de drainage de 3,91 Km/Km² ainsi que le sous-bassin 33 avec un taux de 3,54 Km/Km², les autres sous-bassins affichent des valeurs rapprochées dans une fourchette allant de 2,58 à 3,31 Km/Km².

Ces résultats obtenus indiquent que nos sous bassins versants sont en général assez bien drainés. L'importance du drainage est due principalement à la nature des formations qui constituent le bassin ainsi qu'aux pentes assez fortes des versants d'une part et d'autre part au régime pluviométrique, caractérisé par ses pluies irrégulières et violentes.

La densité de drainage est liée positivement à la sédimentation comme en témoignent les résultats de nombreuses études, elle est en mesure d'expliquer en grande partie la variabilité du phénomène d'érosion. Elle prend en compte de nombreux facteurs physiographiques tels que: la capacité d'infiltration, le couvert végétal, l'intensité du ruissellement, l'effet des précipitations, les caractéristiques lithologiques du bassin, les caractéristiques du sol et l'érosion du sol (Testa, 2000).

IV.7.2.5. Détermination de l'indice d'envasement du barrage S.M.B.A (1978/2003)

Après avoir calculé chaque paramètre constituant le modèle P.I.S.A, l'indice d'envasement de chaque sous-bassin peut être aisément défini, le tableau (IV.8) récapitule les différents calculs effectués.

Tableau IV.8 : Détermination de l'indice d'envasement de chaque sous bassin.

Sous-bassin	A (Km ²)	S _{ER} (Km ²)	Im (Grade)	P (mm)	D _d (Km/Km ²)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)
30	753,3	332,40	7,60	305,9	3,24	1465,11	2344,18
31	900,0	336,77	7,98	327,0	2,58	1186,08	1897,73
32	1488,0	337,92	4,84	236,1	3,91	586,47	938,36
33	1063,2	368,83	7,38	248,9	3,54	1189,32	1902,92
34	695,5	261,63	7,59	250,7	3,31	1358,89	2174,22

a/ Analyse et interprétation des résultats

Le sous-bassin 30 détient la plus forte quantité de production de sédiments avec une valeur de 1465,11 m³/Km²/an alors que le niveau minimal de 586,47 m³/Km²/an a été relevé dans le sous-bassin 32. Les sous-bassins (31-33-34) présentent respectivement les valeurs rapprochées ci-après 1186,08 ; 1189,32 et 1358,89 m³/Km²/an.

La production variable des sédiments des sous-bassins (30-31-33-34) s'explique physiquement par :

- La grande surface érodable vulnérable à l'érosion hydrique;
- La variabilité spatio-temporelle des précipitations;
- Les caractéristiques locales propres à chaque sous-bassin présentent une friabilité de matériaux variable. La détachabilité est très grande et l'emportement des particules plus accélérés;
- Vu la grande surface du sous-bassin et la petite surface érodable qui l'occupe, ces deux facteurs réduisent considérablement le taux de production des sédiments du sous-bassin 32 et constitue pratiquement la zone la moins érodée.

IV.8. Ecart entre le modèle P.I.S.A et les mesures réelles

IV.8.1. Comparaison avec le levé bathymétrique de l'année (2003)

La quantification des sédiments acheminés vers l'exutoire (barrage S.M.B.A) consiste en l'addition de chaque taux de sédiments produit par chaque sous-bassin. L'écart entre le modèle P.I.S.A et les mesures réelles se calcule par la formule (IV.3). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (IV.9).

$$\Delta' = \frac{Y - Y'}{Y'} \quad (\text{IV.3})$$

avec :

Δ' : Ecart de l'envasement entre le modèle P.I.S.A et le levé bathymétrique;

Y : Envasement du barrage S.M.B.A entre (1978/2003) estimé avec le modèle P.I.S.A en (Hm³);

Y' : Envasement du barrage S.M.B.A entre (1978/2003) mesuré par levé bathymétrique en (Hm³).

Tableau IV.9 : Ecart entre le modèle P.I.S.A et le levé bathymétrique (2003).

Sous-bassin	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (Hm ³ /an)	Y (Barrage S.M.B.A) (Hm ³ /an)	Y (Hm ³) (Barrage S.M.B.A) (1978/2003)	Y'(Hm ³) (1978/2003)	Δ' (%)
30	1465,11	1,10	5,253	136,589	81,291	68,02
31	1186,08	1,07				
32	586,47	0,87				
33	1189,32	1,26				
34	1358,89	0,95				

IV.8.1.1 Analyse et interprétation des résultats

L'estimation de l'envasement du barrage S.M.B.A avec le modèle P.I.S.A s'élève à 136,589 Hm³ce qui correspond à une érosion spécifique de 1715,40 t/km²/an, tandis-que par levé bathymétrique la valeur est de 81,291 Hm³ce qui donne un écart de 68,02 %.

L'application du modèle P.I.S.A dans le bassin versant de l'oued Mina tend à surestimer la valeur de l'envasement du barrage S.M.B.A avec un ordre de 1,68 fois en comparaison avec le levé bathymétrique de l'année 2003, cette valeur se traduit par le volume de désenvasement évacué par les organes de vidange durant l'exploitation du barrage entre (1978/2003). L'application de ce modèle en Tunisie par Ouchtati et Beldessare(2011) révèle une surestimation du taux de sédimentation double de la valeur d'envasement réel du barrage Siliana et de 4 fois l'envasement du barrage de LakHmess. Pour la première fois en Algérie le modèle P.I.S.A a été appliqué par Benkhadja et al. (2012), les résultats trouvés sont presque similaires à ceux trouvés par Ouchtati et Beldessare (2011), car l'évaluation de l'envasement du barrage K'sob avec le modèle P.I.S.A est 3 fois plus élevée que les valeurs obtenues par les mesures bathymétriques.

IV.8.2. Comparaison avec le transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003)

La méthode de calcul est la même que celle établit dans le chapitre III, (III.12.2.2), le tableau (IV.10) rassemble les différents calculs effectués.

Tableau IV.10 : Ecart entre le modèle P.I.S.A et le volume total du transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003).

V _{vase} chassé (Hm ³) (1978/2003)	Y (Hm ³) (1978/2003)	Y' (Hm ³) (1978/2003)	Y'' (Hm ³) (1978/2003)	Δ'' (%)
47,201	136,589	81,291	128,492	6,30

V_{vase} chassé: Volumetotal des sédiments évacués par les organes de vidange (1978/2003) en (Hm³);
Y : Envasement du barrage calculé avec le modèle P.I.S.A entre (1978/2003) en (Hm³);
Y' : Envasement du barrage mesuré parlevé bathymétriqueentre (1978/2003) en (Hm³);
Y'' : Transport solide arrivé à la retenue du barrage entre (1978/2003) en (Hm³);
Δ'' : Ecart entre le modèle P.I.S.A et les mesures réelles (%), ce dernier est donné par la formule (IV.4).

d'où :

$$\Delta'' = \frac{Y''-Y}{Y''} \times 100 \text{(IV.4)}$$

IV.8.2.1. Analyse et interprétation des résultats

L'écartobtenueentre l'application du modèle P.I.S.A et lelevé bathymétriques'évalue à 6,3 % soit8,097Hm³se traduit par :

- Le degré de similarité des caractéristiques du bassin étudié avec ceux des bassins expérimentaux qui ont été à la base de la construction du modèle;
- Les sédiments érodés qui n'ont pas atteint le réseau hydrographique;
- Le dépôt des sédiments dans les cours d'eau causant une remontée de lit (photo IV.6 etIV.7);
- L'accumulation des sédiments dans les endoréismes;
- La résolution de l'image satellite (figure IV.20);
- L'envasement des retenues collinaires dont nous ne disposons d'aucune donnée les concernant (figure IV.21 et IV.22);
- La fiabilité des données météorologiques fournies par l'organisme concerné.



Cliché, TOUBAL A.K (02/02/2013)
Photo IV.6 :Dépôt des sédiments sur le lit de l'ouedEl-Abd.



Cliché, TOUBAL A.K (16/02/2013)
Photo IV.7 :Dépôt des sédiments sur le lit de l'oued Haddad.

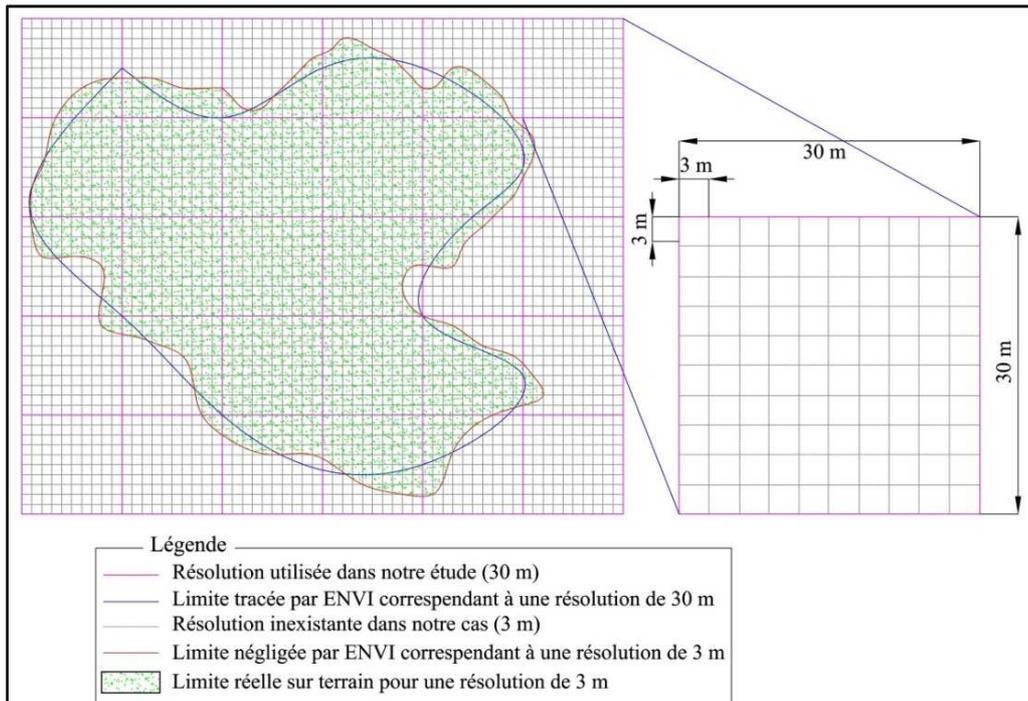


Figure IV.20 : Tracé des limites avec le logiciel ENVI pour différentes résolutions d'images satellites.

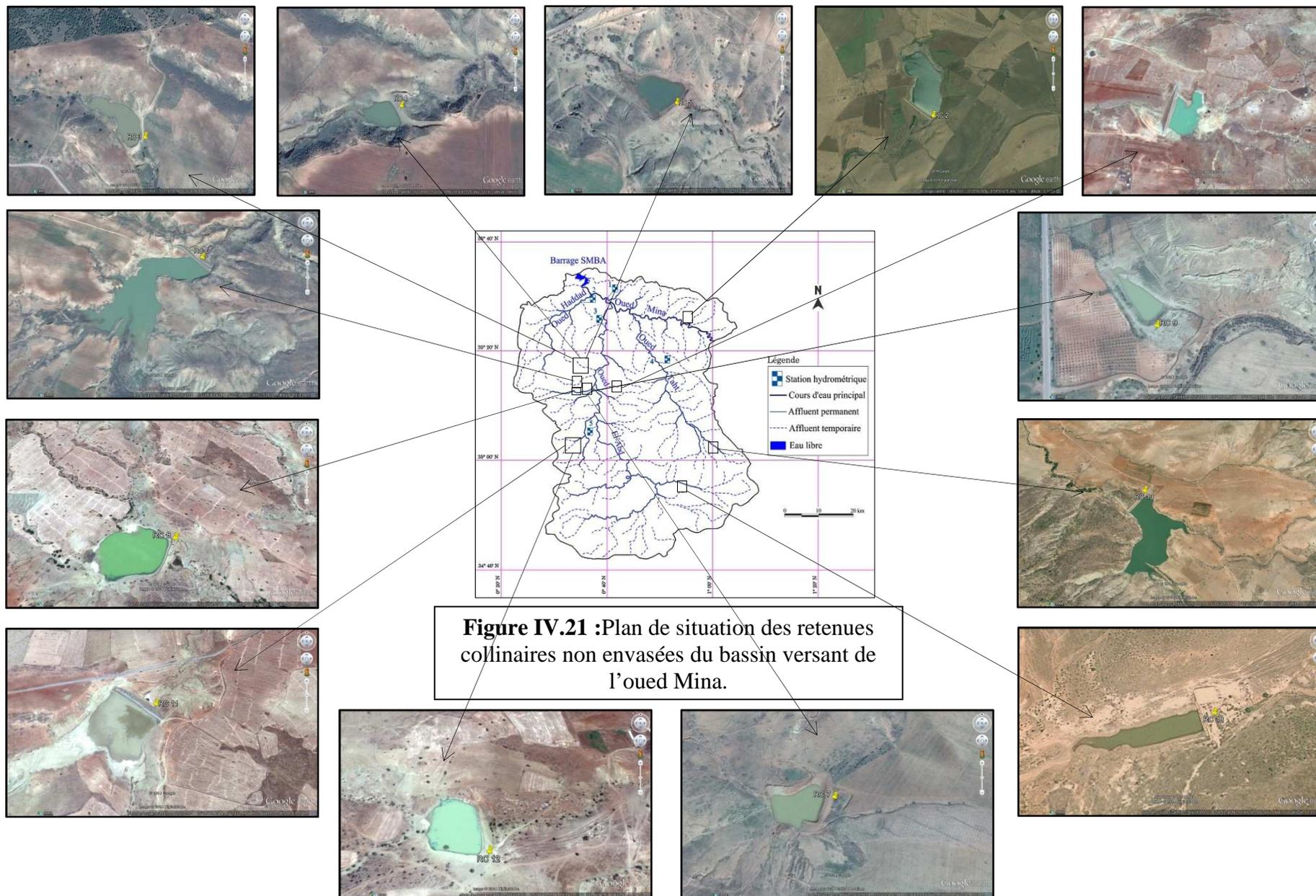


Figure IV.21 :Plan de situation des retenues collinaires non envasées du bassin versant de l'oued Mina.

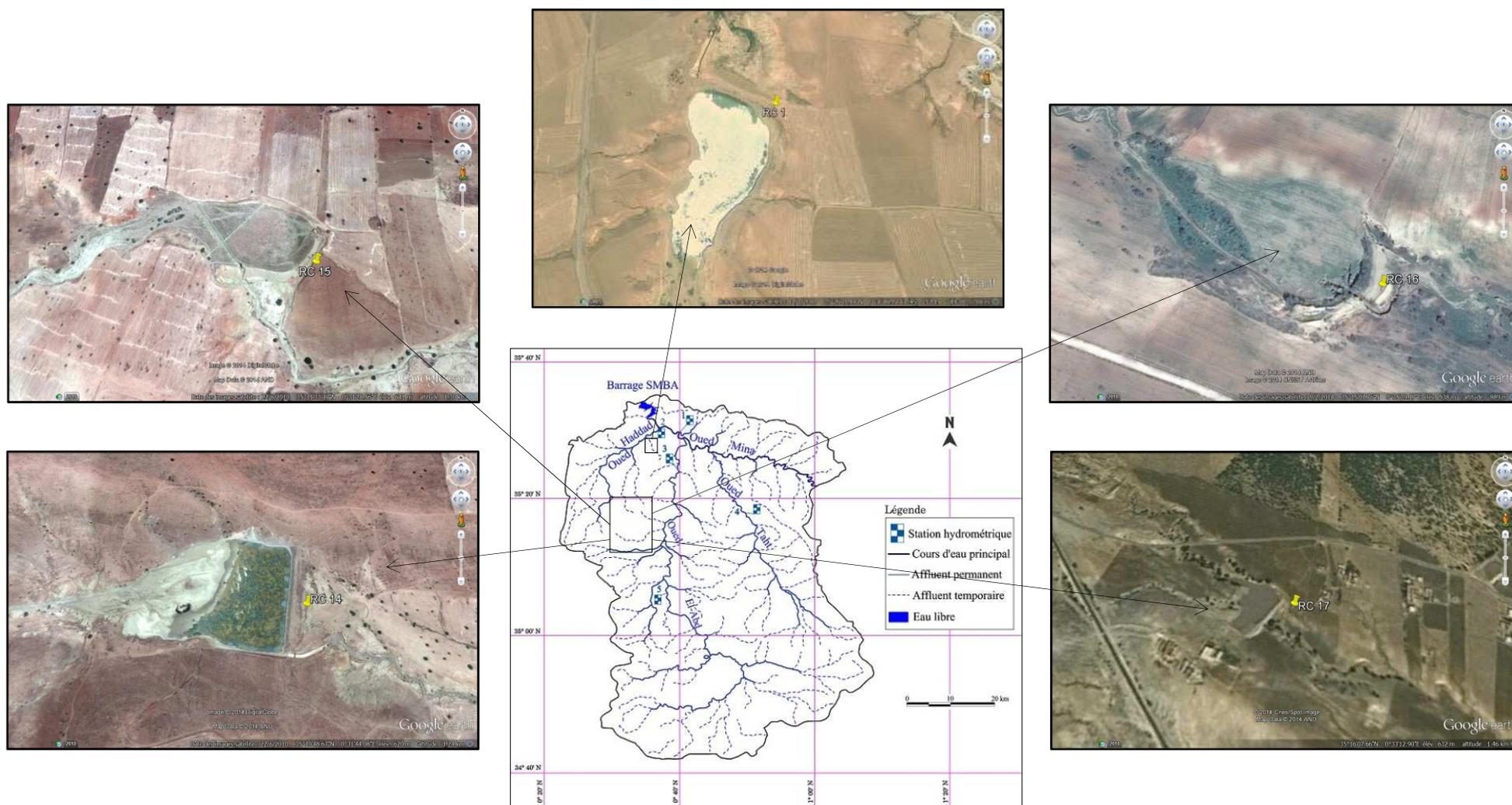


Figure IV.22 :Plan de situation des retenues collinaires envasées du bassin versant de l'oued Mina.

IV.9. Synthèse récapitulative

Pour plus de détails concernant les différentes étapes suivies dans cette étude, l'élaboration d'un organigramme est nécessaire (figure IV.23).

Une isolation de chaque sous-bassin portant les caractéristiques topographiques, pluviométriques, hydrographiques et d'occupation des sols a été réalisée pour faciliter la compréhension des calculs de chaque zone.

Les tableaux (IV.11; IV.12; IV.13;IV.14 et IV.15) récapitulent les calculs effectués au niveau de chaque sous-bassin informant le bassin versant de l'oued Minaen considérant la surface érodable, la pluviométrie moyenne annuelle, la pente moyenne et la densité de drainage.

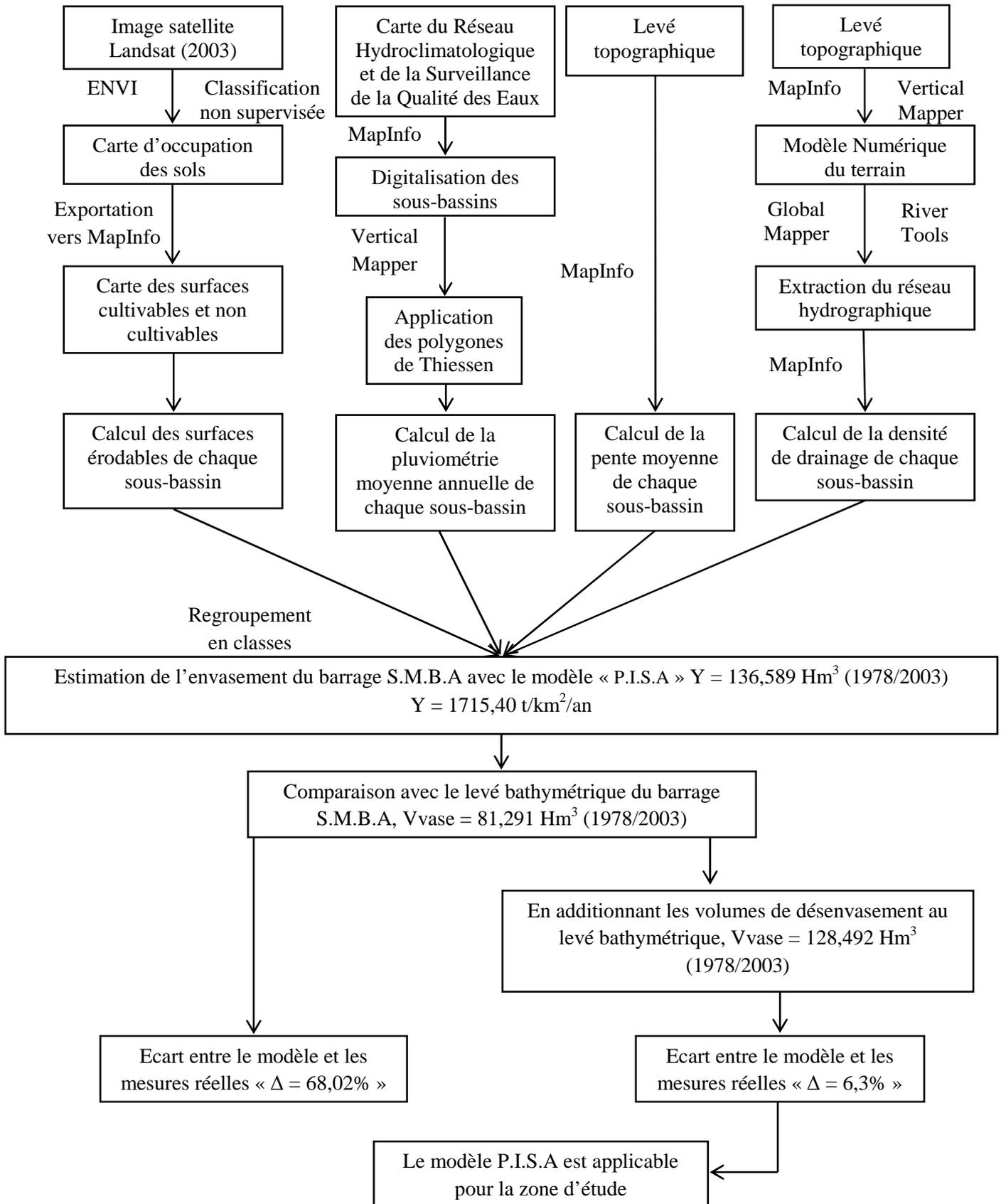


Figure IV.23 : Organigramme des principales étapes effectuées pour l'estimation du taux d'envasement du barrage S.M.B.A.

Tableau IV.11 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 30.

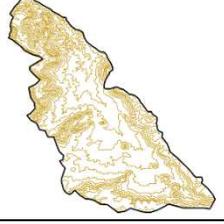
Surfaces caractéristiques	Sous-bassin	A (Km ²)	Sc (Km ²)	Snc (Km ²)	Sc (%)	Snc (%)	Se (Km ²)	Se (%)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)	Y (Hm ³ /an)
	30	753,3	304,34	448,96	40,40	59,60	332,40	44,13	1465,11	2344,18	1,10
Polygones de Thiessen			$\Sigma A_i.P_i$		P_{moy} (mm)	/	/	/			
			230427,5		305,9	/	/	/			
Topographie			D (m)	L (Km)	Im (‰)	Im (‰)	Im (Grade)	/			
			50	1805	119,8	11,98	7,60	/			
Réseau hydrographique			Li (Km)	D _d (Km/Km ²)	/	/	/	/			
			2444	3,24	/	/	/	/			

Tableau IV.12 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 31.

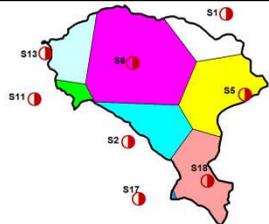
Surfaces caractéristiques	Sous-bassin	A (Km ²)	Sc (Km ²)	Snc (Km ²)	Sc (%)	Snc (%)	Se (Km ²)	Se (%)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)	Y (Hm ³ /an)
	31	900	299,23	600,77	33,25	66,75	336,77	37,42	1186,08	1897,73	1,07
Polygones de Thiessen			$\Sigma A_i.P_i$		P_{moy} (mm)	/	/	/			
			294322,7	327,0	/	/	/				
Topographie			D (m)	L (Km)	Im (‰)	Im (‰)	Im (Grade)	/			
			50	2265	125,8	12,58	7,98	/			
Réseau hydrographique			Li (Km)	D _d (Km/Km ²)	/	/	/	/			
			2325	2,58	/	/	/	/			

Tableau IV.13 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 32.

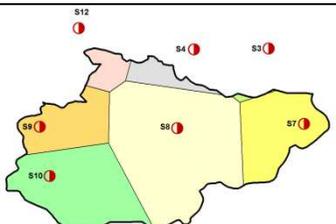
Surfaces caractéristiques	Sous-bassin	A (Km ²)	Sc (Km ²)	Snc (Km ²)	Sc (%)	Snc (%)	Se (Km ²)	Se (%)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)	Y (Hm ³ /an)
	32	1488	261,25	1226,75	17,56	82,44	337,92	22,71	586,47	938,36	0,87
Polygones de Thiessen			$\Sigma A_i.P_i$		P_{moy} (mm)	/	/	/			
			351348,8	236,1	/	/	/				
Topographie			D (m)	L (Km)	Im (‰)	Im (‰)	Im (Grade)	/			
			50	2269	76,2	7,62	4,84	/			
Réseau hydrographique			Li (Km)	D _d (Km/Km ²)	/	/	/	/			
			5823	3,91	/	/	/	/			

Tableau IV.14 :Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 33.

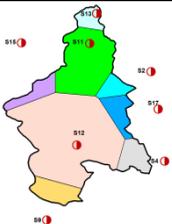
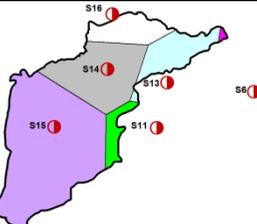
Surfaces caractéristiques	Sous-bassin	A (Km ²)	Sc (Km ²)	Snc (Km ²)	Sc (%)	Snc (%)	Se (Km ²)	Se (%)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)	Y (Hm ³ /an)
	33	1063,2	322,54	740,66	30,34	69,66	368,83	34,69	1189,32	1902,92	1,26
Polygones de Thiessen			$\Sigma A_i.P_i$		P_{moy} (mm)	/	/	/			
			264585,1	248,9	/	/	/				
Topographie			D (m)	L (Km)	Im (‰)	Im (‰)	Im (Grade)	/			
			50	2473	116,3	11,63	7,38	/			
Réseau hydrographique			Li (Km)	D _d (Km/Km ²)	/	/	/	/			
			3767	3,54	/	/	/	/			

Tableau IV.15 : Synthèse récapitulative sur les différents paramètres du sous-bassin 34.

Surfaces caractéristiques	Sous-bassin	A (Km ²)	Sc (Km ²)	Snc (Km ²)	Sc (%)	Snc (%)	Se (Km ²)	Se (%)	Y (m ³ /Km ² /an)	Y (t/Km ² /an)	Y (Hm ³ /an)
	34	695,5	232,71	462,79	33,46	66,54	261,63	37,62	1358,89	2174,22	0,95
Polygones de Thiessen			$\Sigma A_i.P_i$		P_{moy} (mm)	/	/	/			
			174395,7	250,7	/	/	/				
Topographie			D (m)	L (Km)	Im (‰)	Im (‰)	Im (Grade)	/			
			50	1664	119,6	11,96	7,59	/			
Réseau hydrographique			Li (Km)	D _d (Km/Km ²)	/	/	/	/			
			2304	3,31	/	/	/	/			

avec :

A : Surface du sous-bassin (Km^2);

Sc : Surface cultivable (Km^2);

Snc : Surface non cultivable (Km^2);

Se : Surface érodable (Km^2);

Y : Indice d'envasement ($\text{m}^3/\text{Km}^2/\text{an}$);

Ai : Surface élémentaire (Km^2);

Pi : Pluviométrie moyenne annuelle de la station pluviométrique (mm);

P_{moy} : Pluviométrie moyenne annuelle du sous-bassin (mm);

D : Equidistance entre les courbes de niveaux (Km);

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

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

Li : Longueur des affluents (Km);

Dd : Densité de drainage (Km/Km^2).

IV.10. Conclusion

De tout ce que dessus, on peut déduire que l'évolution de l'envasement de la cuvette du barrage S.M.B.A n'est pas un phénomène linéaire, à cause des conditions hydroclimatologiques, physiques et d'exploitation de la zone en question. D'après la visite effectuée sur le terrain nous avons constaté une dégradation des berges à un stade irréversible.

L'application du modèle P.I.S.A dans les sous-bassins révèle une répartition variable de production des sédiments. En additionnant les indices d'envasement de chaque sous-bassin nous obtenons un taux de sédimentation de $136,589 \text{Hm}^3$ ce qui correspond à une érosion de $1715,40 \text{t}/\text{km}^2/\text{an}$. Ce résultat est surestimé de 1,68 fois de celui trouvé avec le levé bathymétrique évalué à $81,291 \text{Hm}^3$, l'écart entre les deux valeurs est estimé à 68,02%. En additionnant les volumes des sédiments soutirés par les organes de vidange ($47,201 \text{Hm}^3$) durant l'exploitation du barrage entre (1978/2003) au taux d'envasement mesuré sur terrain, l'écart diminue jusqu'à 6,3%. Ainsi, on pourrait constater pour le barrage S.M.B.A une compatibilité entre les estimations issues du modèle P.I.S.A et les mesures réelles.

Chapitre V

Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique

V.1. Introduction

L'exécution des mesures efficaces de conservation de sol doit d'abord être précédée d'une évaluation dans l'espace du risque d'érosion (Moussa *et al.*, 2002; Souchère *et al.*, 2005). L'objectif de ce chapitre consiste à dresser une carte hiérarchique des zones à risque d'érosion hydrique au moyen des cartes thématiques relatives à la zone d'étude.

V.2. Approche méthodologique pour l'analyse de la zone d'étude

Parmi les principaux facteurs favorisant l'érosion hydrique nous citons : la lithologie, l'occupation du sol et la pente. Pour cela une superposition entre chacune de cartes aux paramètres spécifique sera établie afin de déceler la hiérarchie des zones à risque d'érosion allant de la plus faible à la plus sensible. A cet effet une superposition de cartes thématiques sera réalisée (figure V.1).

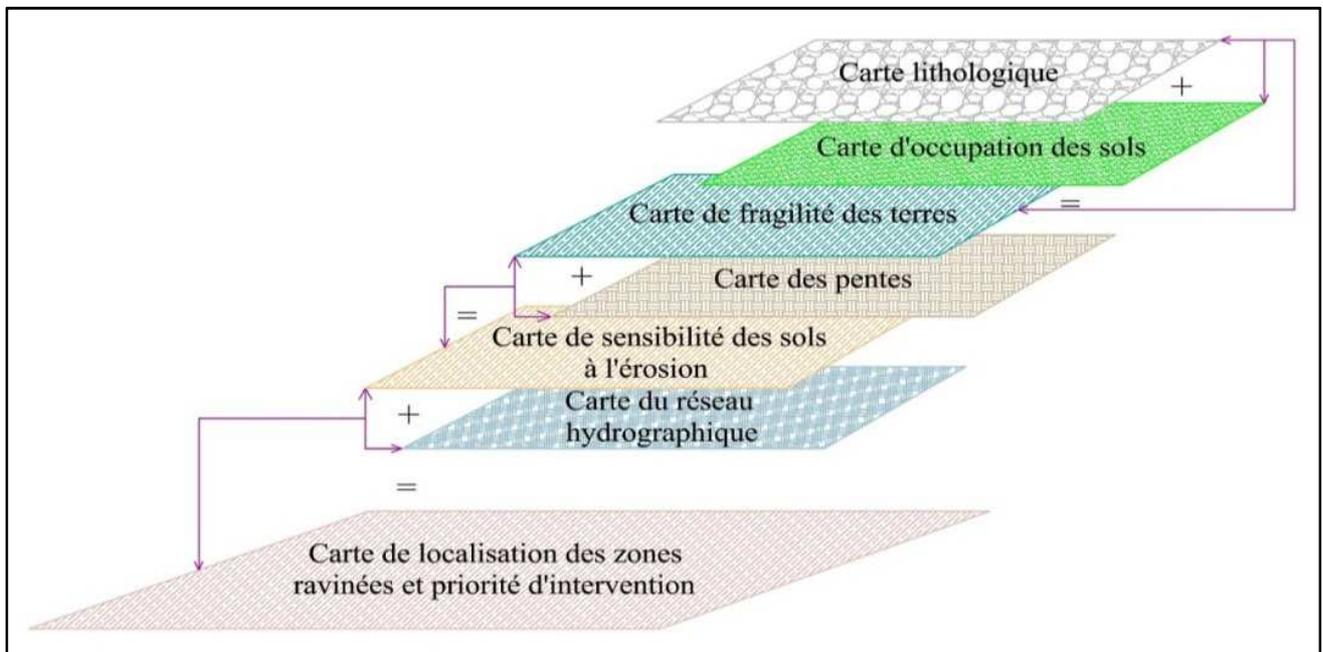


Figure V.1 : Approche méthodologique de superposition des cartes thématiques.

V.2.1. Méthodologie à suivre

Afin de bien détaillé les différentes étapes à suivre, nous avons recours à l'organigramme présenté dans la figure (V.2).

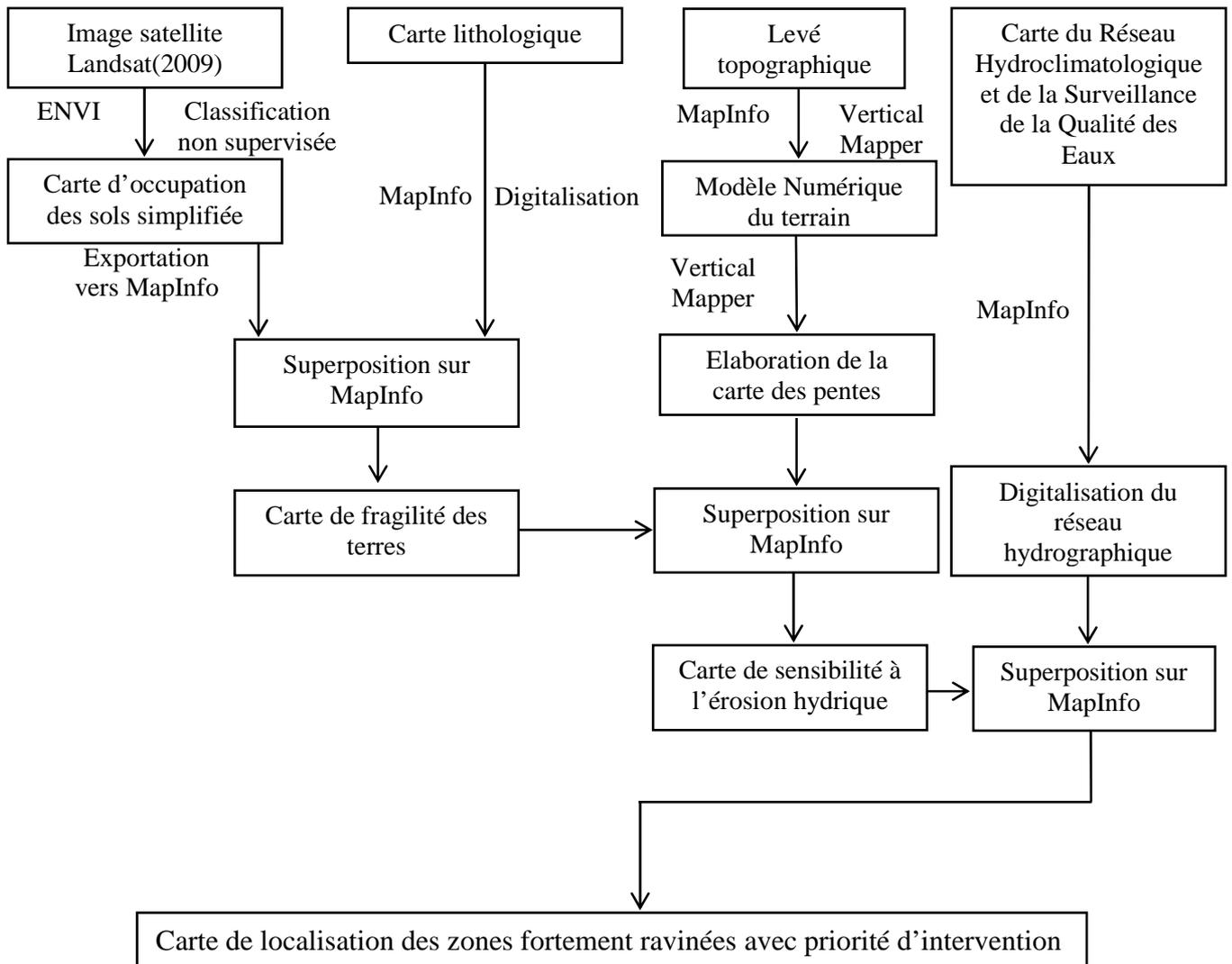


Figure V.2 :Organigramme des principales étapes à effectuées pour la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina.

V.3. Quelques travaux réalisés

Abdelbaki et al. (2009) ont montré l'intérêt que peut apporter un outil tel que le S.I.G pour l'aménagement des bassins versants. L'élaboration d'un Plan d'Aménagement de Protection « P.A.P » a été effectuée par la réalisation d'une carte globale de vulnérabilité à l'érosion hydrique du sous bassin versant de l'oued Bouguedfine (wilaya de Chlef). Pour cerner le phénomène érosif, la prise en compte des facteurs physico-climatiques ont abouti à une analyse détaillée de la zone d'étude.

Bachaoui et al. (2007) ont travaillé sur la zone du haut Atlas Marocain, dont la méthode consiste en l'intégration d'un SIG, trois facteurs spécifiques à l'érosion à savoir: la pente, la friabilité des

matériaux et l'occupation des terres. La carte de risque d'érosion qui en dérive indique quatre zones d'intensité de la vulnérabilité à l'érosion hydrique : faible, moyen, fort et très fort.

Bouchetata et Bouchetata(2006) ont élaboré une analyse thématique sur le sous-bassin-versant de l'oued Fergoug situé au Nord-ouest Algérien. Ils ont pu noter que le croisement d'une série de cartes thématiques a permis la conception d'une carte de localisation des zones ravinées dans le sous-bassin-versant nécessitant un aménagement prioritaire. Les principaux travaux d'aménagement antiérosifs proposent des mesures techniques (correction torrentielle) et des mesures biologiques (reboisement, plantations fruitières et amélioration des parcours).

V.4. Classement des terres par degré de sensibilité

Différents types de sols couvrent la zone d'étude. La prédominance des sols marneux représente 45,92 % et occupe la moitié du bassin. Les classes de sensibilité des sols dépendent : des caractéristiques des sols, de leur sensibilité à la battance et de la fissuration (tableau V.1).

Tableau V.1 : Classement des sols en fonction des caractéristiques lithologiques.

Etage	Description	A (km ²)	(%)	Caractéristiques	Sensibilité à la battance	Sensibilité à la fissuration	Classe sensibilité
Pliocène	Grès sableux avec en partie un peu de cimentation carbonatée, calcaires sableux et croûtes calcaires	363,09	7,41	Texture sablo-limoneuse	Moyenne	Faible	4
Miocène Supérieur	Marnes sableuses alternant en partie avec des bancs de grès peu importants.	248,43	5,07	Texture argilo-sableuse	Limitée	Faible	3
Miocène inférieur	Marnes avec des intercalations de minces plaques de grès et de bancs de limons.	368,48	7,52	Texture argilo-sablo-limoneuse	Limitée	Faible	3
Oligocène	Marnes vert claires avec sporadiquement de faibles bancs de grès et de limon, en partie de marnes sableuses foncées.	310,17	6,33	Texture limono-argileuse	Limitée	Moyenne à excellente	2
Eocène moyen	Calcaires fossilisés surtout d'origine marine et calcaire à Nummulites, grès mal assortis avec cimentation carbonatée.	12,25	0,25	Présence de calcaire et d'argiles	Limitée	Faible	3
Eocène inférieur	Calcaires à Foraminifères, grès marins en alternance avec des marnes colorées.	68,6	1,4	Présence de calcaire et d'argiles	Limitée	Faible	3

Tableau V.1 : Classement des sols en fonction des caractéristiques lithologiques (suite).

Etage	Description	A (km ²)	(%)	Caractéristiques	Sensibilité à la	Sensibilité à la	Classe sensibilité
-------	-------------	----------------------	-----	------------------	------------------	------------------	--------------------

					battance	fissuration	
Crétacé supérieur	Importantes quantités de calcaires gris et dolomies.	112,7	2,3	Présence de calcaire	Limitée	Faible	3
Crétacé inférieur	Marnes claires à verdâtres, pierres limoneuses.	153,86	3,14	Texture argilo-limoneuse	Limitée	Moyenne à excellente	1
Jurassique Supérieur	Dominance de marnes calcaires, grises et vertes alternant avec de faibles bancs de calcaire et de dolomites.	2250,08	45,92	Formation marno-calcaires	Limitée	Faible	2
Jurassique moyen	Importantes quantités calcaires gris en partie oolithique et dolomies à gros grains, surfaces karstiques.	989,8	20,2	Présence de calcaire	Limitée	Faible	3
Jurassique inférieur	Alternance de grès quartziques, dolomites, roches limoneuses et marnes.	7,84	0,16	Roches dures	Limitée	Faible	4
Trias	Grès durs et dolomies.	6,86	0,14	Roche poreuse	Limitée	Faible	4
Eau libre	/	7,84	0,16	/	/	/	/
Total		4900	100				

V.4.1. Carte de fragilité des terres

A l'aide du logiciel MapInfo, nous avons procédé à une superposition des deux cartes, lithologique et d'occupation des sols simplifiée pour aboutir à la carte de fragilité des terres (figure V.3; tableau V.2 et figure V.4).

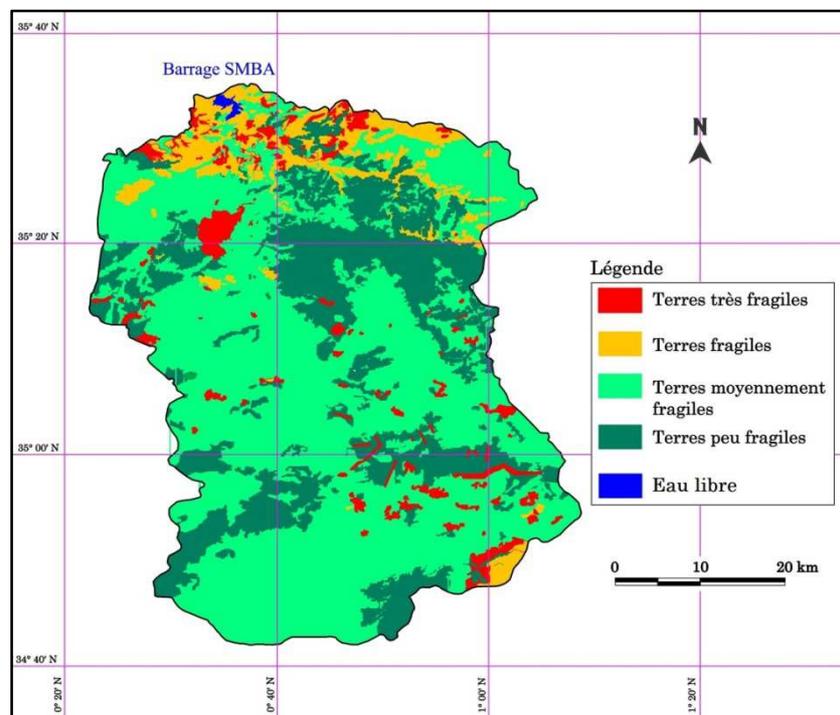


Figure V.3 : Carte de fragilité des terres du bassin versant de l’oued Mina.

Tableau V.2 : Superficie et pourcentage des classes de fragilité des terres.

N° de classe	Classe de fragilité	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
--------------	---------------------	-------------------------------	-----------------

1	Terres très fragiles	237,43	4,85
2	Terres fragiles	305,76	6,24
3	Terres moyennement fragiles	3024,28	61,72
4	Terres peu fragiles	1324,47	27,03
Eau libre		7,84	0,16
Total		4900	100

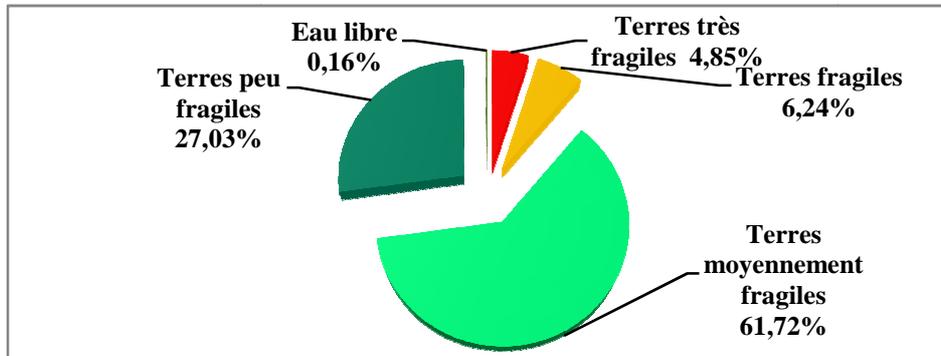


Figure V.4 : Pourcentages des classes de fragilité des terres.

V.4.1.1. Analyse et interprétation des résultats

La superposition de la carte lithologique avec la carte d'occupation des sols montre que :

Pour les terres très fragiles un pourcentage faible de 4,85% est enregistré, leur répartition est éparse et renferme les sols nus, cependant on note une augmentation de 0,2% entre la carte d'occupation des sols et la fragilité des terres, conséquence de la caractéristique lithologique locale de la surface des sols nus.

La partie septentrionale occupe les zones fragiles avec 6,24% représentant généralement le couvert végétal temporaire dont la lithologie est sensible à l'érosion.

Les terres moyennement fragiles sont en grande proportion 61,72% et concernent généralement le couvert végétal temporaire et clairsemé, le risque encouru dans ces zones dérive des sols exposés sans protection à l'impact Splash des pluies donnant naissance à une érosion.

Les terres peu fragiles occupent le quart de la surface soit 27,03% et renferme le couvert végétal permanent qui protège les sols contre l'impact Splash.

V.5. Carte de sensibilité à l'érosion

En combinant la carte de fragilité des terres et la carte des pentes on obtient la carte des terres sensibles à l'érosion (figure V.5; tableau V.3 et figure V.6).

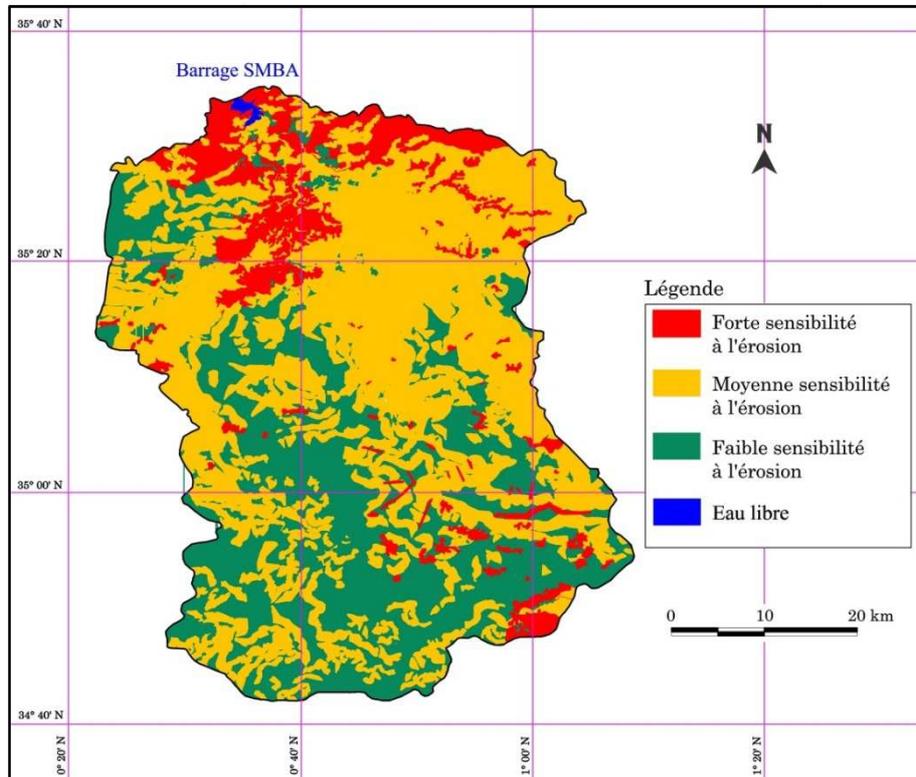


Figure V.5 : Carte de sensibilité des sols à l'érosion hydrique du versant de l'oued Mina.

Tableau V.3 : Superficie et pourcentage des classes de sensibilité à l'érosion.

N° de classe	Classe de fragilité	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
1	Forte sensibilité	469,03	9,57
2	Moyenne sensibilité	2778,13	56,70
3	Faible sensibilité	1644,93	33,57
	Eau libre	7,84	0,16
Total		4900	100

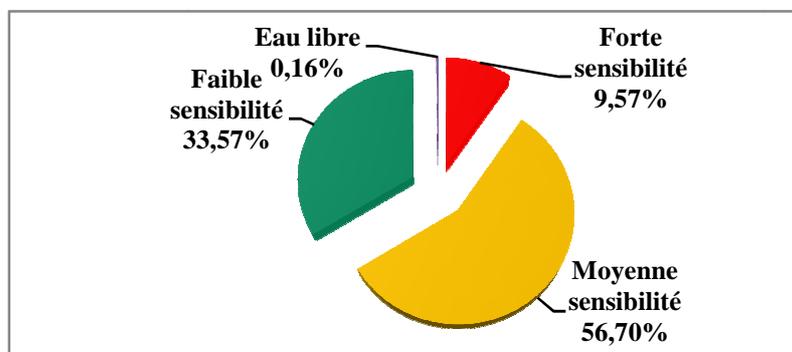


Figure V.6 : Pourcentages des classes de sensibilité à l'érosion hydrique.

V.5.1. Analyse et interprétation des résultats

La partie Nord connaît une forte sensibilité à l'érosion avec une proportion de 9,57 %. Plusieurs facteurs concourent à la dégradation de cette zone comme les terrains nus, la pente...etc.

Malgré l'existence du couvert végétal permanent, la sensibilité moyenne à l'érosion règne dans la partie Est du bassin avec 57%. Les terrains sont très pentus et la résistance à l'érosion est réduite.

Se concentrant dans la partie Sud, les terrains à faible sensibilité représentent le tiers de la surface du bassin car la majeure partie de la zone est une zone steppique (couvert végétal clairsemé).

V.6. Supervision de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique

Afin de déterminer la fiabilité de la carte de sensibilité à l'érosion établie on a eu recours à Google Earth. Pour superviser les différentes zones obtenues, la méthode consiste à choisir une zone et de vérifier sa compatibilité avec la réalité. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (V.7).

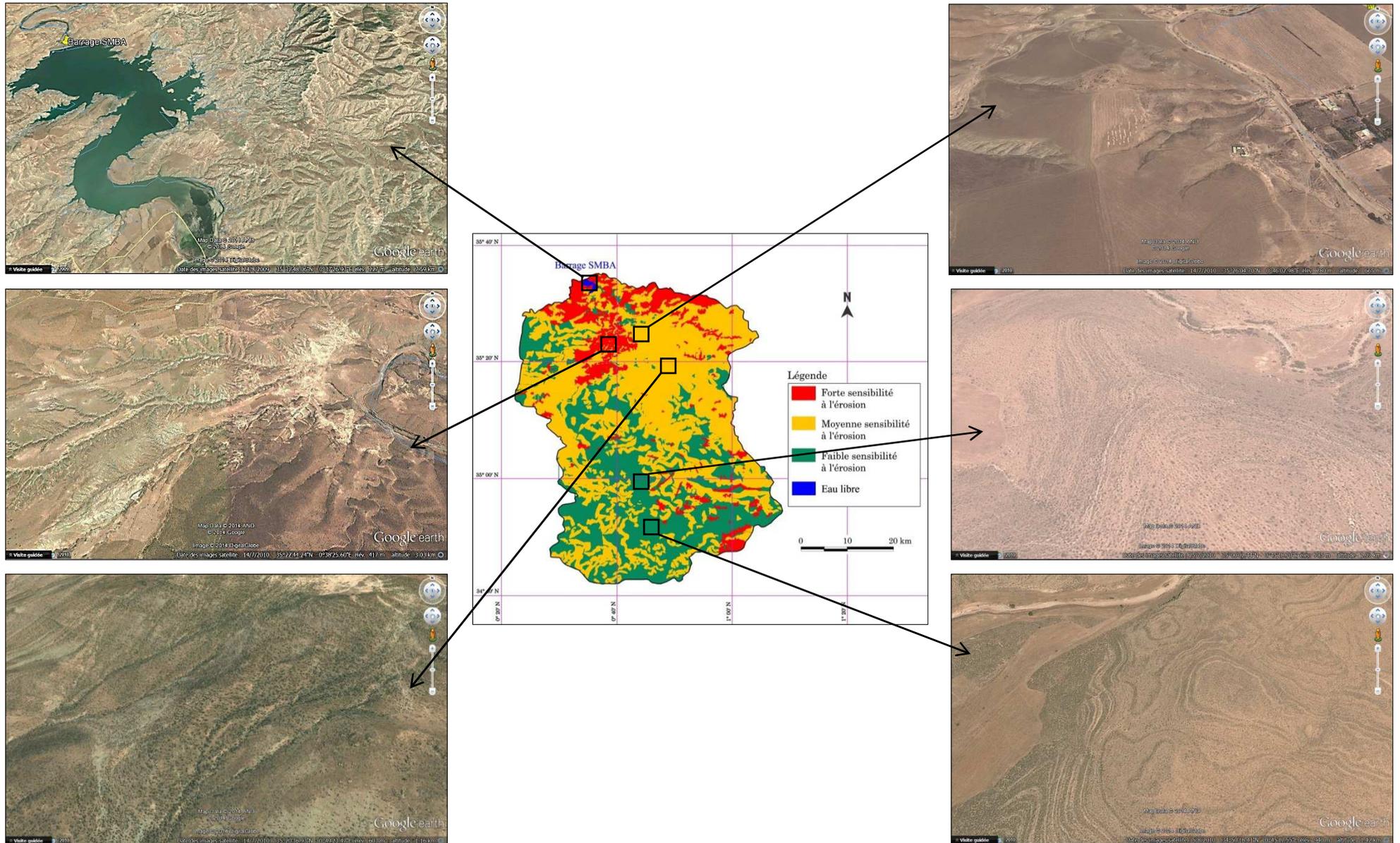


Figure V.7: Supervision de la carte de sensibilité à l'érosion avec Google Earth.

V.7. Localisation des zones fortement ravinées et priorité d'intervention

En superposant le réseau hydrographique sur la carte de sensibilité à l'érosion on obtient la carte de localisation des zones ravinées. Cette carte illustre une hiérarchie de priorité d'intervention urgente allant du Nord vers le Sud afin de protéger le barrage contre un envasement précoce (figure V.8).

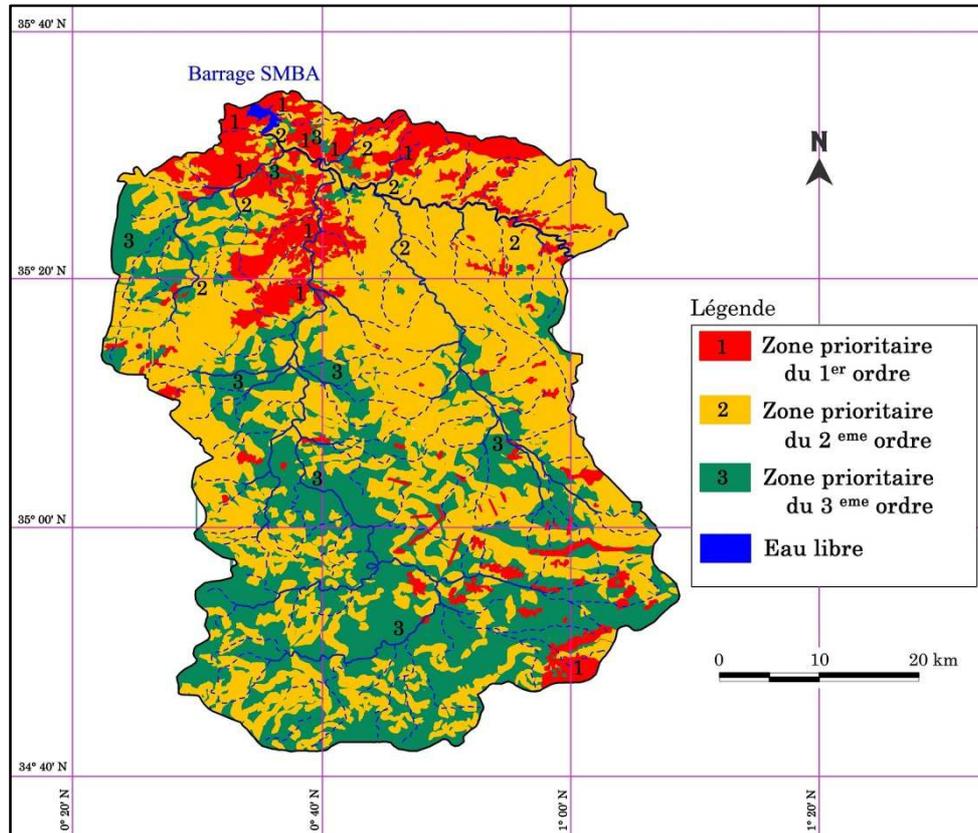


Figure V.8: Carte de localisation des zones fortement ravinées avec priorité d'intervention.

V.7.1. Paramètres de choix de la priorité d'intervention

La priorité d'intervention dans le bassin versant reste soumise aux conditions ci-après :

- Protéger le barrage contre un envasement accéléré;
- Minimiser l'érosion des berges du barrage;
- Localiser les terres où l'érosion est en stade évolutif (érosion en rigole);
- Identifier les zones habitables;
- Situer les zones où la matière première est facile à transporter;
- Repérer les zones à friabilité des matériaux importante;
- Classer les zones accessibles aux manœuvres;
- Définir les zones les plus urgentes à aménager et à moindre coût.

Les cartes thématiques de base ainsi que les cartes établies sont représentées dans la figure (V.9).

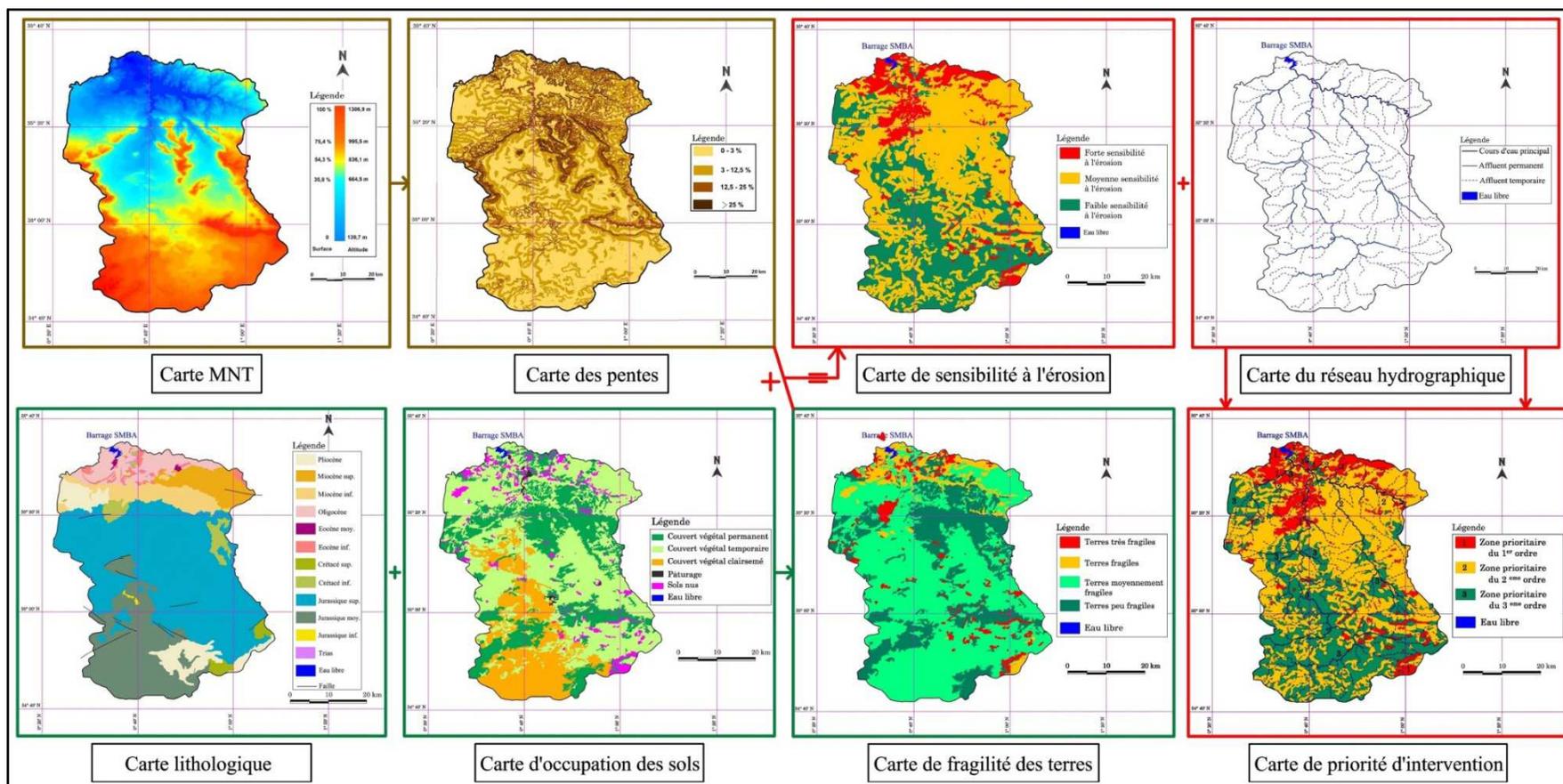


Figure V.9 : Synthèse récapitulative sur les cartes thématiques élaborées.

V.8. Conclusion

Dans cette partie, nous proposons une méthodologie cartographique pour les zones vulnérables à l'érosion hydrique qui constitue la source des matériaux solides arrachés et transportés par l'eau, en se basant sur des données de terrain et des données topographiques. Les outils informatiques nous ont permis de superposer et d'analyser l'influence de plusieurs facteurs sur l'érosion du bassin, tels que la pente, la nature des matériaux affleurants, le couvert végétal et le réseau hydrographique.

La partie septentrionale du bassin versant présente un ravinement à un stade avancé avec 10% de la surface totale, alors que la partie centrale Est renferme des terres moyennement érodées avec untaux de 57%. La partie Sud couvre le tiers de la totalité de la zone avec une faible sensibilité à l'érosion hydrique.

Pour préserver le barrage S.M.B.A contre un envasement accéléré, il est nécessaire si non urgent de classer les zones dans la priorité d'intervention et de procéder à des travaux de lutte antiérosifs du Nord vers le Sud.

Chapitre VI

Moyens de lutte proposés

VI.1. Introduction

Très tôt, l'homme a été obligé de développer des stratégies expérimentales de gestion des eaux et de la fertilité des sols pour faire face à la pression démographique. Plus récemment, pour répondre aux crises économiques et sociales traduisant de fortes pressions foncières, se sont développées des techniques d'extension de l'agriculture à des zones fragiles et des stratégies modernes de lutte antiérosives essentiellement vers l'équipement d'une petite hydraulique rurale (R.T.M : Restauration des Terrains en Montagne, C.E.S : Conservation de l'Eau et du Sol, D.R.S : Défense et Restauration des Sols) par les agents du pouvoir central (Roose et De Noni, 1998).

La lutte contre l'envasement des barrages en Algérie revêt une dimension nationale tant les enjeux sont énormes. Tous les spécialistes s'accordent à dire que les pays du Maghreb, d'ici 2025, connaîtront des problèmes aigus d'eau. Autant, dès maintenant, penser à une stratégie globale de préservation de nos barrages contre ce grave problème de l'envasement où beaucoup d'efforts ont été déployés par les services de l'hydraulique à cet effet.

VI.2. Lutte antiérosive

VI.2.1. Stratégies modernes d'aménagement des bassins versants

A l'occasion de graves crises sociales des stratégies modernes sont développées. Il s'agit essentiellement de reforestation des hautes vallées, d'améliorations foncières, de correction des torrents et ravins et de terrassement des terres cultivées sur fortes pentes. La priorité a été donnée à la réalisation de gros chantiers de terrassement et de reforestation (Souadi, 2011).

VI.2.1.1. Restauration des terrains en montagne (R.T.M)

Elle s'est développée en France à partir de 1850, puis dans les montagnes d'Europe pour protéger les plaines fertiles et les voies de communication des dégâts des torrents. Les services forestiers ont racheté les terres dégradées en montagne, reconstitué la couverture végétale et corrigé les torrents par des techniques de génie civil et biologique (Lilin, 1986).

VI.2.1.2. Conservation de l'eau et du sol (C.E.S)

En 1930, en pleine crise économique, 20 % des terres cultivables étaient dégradées par l'érosion. Sous la pression de l'opinion publique, l'Etat a dû réagir. Sous l'impulsion de Bennet (1939) s'est constitué un service de conservation de l'eau et des sols, présent dans chaque commune, pour conseiller et aider les fermiers qui demandaient un appui technique et financier pour aménager leurs terres; les services centraux (agronomes et hydrologues) ont effectué des études et des projets (Roose, 1994).

VI.2.1.3. Défense et restauration des sols (D.R.S)

Elle s'est développée en Algérie puis autour du bassin méditerranéen entre les années 1940 et 1960, pour faire face à de graves problèmes de sédimentation dans les retenues artificielles et de dégradation des routes et des terres. Il s'agissait avant tout de mettre en défense les terres dégradées par le surpâturage et le défrichement et de restaurer leur potentiel d'infiltration par l'arbre considérée comme le moyen le plus sûr d'améliorer le sol. D'énormes moyens mécaniques et une main d'œuvre locale abondante ont été mis en œuvre pour cultiver et reboiser les terres dégradées et pour structurer des zones d'agriculture intensives (Plantie, 1961).

VI.2.1.4. Gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (G.C.E.S)

A la fin des années 80, de nombreuses critiques de chercheurs de socio-économistes et d'agronomes se sont élevées pour constater l'échec fréquent des démarches d'aménagement hydraulique menées, trop rapidement sans tenir compte de l'avis des populations (Souadi, 2011). Une nouvelle stratégie est née pour satisfaire les besoins immédiats des paysans et des éleveurs. Elle tente de résoudre leurs problèmes immédiats, valoriser la terre et le travail des ruraux en améliorent le système de culture, en particulier l'infiltration de l'eau, l'enracinement et la nutrition des plantes. Cette approche a été nommée «gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols» (Roose, 1994).

VI.2.2. Techniques traditionnelles de lutte antiérosive

VI.2.2.1. Cordons de pierres isohypses

Le cordon de pierres est composé d'un alignement de blocs de cuirasse (photo VI.1). Il fait partie des dispositifs utilisables sur les zones de ruissellement en nappe ou les passages d'eau encore peu marqués. Il doit :

- Laisser filtrer l'eau en raison de sa qualité submersible, il ne sera pas emporté en cas de fortes pluies (contrairement aux diguettes en terre);
- Diminuer la vitesse de l'eau et donc son énergie et provoquer le dépôt des particules de terre, des graines et débris végétaux transportés par le ruissellement;
- Permettre la rétention d'une faible quantité d'eau en amont (lame de quelques centimètres), son infiltration aboutit au stockage d'une quantité d'eau supplémentaire au niveau du cordon de pierres (Ruelle et al., 1990).

VI.2.2.2.Paillage

Il consiste à étaler des résidus de récolte sur des parcelles sensibles à l'érosion. En absorbant l'énergie cinétique des gouttes de pluie, la paille contribue à protéger la surface recouverte contre l'agressivité des précipitations en limitant plus spécialement les effets de l'érosion splash(Photo VI.2).Le paillage agit de différentes façons par la matière organique qu'il apporte, enrichit le sol et améliore ses qualités physiques en augmentant la perméabilité, il protège des effets d'érosion par le vent et empêche de former sur le surface du sol une mince couche compacte s'opposant à la pénétration de l'eau (Boufaroua et al., 1998; in Melalih, 2012).

VI.2.2.3.Haies vives et lignes d'arrêt

Les haies vives placées de manière isohypse ou au moins perpendiculairement à la pente auront,comme les cordons de pierres(Photo VI.3), un effet sur le ruissellement en nappe, elles pourront:

- Jouer un rôle de filtre, favoriser une répartition uniforme de l'eau de ruissellement et le dépôt des matériaux transportés;
- Permettre la formation d'un talus progressif qui s'appuiera sur la haie et pourra induire un nouveau profil d'équilibre dans la parcelle(Melalih, 2012).

VI.2.2.8.Seuils en pierres sèches

Un seuil est un ouvrage qui s'apparente à un barrage perméable qui ralentit l'eau de ruissellement et arrête l'érosion latéralement(Photo VI.4) provoquées par les crues et la stabilisation de lits des ravins érodés par les creusements verticaux des crues. La pierre comme matériaux de construction des seuils est parfaitement bien adoptée d'autant plus qu'elle existe localement(Melalih, 2012).

VI.2.2.4.Terrasses

La technique est simple, les versants sont divers en plateforme horizontale plus ou moins écartées les uns des autres (Photo VI.5), on travaille en déblai à l'amont de l'axe de la future terrasse et en remblai à l'aval de cette axe. Les terres de remblais sont soutenues à l'aval soit par un mur de pierre sèche, soit par une pente gazonnée par ce procédé on diminuant la pente, on diminue sensiblement l'érosion mais on ne la supprime pas puisque les eaux de ruissellement descendent malgré tout, de haut vers le bas du versant (Melalih, 2012).

VI.2.2.5.Banquettes

Une banquette est une bande de terre de largeur réduite et constante, avec une fosse très large et un bourrelet, installée sur le versant délimitant une bande de culture (photo VI.6). Elle a pour but d'intercepter les eaux de ruissellement et de les empêcher d'éroder. Ces objectifs sont atteints dans les sols limoneux en cas d'orages d'été violents et brefs.

VI.2.2.6.Gabionnage

Les gabions se réalisent au moyen de pierres montées les unes sur les autres. Le gabionnage se caractérise par des dimensions suffisantes pour empêcher les sédiments de passer entre les mailles (photo VI.7); il ne faut pas placer les petites pierres au centre et les grosses à l'extérieur. Il est donc préférable de remplir les gabions à la main, ce qui minimise le risque d'une déformation importante de la structure à moyen terme.

VI.2.2.7.Reboisement

Le principe du reboisement répond à trois phases distinctes et successives : nettoyage réflexion et réfection précises des ingénieurs. Le sol jonché d'immondices passe au broyeur dont le compost fournit un excellent engrais. La réflexion consiste à chercher les causes des destructions, les autres origines possibles et le moyen d'éviter de nouveaux sinistres. La réfection arrive au dernier stade avec un choix adéquat pour sélectionner les espèces les mieux adaptées au sol et aux conditions climatiques, poussant rapidement et assurant une autoprotection (photo VI.8).

Le tableau (VI.1) synthétise les différents moyens de lutte proposés ainsi que leur caractéristiques techniques et leur sites d'implantation.



Photo VI.1 : Cordons de pierres isohypses.**Photo VI.2 :** Paillage.



Photo VI.3 : Haies vives et lignes d'arrêt.

Photo VI.4 Seuil en pierres sèches(Melalih, 2012).



Photo VI.5 : Terrasses soutenues par des talus.**Photo VI.6 :** Type de banquettes à rétention totale.



Photo VI.7 : Gabionnage.**Photo VI.8 :** Reboisement.

Tableau VI.1 : Synthèse récapitulative sur les moyens de lutttes antiérosives (Ruelle et al., 1990).

Technique	Sites d'implantation	Recommandations techniques
Cordons de pierres isohypses (figure VI.1)	-Ravine ayant 2 m de profondeur et 4 m de largeur. -Limites des zones cultivées et non cultivées. -Les limites amont des parcelles. -Ils sont indispensable dans les passages d'eau.	-Emplacement perpendiculaire à la ligne de plus grande pente. -Les extrémités devront se terminer avec un petit épi ploquant l'écoulement. -Il faut placer dans les interstices entre les grands blocs de petits blocs ou cailloux pour éviter la concentration du ruissellement entre ces derniers. -Une bonne stabilité est un facteur indispensable à l'efficacité et la pérennité du dispositif.
Seuil en pneus (figure VI.2)	-Ravine ayant une Profondeur ≤ 1 m et une Largeur ≤ 1 m.	-Il faut bien ligaturer les pneus entre eux -Il faut veillez à ce que le lit soit filtrant en dessous des pneus.
Pépinières villageoises (figure VI.3)	-Elles doivent se trouver dans le village ou à proximité immédiate et à faible distance du puits. -Zone à plein soleil.	-Maintien permanent de la pépinière est particulièrement souhaitable. -100 à 200 m ² est largement suffisante. -Protection de la pépinière contre la divagation des animaux. -La réalisation de la clôture est prioritaire avant la pépinière.
Reboisement (figure VI.4)	-Choix d'un site déforesté plutôt que vierge de toute végétation -Berges de la retenue du barrage. -Versant à forte pente.	-Constitution de cordons pierreux en amont du site pour ralentir l'eau. -Le choix porte sur l'espèce locale de la zone à aménager. -Il faut bien diagnostiquer le problème afin d'éviter un nouveau sinistre.
Travail du sol	-Zone de culture	-Sens des lignes de labours doivent être perpendiculaire au sens d'écoulement pour améliorer l'infiltration et briser l'énergie cinétique de l'eau.
Terrasses (figure VI.5)	-Hauteur comprise entre 1 et 2,5m suivant la pente du versant et une largeur de 4 à 10 m.	-Les terrasses sont confectionnées selon les courbes de niveau. -Les talus peuvent être laissés à nu sur les sols peu érodables et peu pentus. - Les talus sont plantés d'herbacées ou d'arbres fruitiers sur les versants pentus et sensibles à l'érosion.
Banquettes(figure VI.6)	-Pluie annuelle est de 250 à 400 mm. -Sols qui ont tendance à former une croûte en surface, dont les pentes dépassent les 6 %.	-Pour assurer leur fonctionnement, les banquettes d'écoulement sont aménagées avec une pente longitudinale du canal. -La pente d'écoulement est de l'ordre de 0,4 %.
Haies vives (figure VI.7)	-Limites des zones de culture. -Les bordures des parcelles et des pistes. -Au sein des parcelles lorsqu'elles sont suffisamment importantes.	-Elles doivent constituées un maillage. -Emplacement en courbes de niveau -Distance optimale entre les haies se situe entre 30 et 50m en fonction de sa sensibilité à l'érosion et à l'infiltrabilité. -La distance entre les plants est entre 0,3 et 0,5m.
Seuils en pierres sèches (figure VI.8)	-Petites ravines d'une profondeur allant jusqu'à 1,50 m -Source proche d'alimentation en pierres de qualité disponible et accessible partout dans la zone. -Pente faible à moyenne et un substrat moyennement tendre à dur.	- Main d'œuvre qualifiée - Eviter sur les terrains argileux et les terrains glissants dans. - Recommandé sur les terrains de culture, les périmètres de reboisement, les terrains de parcours.

Tableau VI.1 : Synthèse récapitulative sur les moyens de luttés antiérosives (suite).

Technique	Sites d'implantation	Recommandations techniques
Gabionnage (figure VI.9)	- Ravine torrentielles ayant une Largeur > 4m et Profondeur > 2m. - Ravine déjà développée (plus d'un mètre de profondeur) - Pente supérieure à 20%.	- Placer le gabionnage perpendiculairement au sens d'écoulement de l'eau. - Fixer définitivement les atterrissements et les berges de la ravine en y implantant de la végétation. - Les gabions devront impérativement être ligaturés les uns aux autres sur tout le pourtour.
Banquettes en grillage (figure VI.10)	- Dans les terrains à roche dure (schistes, grès, calcaire), pentus et dépourvus de végétation ;	- Ces piquets doivent avoir une forte inclinaison vers l'amont. - Les haubans doubles sont fixés à chaque jambe de force et reliés aux piquets d'ancrage.

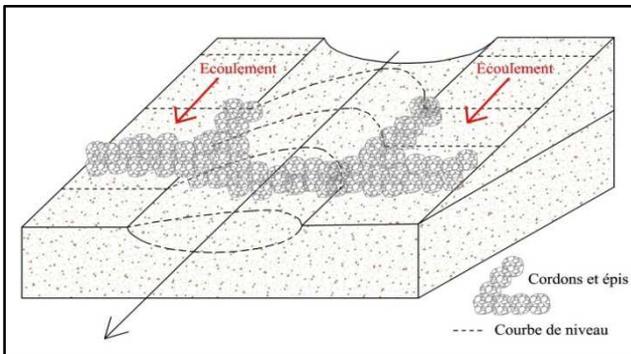


Figure VI.1 : Cordons en pierres sèches

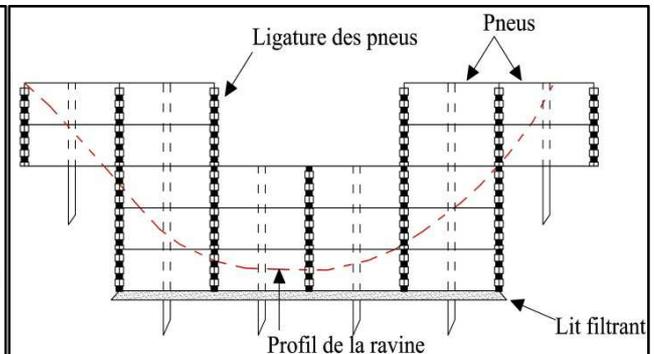


Figure VI.2 : Seuils en pneus usés

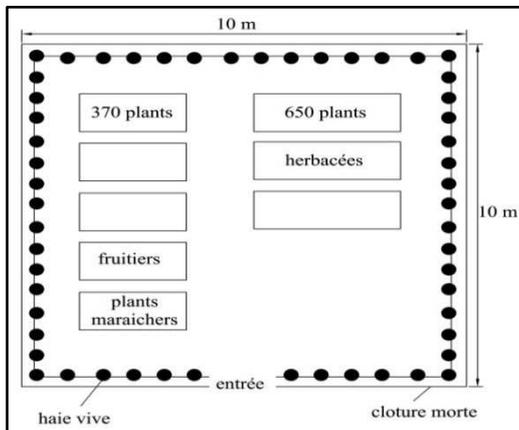


Figure VI.3 : Pépinières villageoises

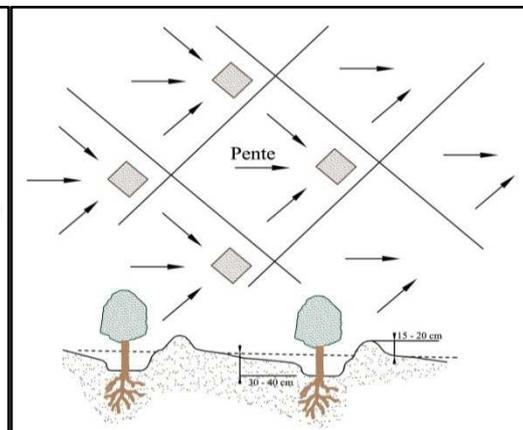


Figure VI.4 : Reboisement

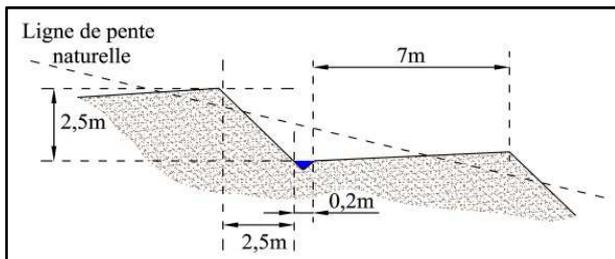


Figure VI.5 : Profil d'une terrasse

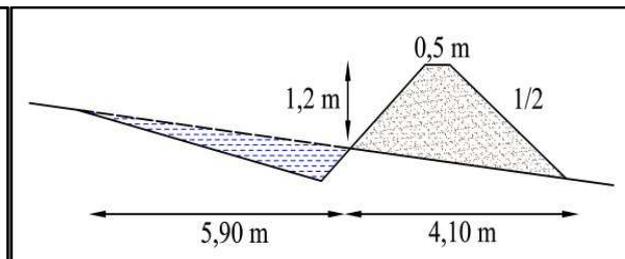


Figure VI.6 : Profil d'une banquette

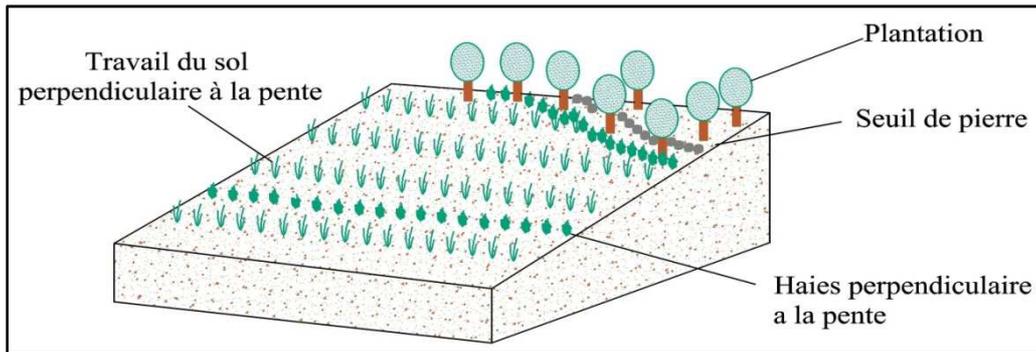


Figure VI.7 : Restauration parcellaire (Haies vives)

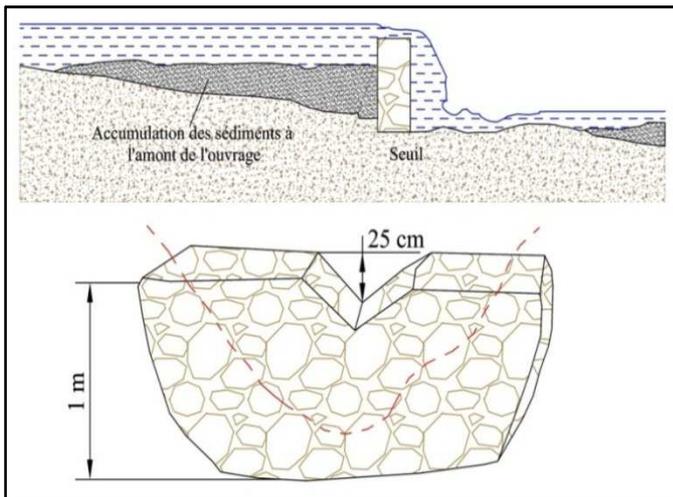


Figure VI.8 :Seuils en pierres sèches.

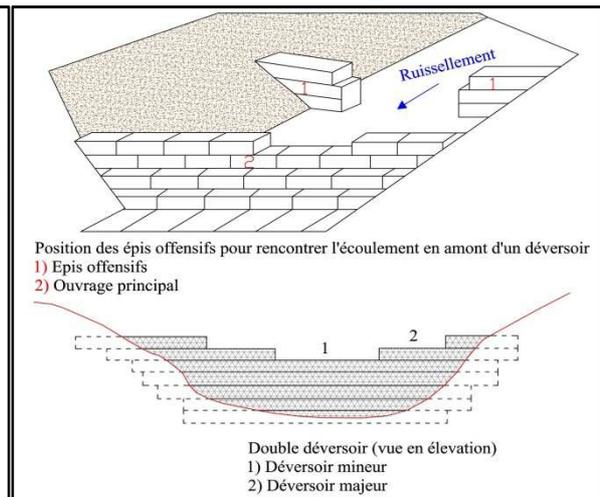


Figure VI.9 :Seuil en gabion.

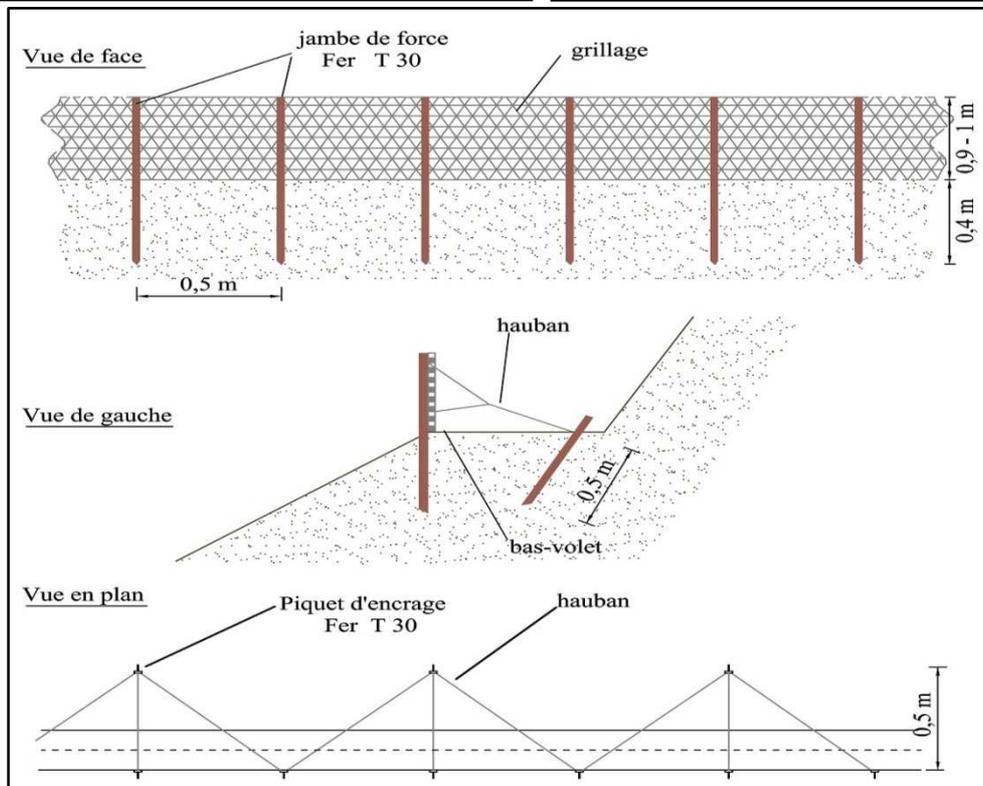


Figure VI.10 :Banquette en grillage.

VI.3.Moyens de lutte contre l'envasement du barrage S.M.B.A

VI.3.1.Moyens de luttés préventifs

Les moyens de luttés préventifs consistent à prendre les mesures, les moyens, les procédures et les techniques nécessaires afin d'éviter qu'un ouvrage ou un aménagement soit touché par un facteur mettant sa pérennité en danger.

VI.3.1.1.Recommandations pour le soutirage des courants de densité dans la retenue du barrage

Les opérations de dévasement doivent viser un double objectif :

- Le maintien du dégagement des pertuis des deux vidanges de fonds, afin que ces organes de sécurité restent toujours opérationnels;
- Lutter contre la sédimentation qui réduit la capacité de la retenue.

Pour le dégagement des pertuis, on effectue systématiquement des « petites chasses » trimestrielles, tant en rive droite qu'en rive gauche.

Pour lutter contre l'envasement dans la retenue, on s'efforcera de procéder aussi souvent que possible pendant les crues, et durant les jours suivants, à des soutirages de dévasement (faibles débits sur de longues durées) :

- Par la vidange rive droite, calée au plus bas (chapitre I, photo I.6);
- Par la vidange rive gauche si la capacité de ces circuits s'avère insuffisante (en cas de fortes crues) (photo VI.9).
- Par le jet creux ancienne alimentation en irrigation gravitaire du périmètre de la mina (photo VI.10) (Coyen et Bellier, 1980).

VI.3.1.2.Soutirage des courants de densité

En absence de soutirage la décantation serait suivie de consolidation, et le soutirage deviendrait de plus en plus difficile avec le temps. Si au contraire on ouvre les vannes de fond modérément, la couche dense du fond s'écoule suivant la pente tandis que les couches supérieures restent à peu près immobiles, et on peut évacuer la vase du fond, constamment alimentée par la décantation du lac supérieur immobile (figure VI.11, (a)). Si on ouvre trop les vannes, l'écoulement de la couche du fond n'est pas sensiblement accéléré, mais on aspire de l'eau dans les zones de densité moindre (figure VI.11, (b)). Si on attend trop (environ un mois), on évacuera qu'une quantité relativement faible de sédiments, les dépôts ayant eu le temps de se consolider.

- On peut ainsi entretenir une pente très faible des dépôts de vase à l'amont des pertuis de prise au moyen de soutirages modérés, sous réserve d'une exploitation judicieuse du matériel

disponible, appuyée sur une solide expérience du chef d'exploitation qui devra par expérience apprendre à connaître les temps de transit et de concentration des apports solides dans la retenue selon les différents types de crues.

- Il faut en effet régler les débits et les durées de soutirage selon la concentration de la boue évacuée, et sans dépasser le débit d'apport des courants de densité (surtout en fin de soutirage quand cet apport tend asymptotiquement vers zéro, et que la crue est déjà terminée depuis un temps assez long.
- Il faut aussi, en fin d'opération et quelques jours après, revenir à intervalles réguliers tenter de courts soutirages, afin de vérifier qu'un petit débit d'eaux chargées au fond ne subsistepas, pouvant bloquer les pertuis ou crée devant eux un talus de vase trop raide.
- Si un soutirage n'est pas effectué pour une raison quelconque, on perd la capacité correspondant au volume des apports solides non évacués. Cette perte se répercute ultérieurement, car la vase en se déposant crée un plateau presque horizontal sur le fond en légère pente qui existait auparavant (figure VI.12, (a)). A la crue suivante, l'écoulement de la vase ne se fera qu'après reconstitution d'une pente de fond suffisante, par comblement de la partie horizontale(figure IV.12, (b)). Il importe donc de ne négliger aucune occasion de soutirer la vase pour entretenir la cuvette(Coyen et bellier,1980).



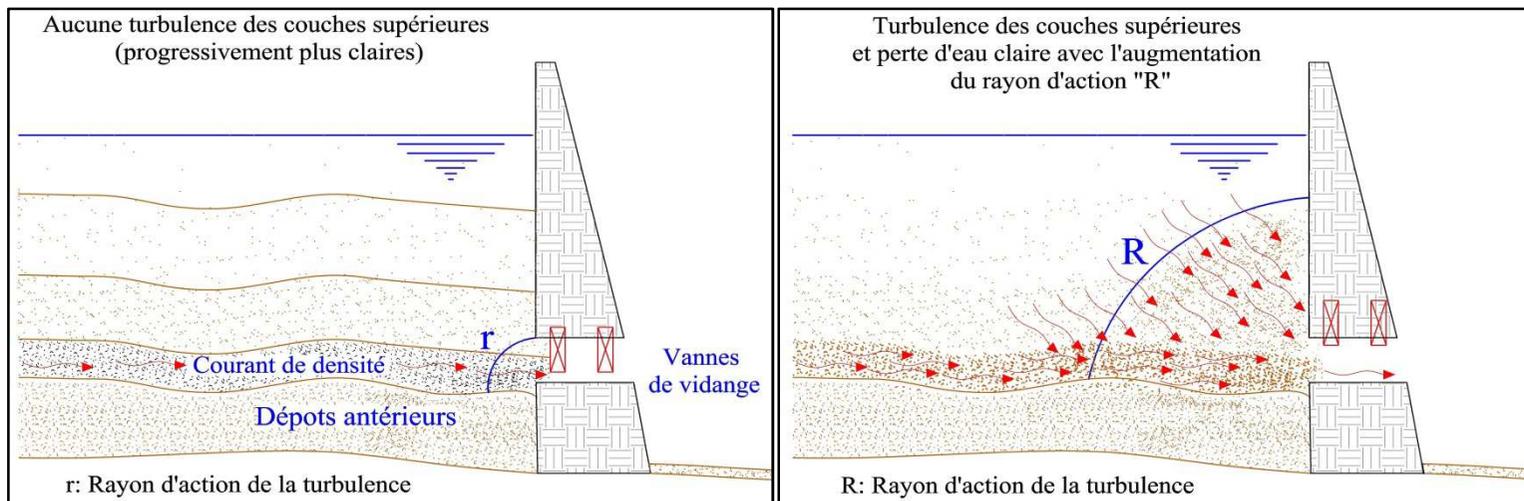
Cliché, Kalkoul Omar(18/03/2013)

PhotoVI.9 : Chasse des courants de densité par vidange de fond (barrage S.M.B.A).



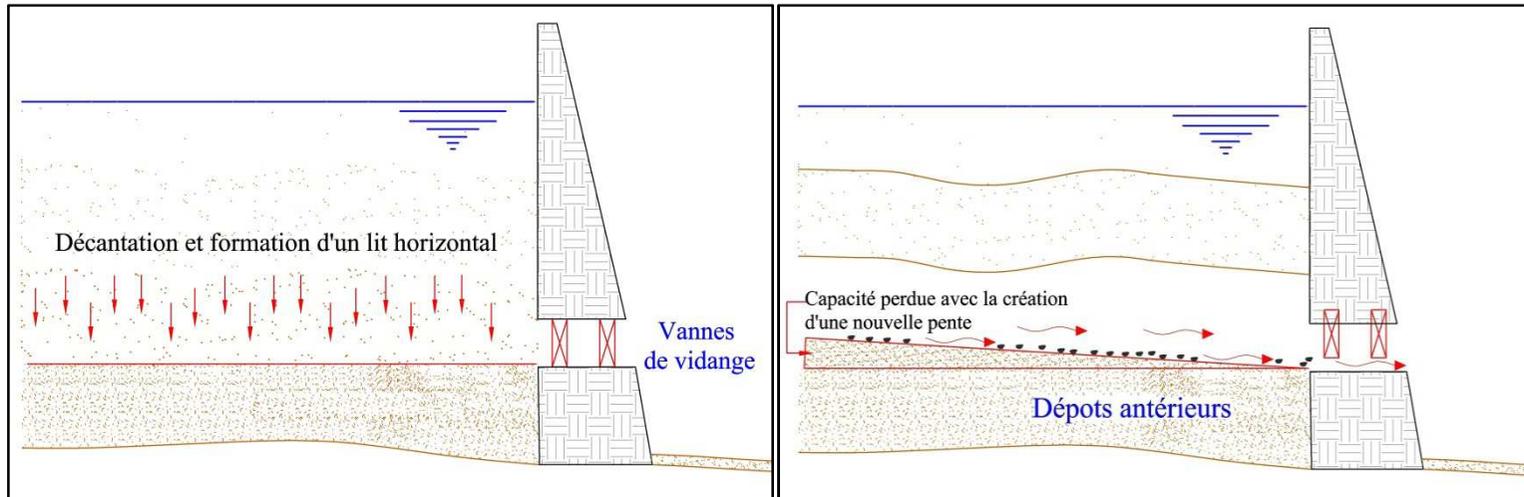
Cliché, Kalkoul Omar(18/03/2013)

Photo VI.10 : Chasse des courants de densité par jet creux (barrage S.M.B.A).



a) : Ouverture modérée de la vanne de vidange. b) : Ouverture abusive de la vanne de vidange.

Figure VI.11 : Procédé d'ouverture des vannes de vidange.



a) : Absence de soutirage des courants de densité. b) : Perte de la capacité à la prochaine crue.

Figure VI.12 : Procédé d'ouverture des vannes de vidange.

VI.3.2.Moyens de luttés curatifs

Ces moyens représentent les procédures technico-économiques afin de remédier à une problématique technique et environnementale et augmenter la durée de vie d'un ouvrage.

VI.3.2.1.Définition du dragage

Le dragage est une opération ayant pour objet le prélèvement de matériaux, notamment boues, limons, sables et graviers, du fond d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau à l'aide de moyens mécaniques, hydrauliques ou pneumatiques dans un but d'aménagement ou d'entretien, c'est-à-dire tous travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelle. Cela exclut un approfondissement ou un élargissement du lit ([Reminieta., 1997](#)).

VI.3.2.2.Objectifs des opérations de dragage

Les facteurs qui poussent à envisager le dragage sont liés soit à des considérations hydrauliques, soit à l'entretien et à la restauration du milieu. Le dragage peut avoir les objectifs suivants :

- Procéder à des travaux d'excavation sous l'eau dans les retenues des barrages « la récupération de la capacité de stockage ».
- Extraire les sédiments immergés tel que sable, gravier, argile, les métaux précieux et les agents fertilisants.
- La navigation gênée ou rendue impossible par l'envasement : Entretien et approfondir les voies navigables.
- Nettoyer les fonds pollués.
- Améliorer ou maintenir la capacité de débit des cours d'eau en augmentant les profondeurs naturelles ([Scordia, 2008](#)).

VI.3.2.3.Techniques de dragage

Des différentes techniques de dragage ont été développées. Il est courant de classer les équipements de dragage selon leur principe général de fonctionnement. Trois catégories peuvent être recensées.

a/ Dragage mécanique

Ils'effectue grâce à des engins à godets qui opèrent soit depuis les berges (pelle mécanique), soit depuis la surface (pelle sur ponton, drague à godets...etc). L'extraction de sédiments pollués se fait actuellement majoritairement par cette méthode (figure VI.13 et photo VI.11).

b/ Dragage hydraulique

Les matériaux sont désagrégés par jets d'eau sous pression ou par rotation d'un outil mis en suspension pour être aspirés et évacués par des pompes vers les points de stockage (figure VI.14 et photo VI.12).

Par exemple la technique d'aspiration utilise des pompes centrifuges, aspirant à travers un tube d'élinde, muni d'un embout, appelé bec d'élinde, un mélange d'eau et de sédiments. Elles aspirent et refoulent les sédiments sous forme de boues liquides dont la teneur en eau varie autour de 85% (Serbah, 2011).

c/ Dragage à l'américaine

C'est une technique particulière qui consiste à provoquer la remise en suspension des sédiments au moyen d'une hélice ou d'air comprimé dans les cours d'eau ou chenaux à fort courant. Les sédiments sont repris dans le flux et se redéposent le plus souvent en aval. Dans certains cas, une conduite de refoulement peut assurer le transfert des sédiments à plusieurs kilomètres du lieu de dragage. Le dragage à l'américaine consiste à rejeter en continu dans la veine d'eau les matériaux dragués afin d'utiliser le courant naturel pour évacuer les sédiments (Serbah, 2011).

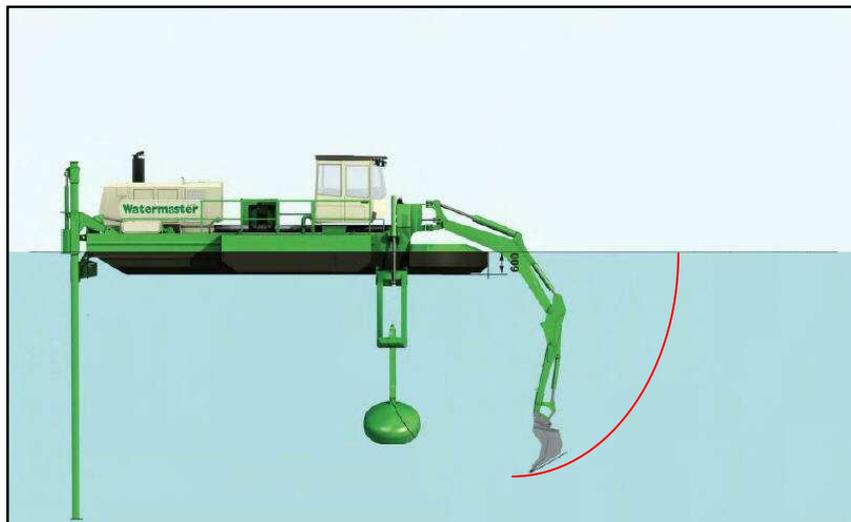


Figure VI.13: Rayon d'action de la drague mécanique. Photo VI.11: Drague mécanique.

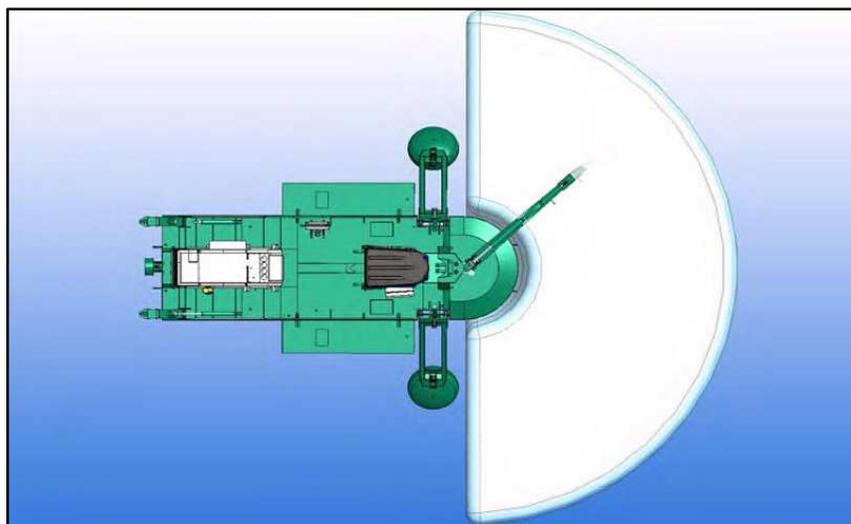


Figure VI.14 : Rayon d'action de la drague hydraulique.

Photo VI.12: Drague suceuse à désagrégateur.

VI.4. Conclusion

Après localisation des zones ravinées nous avons proposé des moyens de lutte antiérosif : l'un biologique tel que le reboisement...etc et l'autre mécanique tel que le gabionnage...etc. La priorité d'intervention reste soumise à la pérennité du barrage et des zones aux alentours.

Le soutirage des courants de densité minimise les risques d'envasement du barrage S.M.B.A par les chasses de vidange de fond. Les gestionnaires du barrage doivent être attentifs aux moments des crues pour procéder à l'ouverture rationnelle de la vanne car une augmentation de la hauteur d'ouverture entraîne un gaspillage énorme d'eaux claires.

Le barrage S.M.B.A nécessite des opérations de dragage, car l'implantation d'un autre barrage dans le bassin versant de l'oued mina ayant presque les mêmes caractéristiques hydrologiques et techniques est pratiquement très laborieux.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

1. Conclusion générale

Au terme de cette étude, qui s'inscrit dans le domaine de l'érosion hydrique et de l'envasement des barrages, nous avons pour objectif principal l'évaluation indirecte des pertes en sols du bassin versant de l'oued Mina, et la quantification de l'envasement du barrage S.M.B.A. A cet effet nous avons pu conclure que :

Le bassin versant de l'oued Mina au droit du barrage S.M.B.A (4900km²)situé entre les tranches d'altitude 139,7 et 1306,9m, possède une forme allongée avec un temps de concentration évalué à (25,83 heures). Selon la classification de l'O.R.S.T.O.M, la zone d'étude est classée relief fort.

Le jurassique supérieur occupe la partie centrale du bassin avec une dominance de marnes calcaires dans une proportion de 66,28%. La partie septentrionale est caractérisée par l'ère cénozoïque avec 27,98%. Le crétacé et le trias couvrent une petite surface estimée à 5,58%.

L'étude des données climatiques de la station de Matemore montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride avec une lame d'eau moyenne annuelle précipitée évaluée à 325,3 mm.

L'application de la méthode des doubles masses des cinq stations choisies (Mahoudia, Sidi Bakhti, Rosfa, Takhemaret et Sidi AEK Djilali) dont la période d'étude s'étale de (1978/79 - 2009/10), révèle une homogénéisation dans les séries pluviométriques étudiées. La variabilité temporelle est inversement proportionnelle à l'échelle considérée, car à l'échelle mensuelle nous constatons une très grande variabilité, vient après l'échelle saisonnière et en dernier lieu l'échelle annuelle. Le régime saisonnier le plus dominant dans la zone d'étude est de type HPAE (Hiver, Printemps, Automne, Été). La méthode des polygones de Thiessen montre une pluviométrie moyenne annuelle de 282,1 mm (1978/79 - 2009/10) avec une variabilité spatiale décroissante du Nord vers le Sud et d'Est en Ouest. D'autre part, l'application des tests statistiques de détection des ruptures a montré une transition du régime pluviométrique en 2006 et 2007, caractérisée par une hausse des précipitations.

L'application de la classification de Strahler à la zone d'étude montre que le cours d'eau principal possède l'ordre 8. Les résultats de l'analyse morphométrique du bassin versant témoignent d'un bon degré d'organisation hiérarchique du réseau hydrographique. Le rapport

Conclusion générale et recommandations

de Melton démontre que le réseau hydrographique est au stade évolutif encore en voie de développement. L'estimation indirecte des pertes en sols avec l'Analyse Géomorphologique Quantitative donne une érosion spécifique de $834,1 \text{ t/Km}^2/\text{an}$ soit $4,09 \times 10^6$ tonnes correspondant à $66,41 \text{ Hm}^3$ de sédiments érodés entre (1978/2003). Ces résultats sous-estiment les mesures réelles avec un pourcentage de 18,3 %, par contre en se référant au transport solide total arrivé à la cuvette du barrage l'erreur augmente jusqu'à 48,31%. Ainsi, on pourrait dire que le modèle A.G.Q n'est pas applicable pour la zone d'étude.

La comparaison topographique de la retenue du barrage S.M.B.A entre la mise en eau du barrage (1978), et les deux campagnes du levé bathymétrique (1986 et 2003) montre que l'envasement est un phénomène non-linéaire, ceci provient des apports solides entrant au barrage. La visite effectuée dans la cuvette du barrage montre que l'état des berges est très dégradé. L'application du modèle P.I.S.A (Previsioni Interimento Serbatoi Artificiali) sur les sous-bassins formant le bassin versant révèle une répartition variable de production des sédiments, ceci dépend des conditions locales propres de chaque zone considérée. L'addition de chaque taux de production des sédiments de chaque sous-bassin donne un taux de sédimentation évalué à $136,589 \text{ Hm}^3$ (1978/2003) correspondant à une érosion spécifique de $1715,40 \text{ t/km}^2/\text{an}$. Ce résultat est surestimé de 1,68 fois de celui trouvé avec le levé bathymétrique de 2003 évalué à $81,291 \text{ Hm}^3$, l'écart entre les deux valeurs est estimé à 68,02%. En réintégrant les volumes des sédiments soutirés par les organes de vidange ($47,201 \text{ Hm}^3$) durant l'exploitation du barrage entre (1978/2003) au taux d'envasement mesuré sur terrain, l'écart diminue jusqu'à 6,3%. Ainsi, on pourrait constater pour le barrage S.M.B.A une compatibilité entre les estimations issues du modèle P.I.S.A et les mesures réelles.

La superposition des cartes thématiques entre elles comme la carte d'occupation des sols, la carte lithologique, la carte des pentes et celle du réseau hydrographique nécessite l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (S.I.G), à cet effet on distingue trois zones. Les terrains très dégradés localisés dans la partie Nord du bassin versant et présentent un ravinement à un stade avancé évalué à 10% de la superficie totale. Les terres moyennement érodées sont concentrées dans la partie centrale Est avec une proportion de 57%. Les zones à faible sensibilité à l'érosion hydrique représentent le tiers de la superficie, elles sont localisées dans la partie Sud. Partant de ce constat la priorité d'intervention revient à la protection du barrage S.M.B.A contre un envasement précoce pour cela les travaux de lutte antiérosifs doivent être planifiés du Nord vers le Sud.

Conclusion générale et recommandations

Afin de préserver le barrage S.M.B.A contre un envasement précoce on a recours à des moyens de lutte préventifs comme l'aménagement du bassin versant avec des techniques mécaniques (gabionnage, seuils en pierres sèches, seuils en pneus usés, cordons de pierres isohypses, banquettes en grillage, banquettes, terrasses) et biologiques (paillage, reboisement, haies vives, pépinières villageoises). La chasse des courants de densité par les organes de vidange s'avère très efficace lors des crues entrant au barrage. Un dragage mécanique et hydraulique sont nécessaires lors de l'envasement de la retenue du barrage S.M.B.A.

Au cours de cette étude modeste réalisée tant par des visites, des déplacements sur les lieux, des renseignements recueillis auprès des établissements concernés et enfin des constatations faites, nous espérons avoir dressé un tableau relatif à l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Mina et de l'envasement du barrage S.M.B.A.

2. Recommandations pour l'aménagement du bassin versant de l'oued Mina

De tout ce qui précède afin de protéger et préserver les ressources naturelles, notamment les eaux et les sols, les recommandations destinées à l'aménagement du bassin versant se résument comme suit :

- Actuellement (2014), une étude d'aménagement antiérosif du bassin versant de l'oued Mina est en cours avec la coopération Algéro-américaine. La détection des zones vulnérables à l'érosion hydrique sont localisées au moyen du Césium 137. Dans ce cadre d'étude, les responsables et la population de la région doivent prévenir l'érosion avec tous les moyens actuellement disponibles notamment par des projets de développement et la sensibilisation des populations locales sur les conséquences néfastes de ce fléau.
- Les services forestiers doivent être attentifs et suivre à la lettre la réalisation des travaux car la non-conformité de la réalisation avec le plan d'exécution mène à un échec du projet;
- Tant qu'on n'a pas amélioré l'infiltration sur le bassin versant, il faut éviter de tenter de reboucher la ravine sinon avec le temps elle retrouvera un autre lit;
- L'intégration de la population à la gestion des ressources en sols vise à réduire l'érosion hydrique, à contrôler les ruissellements. Bien que les choix des pratiques antiérosives ne posent pas de problèmes aux aménagistes de conservation des eaux et des sols de la région, l'intégration du facteur humain continue d'être à l'origine de l'échec de certains projets de C.E.S.

Conclusion générale et recommandations

- L'emplacement des seuils doit être choisi avec soin selon l'objectif visé. Si on cherche seulement à rehausser le fond de la ravine pour que les versants atteignent la pente d'équilibre naturel, il faut choisir un verrou. Si on cherche à fixer le maximum de sédiments ou à récupérer des espaces cultivables, il faut choisir les zones à faible pente, les confluent de ravines secondaires, les versants évasés et construire de gros ouvrages-poids qui seront rehaussés progressivement.
- L'écartement entre les seuils est fonction de la pente du terrain. Le déversoir aval doit être à la même altitude que la base du seuil amont observable sur place.
- L'énergie de chute de l'eau qui déborde du déversoir doit être amortie par une bavette (enrochement, petit gabion, grillage + touffes d'herbes)
- Le bétail doit être tenu à l'écart de l'aménagement, ce dernier dégrade la végétation. En compensation, on peut permettre des prélèvements de fruits, de fourrages et plus tard de bois, en échange de l'entretien de l'aménagement.

3. Recommandations pour la protection du barrage S.M.B.A contre l'envasement

Les recommandations dictées en cette partie visent l'augmentation de la durée de vie du barrage S.M.B.A, elles s'énumèrent comme suit :

- Au cours de l'été (2014), un dragage est prévu pour le barrage S.M.B.A dans la partie amont de la retenue, le maître d'ouvrage (A.N.B.T) doit exiger que le stockage des sédiments se réalise au niveau des bassins de décantation et non sur les berges du barrage;
- L'aménagement des berges du barrage S.M.B.A constitue la première opération, car l'érosion d'une particule de sable en cet endroit est directement liée à l'envasement sans passer par un temps de transport solide dans les cours d'eaux;
- L'aménagement des oueds est primordial du Nord vers le Sud surtout au niveau et après la confluence des deux oueds (Oued Haddad et Oued Mina) car une augmentation du débit mène à une production d'une énergie capable de provoquer différentes érosions (érosion du lit et érosion des berges);
- Le barrage S.M.B.A nécessite des opérations de dragage dans l'immédiat après de la digue afin d'éviter que la retenue n'atteigne un stade critique où les opérations de dragage représentent un équivalent à celui de la construction d'un autre barrage;
- Une bonne gestion des courants de densité par les gestionnaires du barrage assure la prolongation de la durée de vie de l'ouvrage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelbaki, A., Abdelbaki, C., Ouldache, E., Semmar, H. (2009).** Mise en place d'un système d'information géographique pour l'élaboration d'un plan d'aménagement de protection anti-érosive. Cas du sous-bassin versant de Oued Bouguedfine, wilaya de Chlef, Algérie. *Revue Nature et Technologie*. n° 01, 24-32 pp.
- Abrahams, A-D., Parsons A-J. (1991).** Relation between sediment yield and gradient on debris-covered hillslope, Walnut Gulch, Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull* 103 : 1109-1113.
- Achite, M., Meddi, M. (2005).** Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau*, 18(n° spécial), 37-56 pp.
- Arabi, M. Roose, E. (1989).** Influence de quatre systèmes de production en région méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bull. Réseau Erosion, ORSTOM, Montpellier* 9 : 39-51 pp.
- Avena, G., Giuliano, G. (1967).** Considerazioni teorico-pratiche sull'applicazione della analisi geomorfica quantitativa ai reticolifluviali. *L'universo* 47/2
- Avena, G., Lupia Palmieri, E. (1969).** Analisi geomorfica quantitativa in Idrogeologia dell'altobacinodel Liri (App. Centrale). *Geol Rom*, VIII
- Avena, G., Giuliano, G., Lupia Palmieri, E. (1967).** Sulla valutazione quantitativa dell'archizzazione e dell'evoluzione dei reticolifluviali. *Boll Soc Geol It* 86 p.
- Bachaoui, B., Bachaoui, E., El Harti, A., Bannari, A., El Ghmari, A. (2007).** Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique : exemple du haut atlas marocain. *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, 393-404 pp.
- Baldassarre, G., Bazzoffi, P. (1998).** Conservation of surface water resources in the Mediterranean basin. A new simplified model for the assessment of reservoir sedimentation. *AAEGG Nat Symp. Edizioni del sud, Bari. Tirana*, 105–111 pp.
- Baldassarre, G., Bazzoffi, P., Palumbo, N. (2001).** Determining soil erosion by direct surveys and prediction models for assessment of reservoir sedimentation—case study from Italy. In: 3rd international conference on land degradation. *Embrapa Solos, Doc. N° 40 Rio de Janeiro*, 170-173 pp.
- Baldassarre, G., Dazzaro, L., Walsh, N. (1980).** Geolitologia ed analisi geomorfica quantitativa dei bacini del T. Inferno e del T. Serrapotamo (Basilicata). *Geol App e Idrogeol*, XV, 51–67, Bari.

Références bibliographiques

- Baldassarre, G., Palumbo, N. (2009).** Identification and assessment of soil erosion processes in a widely cropped watershed in southern Italy. Land degradation and rehabilitation-dryland ecosystems-advances in geocology, Catena Verlag GMBH, Reiskirchen 40, 207–217 pp.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G. (2000).** Effect of agricultural land use changes on sediment yield and reservoir sedimentation: application of an indicator of off-farm sediment flow. In: Water conf and exp ‘‘Guarding the Global Resource’’. Auckland, New Zealand, 110-121 pp.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., Pellegrini, S., Bassignana, A. (1997).** Model prediction of water storage decrease in Italian reservoirs. Collection Environnement de l'Université de Montréal, Hors-série 9:249-252 pp.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., Pellegrini, S., Radina, B. (1998).** Neural model for assessing basin sediment yield and reservoir sedimentation. 8th Int IAEG Congress, Vol 4. Balkema, Rotterdam, 2717-2724 pp.
- Bazzoffi, P., Baldassarre, G., Vacca, S. (1996).** Validation of PISA2 Model for automatic assessment of reservoir sedimentation. In: Albertson M (ed) Proceedings of the international conference on reservoir sedimentation. Colorado State University, Fort Collins, 519-528 pp.
- Bazzoffi, P., Van Rompaey, A. (2003).** PISA model to assess off-farm sediment flow indicator at watershed scale in Italy. OECD expert meeting ‘‘Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators’’ 25–28 March, 2003, Rome, Italy.
- Bekhti, B., Errih, M., SidiAdda, M. (2012).** Modélisation de la sédimentation dans les retenues de barrages en Algérie (barrage Es-Saada). Sécheresse vol. 23, N° 1, 38-47 pp.
- Belleudy, P., Valette, A. et Graff, B. (2008).** Passive hydrophone monitoring of bedload in river beds : First trials and exploration. Technical report, USGS Scientific Investigations Report.
- Benchaabane, A. (1997)** Impact de l’exploitation du prélèvement du bois de feu sur l’érosion du sol en haute montagne (cas du haut Atlas de Marrakech, Maroc). Sécheresse, 8(4) : 265-269 pp.
- Benkhadja, R., Hattab, A., Mahdaoui, N., Zehar, C. (2012).** Assessment of soil losses and siltation of the K’sob hydrological system (semiarid area-East Algeria). Arabian Journal of Geoscience. 10 p.
- Bhavana, N., Savita, S., Ganesh, R., Rahul, O. (2013).** Quantitative geomorphological analysis for characterization of selected watersheds in western maharashtra, india. International Journal of Remote Sensing & Geoscience (IJRSG), Volume 2, Issue 2, N° 2319-3484, 15 pp.
- Birot, P. (1981).** Les processus d'érosion à la surface des continents Masson, Paris.
- Bouchetata, A., Bouchetata, T. (2006).** Propositions d’aménagement du sous-bassin-versant de l’oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l’érosion hydrique. Sécheresse vol. 17, n° 3, 415-424 pp.

Références bibliographiques

- Boufaroua, M., Yemna, K. (1998).** Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans les zones arides et semi-arides de la Tunisie, 94-104 pp.
- Bou Kheir, R., (1998).** Apports de la télédétection et du SIG pour la gestion de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban ; Projet pilote : Jbaïl - Qartaba. DEA, Aupelf-Uref en collaboration avec les Universités Libanaise, Saint-Joseph, Saint-Esprit (Liban) et en partenariat avec l'INA PG et l'INRA (France), 85 p.
- Cicacci, S., D'alessandro, L., Fredi, P. (1983).** Sulla valutazione indiretta dell'interrimento nei bacini lacustri: il lago artificiale di Scandarello (Rieti). Atti XXIII Congr Geog It, vol II, t III.
- Cicacci, S., D'alessandro, L., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. (1988).** Contributo della analisi geomorfica quantitativa allo studio dei processi di denudazione nel bacino idrografico del T. Paglia (Toscana meridionale—Lazio settentrionale). Suppl Geog Fis Dinam Quat I
- Cicacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. (1977).** Rapporti fra trasporto solido e parametri climatici e geomorfici in alcuni bacini idrografici italiani. Atti Conv. C.N.R., Mis. trasp. Solido al fondo corsi d'aqua.
- Cicacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., Pugliese, F. (1980).** Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell'entità della erosione nei bacini fluviali. Boll Soc Geol It 99:455–516 pp.
- Cicacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., Pugliese, F. (1987).** Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. Intern. Geomorph II.
- Chorley, R.J. (1969).** Water, Earth and Man: a synthesis of hydrology, geomorphology and socio-economic geography, Meuten and Com pany Ltd (eds), London, 590 p.
- Collinet, J., Valentin, C. (1979).** Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Cahiers O.R.S.T.O.M, série Pédologie, 17(4) : 238-328 pp.
- Conseil des sciences du canada. (1986).** La dégradation du sol au canada: un mal en progression, gouvernement du canada, ministère des approvisionnements est services, ottawa, 24 p.
- Cooke, R-U., Warren, A., Goudie, A-S. (1993).** Desert Geomorphology. UCL Press, London, 300 p.
- Courault, D. (1989).** Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection : analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Thèse de doctorat, Paris, France, 239 p.
- Coyne et Bellier. (1980).** Barrage Es saada sur l'oued Mina, Consignes d'exploitation. Bureau d'ingénieur conseils, 5 Rue d'Héliopolis. 75017 Paris.
- Coyne et Bellier. (1985).** Barrage SMBA, Rapport de visite, Consignes d'exploitation. Bureau d'ingénieur conseils, 5 Rue d'Héliopolis. 75017 Paris.

Références bibliographiques

- Daoudi, M., Salmon, M., Dewitte, O., Gérard, P., Abdellaoui, A., Ozer, A. (2009).** Prédiction de l'érosion ravinante en Algérie : vers une nouvelle approche probabiliste à l'aide de données multisources. Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger. 7 p.
- Delcaillau, B. (2004).** Reliefs et tectonique récente, Ed. Vuibert, Paris, 259 p.
- De Martonne, E. (1926).** Arésisme et indice aridité. Comptes Rendus de L'AcadSci, Paris, 182, 1395-1398 pp.
- Demmak, A. (2010).** Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau, Programme MEDA de l'Union Européenne, Alger, Algérie, 102 p.
- Doornkamp, J-C. (1968).** The role of inselbergs in the geomorphology of southern Uganda. Transactions of the Institute of British Geographers, vol. 44, 151 –162 pp.
- Douvinet, J., Delahaye, D., Langlois, P. (2008).** Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle, Cybergeog : European Journal of Geography, N°412. 22p.
- Dramis, F., Gentili, B. (1977).** I parametri F (frequenza di drenaggio) e D (densità di drenaggio) e loro variazione in funzione della scala di rappresentazione cartografica. Boll Soc Geol It 96 p.
- Dubreuil, P. (1974).** Initiation à l'Analyse Hydrologique. Masson, Paris, France, 214 p.
- Fleurant, C., Douvinet, J. Delahaye, D. (2013).** Introduction du numéro thématique : Hydro-géomorphologie quantitative, Géomorphologie : relief, processus, environnement. Volume 1, 3-6 pp.
- Gaillard, C. (2001).** Amélioration d'un modèle distribué d'érosion hydrique par la prise en compte spatiale de l'influence anthropique en milieu agricole. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada. 178 p.
- Garcia-Ruiz, J., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P., Ortiza, L., White, S., Gonzalez, C., Marti, C. (1996).** Land use changes and sustainable development in mountain areas : a case study in the Spanish Pyrenees. Landscape Ecology 11(5) : 267-277 pp.
- Geoid. (2003).** levés bathymétriques des barrages en exploitation, rapport technique Sidi M'hamed Ben Aouda. Relizane, Algérie.
- Gerrard, G. (1999).** Climatologie de l'environnement. Cours et exercices corrigés. Préface de Jean Mamy 2^{ème} Edit. Dunod, 300 P.
- Gomer, D. (1994).** Ecoulement et érosion dans les petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-méditerranéen. Coopération technique Algéro-allemande. GTZ-ANRH, Allemagne.
- Gregory, K-J., Walling, D-E. (1973).** Drainage Basin form and process - geomorphological approach. Edward Arnold Ltd (eds), London, 458 p.

Références bibliographiques

- Guarnieri, P., Pirrotta, C. (2008).** The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily), *Geomorphology*, Elsevier, Volume 95, 260-273 pp.
- I.F.G. (1987).** Projet d'aménagement intégré du bassin versant de l'oued Mina. Institut des Géosciences Appliquées, D-6050 Offenbach. République Fédérale d'Allemagne.
- Heino, R.(1996).** Metadata and their role in homogenization. Proc. Seminar on Homogenization of surf. Instrum. Data, Budapest, 5-8 pp.
- Hack, J.T. (1957).** Studies in longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. Union Society of Geological Survey, Prof. Pap. 249-B, 45-97pp.
- Henensal, P. (1987).** Le risque d'érosion hydrique des sols. Bull, liaison Labo P. et Ch. 117-129 pp.
- Horton, R-E.(1932).** Drainage basins characteristics. Un. Trans, 13th Ann. Meet, Washington.
- Horton, R-E.(1945).** Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geol Soc Am Bull 56.
- Laborde, J-P.(2000).** Eléments d'hydrologie de surface. Centre National de la Recherche Scientifique. Nice, France. 191 p.
- Lamrani, C. (2012).** Impact des contraintes climatiques sur l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda, bassin versant de la Mina. (W. de Relizane). Mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali-Chlef, Algérie, 113 p.
- Laouina, A., Nafaa, R., Chaker, M. (2000).** Gestion des eaux et des terres et dégradation dans les collines de ksar El Kebir, Maroc, Bull. Réseau Erosion 19, 18 p.
- Leopold L. B., et Miller R. L. (1956)** Ephemeral stream -hydraulic factors and their relation to the drainage network". USGS Professional Paper, n° 282.
- Le Coeur, C., Gautier, E. (1996).** Les agents et les processus de l'érosion, Chapitre 4, pp.151-187 dans : Eléments de Géographie Physique, collection Grand Amphi Géographie, Bréal, Paris.
- Lespinas, F. (2008).** Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon, Thèse de doctorat, Université de Perpignan, France, 332 p.
- Lilin, C. (1986).** Histoire de la restauration des terrains de montagne, Cah. O.R.S.T.O.M Pédol. 22 (2) : 139-146 pp.
- Lupia Palmieri, E. (1983).** Il problema della valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali. Atti Congr Geog It, vol II t.I. XXIII

Références bibliographiques

- Mano, V. (2008).** Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, France, 311 p.
- Mebarki, A. (1984).** Ressources en Eau et Aménagement en Algérie, Le Bassin du KebirRhumel Algérie, Ed Office Des Publications Universitaires.
- Meddi, M. (1992).** Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Algérie) Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Starasbourg, France, 285 p.
- Meddi, H., Meddi, M., 2007.** Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algerie par la Méthode Pluvia. *Geographia Technica* N° 2: 44-62 pp.
- Melalih, A. (2012).** Analyse des techniques de conservation de l'eau et du sol dans la zone aride cas bassin versant d'Ain Sefra. Mémoire de Magister. Université AboubekrBelkaid de Tlemcen, Algérie. 144 p.
- Melton, M. (1958).** Correlation structure of mature drainage systems and their representation in IE4 phase space. *J Geol* 66.
- Melton, A. (1957).** An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology, Office of Naval Research, technical report n°11, 15 p.
- Mestre, O. (2000).** Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 229 p.
- Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire. (2000).** Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement, 95p.
- Morisawa, M. (1958).** Measurement of drainage-basin outline form, *Journal of Geology*, vol. 66, 587-591 pp.
- Ouechtati, S. (2009).** Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de Siliana et contribution à leur modélisation. Thèse de doctorat, Université de Bari, Italie. 320 p.
- Ouechtati, S., Baldassare, G. (2011).** Evaluation du transport solide et de l'envasement dans le bassin versant de Siliana (Tunisie): cas des barrages Siliana et Lakhmess. *Bull Eng Geol Environ* 70(4): 709-722 pp.
- Plantié, L. (1961).** Technique franco-algérienne des banquettes de DRS, Délégation Générale, Service DRS d'Oran, 22 p.
- Plantier, M. (2003).** Prise en compte de caractéristiques physiques du bassin versant pour la comparaison des approches globale et semi-distribuée en modélisation pluie-débit. Mémoire d'Ingénieur. Université Louis Pasteur, Starasbourg, France, 93 p.
- Remini, B. (2006).** Valorisation de la vase des barrages quelques exemples Algériens. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 05, Juin 2006.75-89pp.
- Remini, B. (2012).** Evolution spatio-temporelle de l'envasement dans le barrage S.M.B.A, Séminaire international, Relizane (Algérie), les 2,3,4 et 5 juin 2012. 75-89pp.

Références bibliographiques

- Remini, B., Avenard, J-M., Kettab, A. (1997).** Livre de l'envasement des barrages, 5-89 P.
- Remini, B., Bensafia, D. (2011).** Envasement du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda-Algérie. Comité scientifique RABAT.
- Remini, W., Remini, B. (2003).** La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 02, pp. 45-54.
- Roche, M. (1963).** Hydrologie de Surface, Gauthier - Villars Editeur, Paris, France, 429 p.
- Roose, E. (1991).** Conservation des sols en zones méditerranéennes Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES Cah. O.R.S.T.O.M, sér. Pedol., vol. XXVI, N° 2, 145-181 pp.
- Roose, E. (1994).** Introduction à la GCES, Bull. Pédol. de la FAO, n° 70, Rome, 420 p.
- Roose, E., De Noni, G. (1998).** Apport de la recherche à la lutte antiérosive Bilan mitigé et nouvelle approche. Étude et Gestion des Sols, Vol 5, N° 3, 181-194 pp.
- Roussel, P. (1999).** La gestion des rivières transport solide et atterrissements, les études des agences de l'eau N°65. Corse, 92 p.
- Ruelle, P., Senne, M., Juncker, E., Diatta, M. (1990).** Défense et restauration des sols, Collection fiches techniques, institut de recherche en agronomie tropicale et culture vivrière, France, 65 p.
- Santangelo, M., Gioia, D., Cardinali, M., Guzzetti, F., Schiattarella, M. (2013).** Interplay between mass movement and fluvial network organization: An example from southern Apennines, Italy. Geomorphology, Elsevier, N° 188 54-67 pp.
- Saoudia, Y. (2011).** L'érosion hydrique au Maghreb étude d'un cas: le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie Septentrionale). Mémoire d'ingénieur. Université du Québec à Montréal, Canada, 114 p.
- Scheffé, H. (1959).** The analysis of variance. Wileyed., New-York, 447 p.
- Scheidegger, A. E. (1966).** Stochastic branching processes and the law of streamorders, Water Resources Researches, v ol. 2 , n° 2 , 1 99-2 03 .
- Scordia, P-Y., (2008).** Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les Matériaux routiers. Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille. France. Spécialité : génie civil.
- Seltzer, P. (1946).** Le climat de l'Algérie. Univ. Alger., Alger. 219 p.
- Semcha, A. (2006).** Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. Thèse de Doctorat Université de Reims Champagne-Ardenne. France, 167p.

Références bibliographiques

- Serbah, B. (2011).** Etude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda. Mémoire de Magister, Université AboubakrBelkaïd, Tlemcen-Algérie. 120p.
- Simanton, J-R., Toy, T-J. (1994).**The relation between surface rock fragment cover and semiarid hillslope profile morphology. *Catena* 23 : 213-225 pp.
- StatSoft. (2010).** Statistica prise en main, Guide d'utilisation du logiciel Statistica 6.0, 305 p.
- Strahler, A. (1952).** Hypsometric (area altitude) analysis of erosional topography. *Geol Am Soc Bull* 63 : 1117-1142 pp.
- Strahler, A. (1954).** Statistical analysis in geomorphic research. *J Geol* 62.
- Strahler, A. (1956).** Quantitative slope analysis. *Geol Am Soc Bull* 67.
- Strahler, A. (1957a).** Dimensional analysis in geomorphology. Department of Geology, Columbia University, New York.
- Strahler, A. (1957b).** Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Am Geophys Union Trans* 38.
- Strahler, A. (1958).** Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *Geol Am Soc Bull* 69.
- Strahler, A. (1964).** Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks', in Chow, V.T. (ed.), *Handbook of Applied Hydrology*, New York, McGraw-Hill, section 4-11 pp.
- Tecslut International Limitée. (2004).** Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant-Projet Détaillé (lots nos 1 à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots nos 5 et 6). Experts-conseils 85, Rue STE-Catherine Ouest, Montréal, Québec, Canada.
- Testa, G. (2000).** Proposta di un modello a scala di bacino per il calcolo della disponibilità di materiale solido a monte di un invaso, Rapporto CESI, Italia, 82 p.
- Tonini, D. (1959).** Elementi di idrografia ed idrologia, vol II. Libr. Univ., Venezia.
- Touaïbia, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. Presses Madani frères Guerrouaou, Blida-Algérie. 159 p.
- Touaïbia, B. (2009).** Erosion et transport solide en Algérie septentrionale. *Med Friend* 10&11 Décembre 2009. RABAT. Maroc.
- Touaïbia, B., Achite, M. (2003).** Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Hydrol. Sci. J.* 48(2), 235-242 pp.
- 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. *Journal-des Sciences Hydrologiques*, 44(6). 408-416 pp.

Références bibliographiques

- Touaïbia, B., Dautrebande, S., Gomer, D., Mostefaoui, M. (1995).** Quantification de l'érosion à partir d'implantation de quatre retenues collinaires dans la zone des marnes. W. Relizane, Réseau Erosion. IRD. Bulletin N° 15. Montpellier, France. 408-416 pp.
- Touaïbia, B., Gomer, D., Aidaoui, A. (2000).** Estimation de l'index d'érosion de wischmeier dans les micros bassins expérimentaux de l'oued mina en Algérie du Nord. Réseau Erosion. IRD. Bulletin N° 20. Montpellier, France. 478-484 pp.
- Touaïbia, B., Gomer, D., Ouffar, F., Geyer, F. (1992).** Approche Quantitative de l'Erosion Hydrique essais de simulation de pluies sur micro-bassins expérimentaux bassin versant de l'oued mina. W. Relizane, Réseau Erosion. IRD. Bulletin N° 12. Montpellier, France. 401-407 pp.
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., Télesphore Brou, Y. (2013).** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, 1-17 pp.
- Villeneuve, J-P., Hubert, P., Mailhot, A., Rousseau, A.N. (1998).** La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. Revue Erudit des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol 11, 19-39 pp.
- Zachar, D. (1982).** Soil Erosion Developments in Soil Science 10, Elsevier Scientific publishing Company, New-York
- Zavoianu, I. (1985).** Morphometry of Drainage Basins. Developments in Water Science, vol. 20. Elsevier, Amsterdam, 238 p.
- Zeggane, H. (2005).** Approche cartographique de l'érosion hydrique à partir des ouvrages hydrauliques existants cas du bassin versant de l'oued Isser (W. Boumerdes). Mémoire de magister, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Arbaoui Abdellah, Blida, Algérie, 160 p.