

Essai de quantification et spatialisation de la perte en sols dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir (Haut-tell tunisien)

Abdelhamid Ben Ghazi

Maître-assistant

King Khaled University, Faculty of Humanities, Department of Geography, Abha 61421

P.O. BOX 1183, Saudi Arabia.

Ichraf Khmissi

Département de Géographie, Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités, Université de la Manouba, Tunisie.

Résumé

L'érosion hydrique des sols est l'un des plus graves problèmes menaçant actuellement le patrimoine agro-pédologique du Haut-tell tunisien, une région connue, depuis longtemps, par sa réputation agricole.

Marqué, depuis son histoire lointaine, par la fertilité de ses terres, le Haut-tell tunisien, souffre, aujourd'hui, d'une dégradation spectaculaire de ses ressources en sols.

L'effet combiné des actions anthropiques inappropriées et des facteurs naturels a, souvent, fragilisé les sols ce qui menace, sérieusement, les terres fertiles de la région

La présente étude s'intéresse à la quantification de la perte en terres dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir en s'appuyant sur une méthode basée sur l'utilisation de l'Equation Universelle de Pertes en Sol (USLE) couplée à un Système d'Information Géographique (SIG).

La quantification et la spatialisation du phénomène de l'érosion hydrique potentielle, non linéaire, dans la zone d'étude ont été réalisées par le croisement d'un ensemble de paramètres: le climat, le relief, la pédologie, le couvert végétal et les moyens de lutte antiérosive.

L'estimation de l'érosion hydrique potentielle (non linéaire) a donné des résultats alarmants puisque le 1/5, environ, de la surface totale du bassin-versant pourraient perdre chaque année un taux de 40 t/ha. La situation est d'autant plus préoccupante dans la mesure où les sols, potentiellement, érodés sont les plus fertiles dans le bassin-versant.

Notons, par ailleurs, que la perte des sols, fait apparaitre des disparités en rapport avec l'hétérogénéité des unités spatiales. Les versants dénudés subissent des taux de perte en sols supérieurs à 40 t/ha/an, tandis que le fond de la plaine et les surfaces couvertes par la forêt sont très peu touchés. (< 10 t/ha/an)

Mots-clés : bassin-versant, oued el Kébir, Haut-tell, Tunisie, USLE, quantification de l'érosion hydrique.

Abstract

Soil erosion is one of the most serious problems currently threatening the agricultural heritage of Haut-Tell, an area long known for its ancient agricultural history.

Since its long history, due to the fertility of its agricultural land, the Tunisian palace has suffered from a significant degradation of soil resources.

The interaction of physical and human factors often results in a clear weakening of the soil, seriously threatening the region's fertile land.

The current study investigates the quantification of soil loss in Wadi Kabir catchment using the Global Soil Loss Assessment (USLE) equation supported by GIS.

Quantification and spatial estimation of the potential non-linear water erosion in the study area was achieved by a set of variables: climate, topography, soil characteristics and vegetation cover, and tools of erosion control

The estimation of potential (non-linear) water erosion has given alarming results since approximately 1/5 of the total watershed area could lose 40 t / ha each year. The situation is even more worrying as potentially eroded soils are the most fertile in the watershed.

It should be taken into account that different terrain characteristics have affected soil loss levels; bare slopes are characterized by soil loss rates of more than 40 tons per year, while plains and forest areas are affected by an average. (< 10 t/ ha each year)

Keyword: watershed, wady el Kebir, High-tell, Tunisia, USLE, quantification of water erosion

Introduction générale

Le bassin-versant de l'Oued el Kébir s'insère dans une entité géographique plus vaste et bien individualisée dans le paysage de la Tunisie septentrionale : il s'agit du Haut-Tell. Celui-ci, se distingue des deux compartiments voisins : la haute Steppe du côté sud et le Tell Septentrional du côté Nord. Dans les Steppes l'extension considérable des montagnes entraîne la naissance d'un réseau de plaines aussi vastes. Tandis qu'au Tell septentrional les chaînons plus pressés tendent à supprimer les plaines intercalaires. Quant au Tell Inférieur, lui aussi se disloque en compartiments mais d'altitude faible et communiquent entre eux d'autant plus facilement. Dans le Haut tell, la topographie se trouve aussi remarquablement fractionnée mais la communication entre les alvéoles n'est pas toujours facile.

Il semble que le paysage qu'offre le Haut-Tell, en général, et le bassin-versant de l'Oued el Kébir, en particulier, est le produit d'une interaction longue et continue entre deux éléments : un élément naturel représenté par les caractéristiques édaphiques du sol combinées par une pluviométrie abondante. Un deuxième élément lié à l'Homme et à ses pratiques culturelles. De ce fait, ces sols argilo-limoneux en relation avec les affleurements marneux remarquablement étendus dans la région ont été bien travaillés par les agriculteurs locaux pour être bien aérés et pénétrés par l'eau de pluie donnant naissance à des sols de type « **Tell** ».

Il s'agit, ici, d'un paysage où le poids des sociétés du passé se trouve, largement, manifesté au fil des temps et à plusieurs endroits. Le Haut-tell est une région chargée d'Histoire et qui a fonctionné depuis longtemps comme un lieu de vie et de passage des anciennes civilisations illustrant, bel et bien, une anthropisation intense et sans arrêt du milieu.

On pense que cet équilibre entre l'Homme et son milieu qui a, bel et bien, fonctionné au fil de son histoire se trouve, aujourd'hui, rompu.

Suite, aussi, à la surexploitation des ressources et la dégradation spectaculaire de la couverture végétale la perte en terres a pris, actuellement, des proportions alarmantes. De tels risques pourraient menacer, non seulement, les terres fertiles mais aussi les ouvrages hydrauliques de la région qui seraient, sérieusement, soumis au colmatage accéléré.

Manifestement, plusieurs vagues d'érosion hydrique se sont déclenchées menaçant, sérieusement, les sols et les terres de la région.

Vue son ampleur et sa gravité, une évaluation quantitative de l'érosion hydrique s'avère nécessaire afin de mettre en place des stratégies de gestion appropriée.

Cependant, la complexité de ses facteurs intervenant rend difficile l'évaluation précise du phénomène de l'érosion hydrique.

Par ailleurs, l'apparition des technologies de la télé-acquisition de l'information géographique ont fourni des méthodes efficaces quant à la mesure, l'analyse et la gestion des ressources naturelles à des hautes résolutions spatio-temporelles.

A ce propos, le modèle numérique de terrain (MNT) ainsi que les informations requises de la télédétection et les SIG peuvent nous servir efficacement afin de nous permettre une quantification rapide et précise des risques d'érosion hydrique.

Afin de quantifier les pertes en terres, de nombreux modèles d'érosion ont été mis au point. En raison de sa commodité d'intégration dans les systèmes d'information géographique (SIG) l'équation universelle de perte en sol USLE est le modèle actuellement le plus répandu dans le monde pour préciser la perte des sols. Malgré son caractère empirique, le modelé en question (USLE) quantifie non seulement les taux d'érosion dans les bassins-versants en connaissant leurs caractéristiques physiques et les conditions hydroclimatiques locales, mais il présente aussi des éléments de réponse quant à la répartition spatiale de l'érosion des sols.

Le présent article a un double objectif : sur le plan méthodologique, il s'agit de montrer que l'équation universelle des pertes en terre (USLE) de WISCHMEIER et SMITH (1960, 1978) peut être utilisée dans les régions où il manque certaines données notamment l'intensité des précipitations, en remplaçant celle-ci par un indice d'agressivité (RENARD et FREIMUND, 1994).

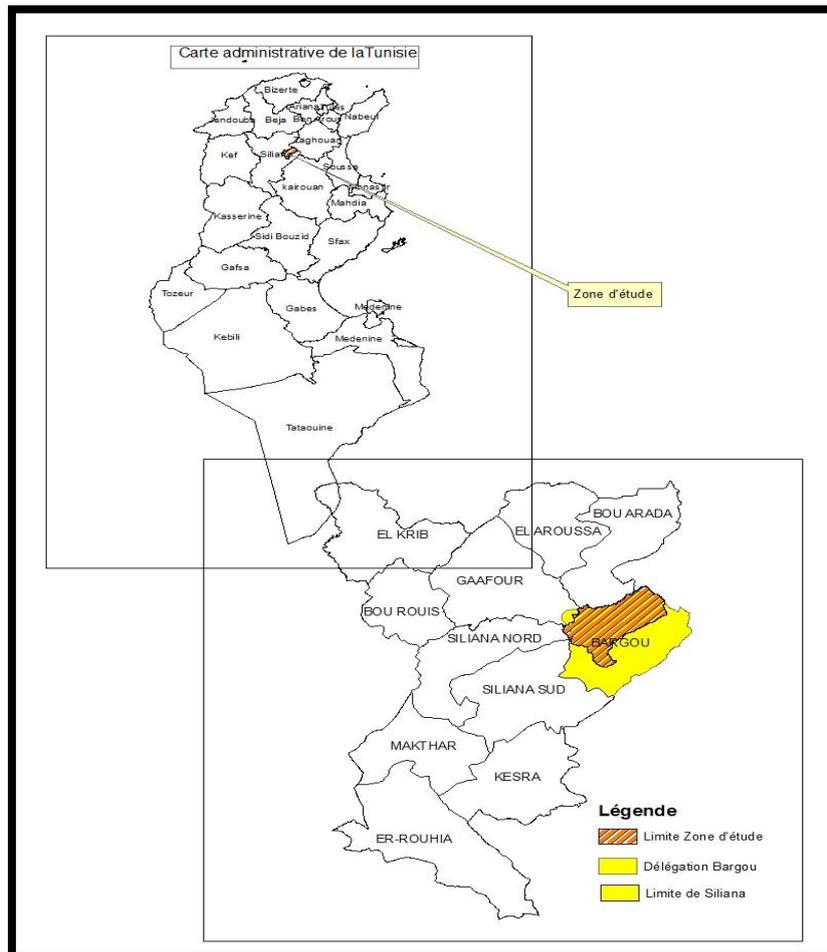
Le second objectif est d'appliquer cette méthode à une zone d'étude relativement étendue, afin de cartographier les pertes en terre de façon précise.

Partout dans le monde, les résultats indiquent une interdépendance entre le taux d'érosion spécifique et la pente des versants. La topographie, la nature du sol et l'intensité des pluies sont les principaux acteurs qui favorisent le déclenchement de l'érosion et la production des matériaux solides.

I- Présentation de la zone d'étude et méthodes d'analyse

Couvrant une superficie de 19300 ha, le bassin-versant de l'Oued el Kébir fait partie du Haut-Tell tunisien et se situe, à environ, 90 km au Sud-Ouest de la capitale de Tunis. Il est délimité du côté Sud-Est par le massif de Bargou et celui de Boukhal, à l'Est par la plaine de Zaghuan. Au Nord, il est bordé par une ligne de crête aérée formant les retombées occidentales du Jbel Mansour et à l'Ouest par le bassin-versant d'Oued Siliana.

Fig. n° 1: Carte de localisation de la zone d'étude



1- Présentation générale de la zone d'étude

1-1- Les principaux traits de la topographie

De forme allongée selon une direction Sud-Ouest / Nord-Est, le bassin-versant objet de notre étude se trouve inséré entre le massif de Jbel Bargou du côté Sud-Est et les crêtes surbaissées de Jbel Mansour du côté Nord-Ouest.

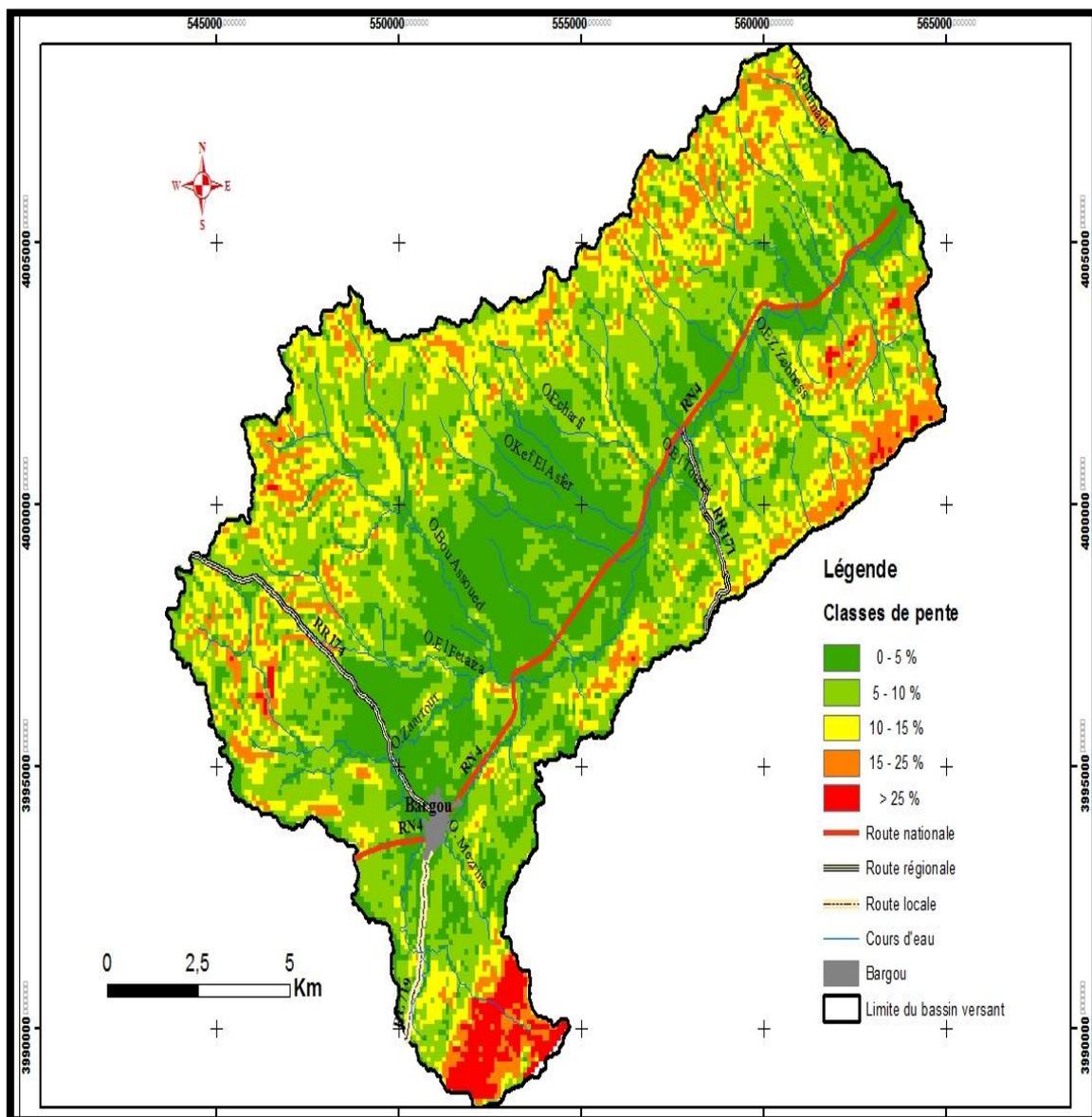


Fig. n° 2: Carte des pentes

La région d'étude se distingue par une topographie à la fois variée et contrastée avec des pentes, en général, moyennes à fortes à l'exception de la partie centrale du bassin-versant. Ici, les inclinaisons s'atténuent remarquablement pour former la plaine de Bargou qui se penche en pente douce vers le Nord-Est.

Dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir, deux principales unités topographiques peuvent y être distinguées: il s'agit de la plaine de Bargou d'une part et des Jbels et les collines limitrophes d'autre part. Ces éléments de relief se partageant la région avec une prédominance en faveur des surfaces à topographie plane aux dépens des crêtes et des terrains accidentés.

- *La plaine de Bargou* occupe une dépression intra-montagnarde et s'étend sur des secteurs couvrant une bonne partie du bassin-versant. Son altitude moyenne est, d'environ, 500 m avec une inclinaison, en pente douce, orientée vers le Nord-Est.

- *Les crêtes topographiques* font partie intégrante de la Dorsale tunisienne et forment le massif de Jbel Bargou et celui de Jbel Mansour. Culminant à 1268 m, le Jbel Bargou assure la transition entre la Tunisie tellienne au Nord et les Hautes Steppes au Sud. La continuité de ses crêtes ainsi que les pentes déclives de ses versants donnent aux reliefs un caractère montagnard infranchissable.

Contrairement au massif de Bargou, celui de Jbel Mansour est formé par des crêtes surbaissées donnant au paysage topographique un aspect aéré.

L'examen de la carte des pentes fait apparaître la prédominance des surfaces, relativement, planes et peu inclinés (0 à 10 %) couvrant le fonds de la vallée principale. Ces terrains s'étendent sur une superficie de 39,5% de la totalité du bassin-versant. Quant à la classe des pentes supérieures à 25 %, elle s'étend sur 2 % de la superficie de la zone d'étude.

1-2- Un réseau hydrographique bien hiérarchisé

La densité du réseau hydrographique est un indicateur du fractionnement de relief mais aussi un signe de l'agressivité de l'érosion hydrique: il s'agit là du moteur principal qui contrôle la dynamique morphogénique de toute la région.

Le bassin-versant de l'Oued el Kébir est doté d'un réseau hydrographique dense et hiérarchisé en six classes avec une densité générale de $3,7 \text{ Km}^{-1}$. Les cours d'eau d'ordre 1 et 2 ont une longueur respective de 355,3 km et 178 km ce qui représente 75,1% de la totalité du réseau hydrographique. Quant à l'Oued el Kébir, l'artère principale du bassin-versant, est d'ordre 6 avec une longueur de 19,1 km.

1-3- Un régime pluviométrique irrégulier

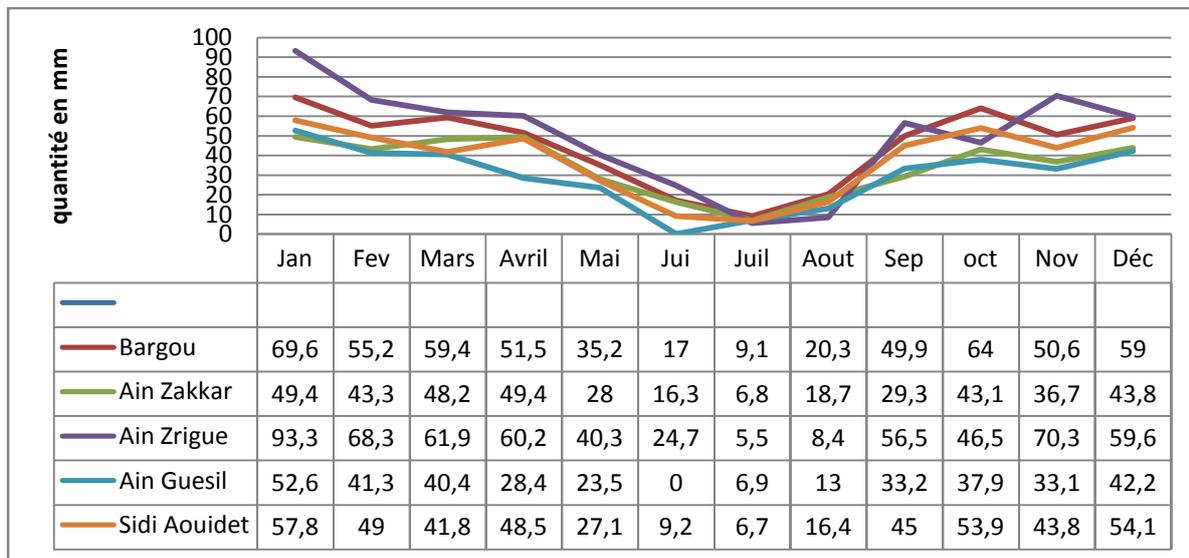
La zone d'étude est soumise à un régime méditerranéen dégradé caractérisé par un été chaud et sec et un hiver doux et, relativement, humide.

Le régime pluviométrique dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir se distingue par son caractère torrentiel avec des précipitations très irrégulières dans le temps et dans l'espace.

La pluviométrie moyenne mensuelle est de l'ordre de 45 mm (Station de Bargou). Le mois le plus sec est celui de juillet avec une quantité moyenne de 9.1 mm; alors que le mois le plus arrosé est celui de janvier avec une moyenne de précipitations de l'ordre de 69.6 mm.

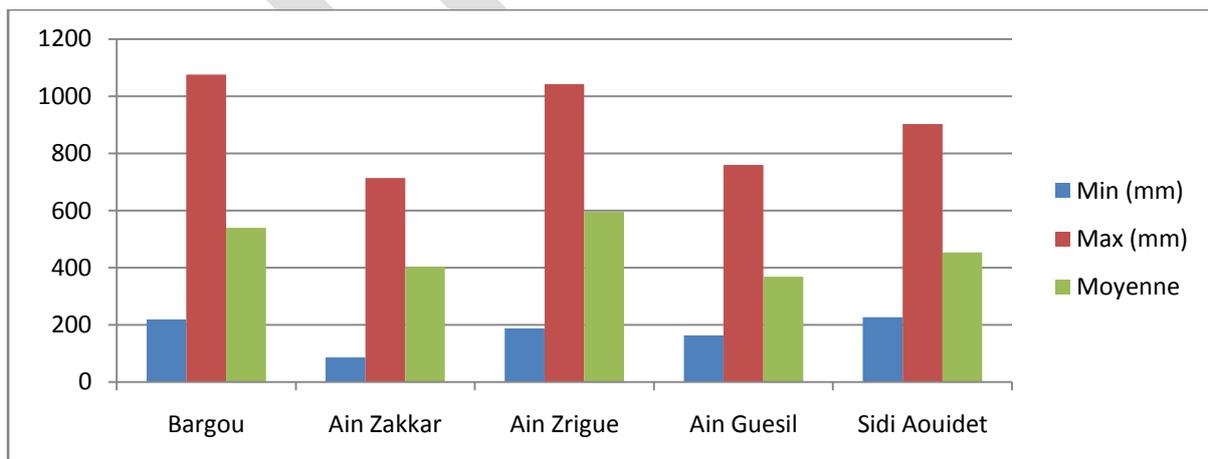
Le régime pluviométrique se distingue, aussi, par des fluctuations saisonnières avec l'existence d'une saison estivale sèche, caractéristique du climat méditerranéen. En conclusion, le régime pluviométrique dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir est caractérisé par des précipitations à la fois violentes et irrégulières. Les pluies tombent en automne et en hivers. Les précipitations automnales sont, souvent, sous forme d'averse violentes favorisant le ruissellement concentré.

Fig. n° 3 : Répartition moyenne mensuelle de la pluviométrie



Source : CRDA Siliana

Fig. n° 4 : les maximas et les minimas pluviométriques selon les stations



Source : CRDA Siliana

1-4- Une pédologie à dominance carbonatée

La carte pédologique de la zone d'étude fait apparaître plusieurs types de sols avec une prédominance nette en faveur des formations carbonatées. Une telle situation est, en étroite,

corrélation avec l'abondance des roches calcaires riches en carbonates de calcium qui forment l'ossature des principaux reliefs de la région.

- Les sols minéraux bruts

Les sols minéraux bruts s'observent sur des roches ou sur des formations superficielles qui n'ont pas encore subi une évolution pédologique. L'évolution des sols minéraux bruts de la région est inhibée par l'érosion hydrique mais aussi par des apports très récents d'alluvions dans les lits des oueds. La matière organique, présente dans ces types de sol, est très limitée ne dépassant pas 1% dans les premiers centimètres et elle est, pratiquement, nulle pour les horizons du sous-sol.

Les sols d'érosion appartiennent soit au groupe des lithosols (affleurement de la roche dure) soit au groupe des régosols (roche tendre) qui représentent, respectivement, 18,7 % et 2,8 % de la zone d'étude.

- Les sols peu évolués

Les sols peu évolués de la région appartiennent à deux groupes bien distincts :

+Les sols peu évolués d'érosion occupent les pentes fortes et encapuchonnent, le plus souvent, les formations marneuses et marno-calcaires.

+Les sols peu évolués d'apport fossilisent les terrasses alluviales de l'oued el Kébir (la basse terrasse).

- Les sols calcimagnésiques

Les sols calcimagnésiques de la région appartiennent à la sous-classe carbonatée et aux deux groupes des bruns calcaires et des rendzines. Ces derniers couvrent 26,6 % de la superficie de la région d'étude et sont constitués par un horizon A (profondeur 30 cm) organique qui repose sur des accumulations sous forme de croûte ou encroûtement riche en CaCO_3 ou sur la roche mère calcaire.

- Les vertisols

Ce type de sol est défini par la présence des argiles qui se gonflent et se contractent donnant naissance à des fentes de retrait et des faces de glissement à la base du profil. Dans la zone d'étude, les vertisols s'étendent sur une superficie de 531 ha ; alors que les sols vertiques se voient sur des pentes moyennes à faibles avec une superficie 1344 h.

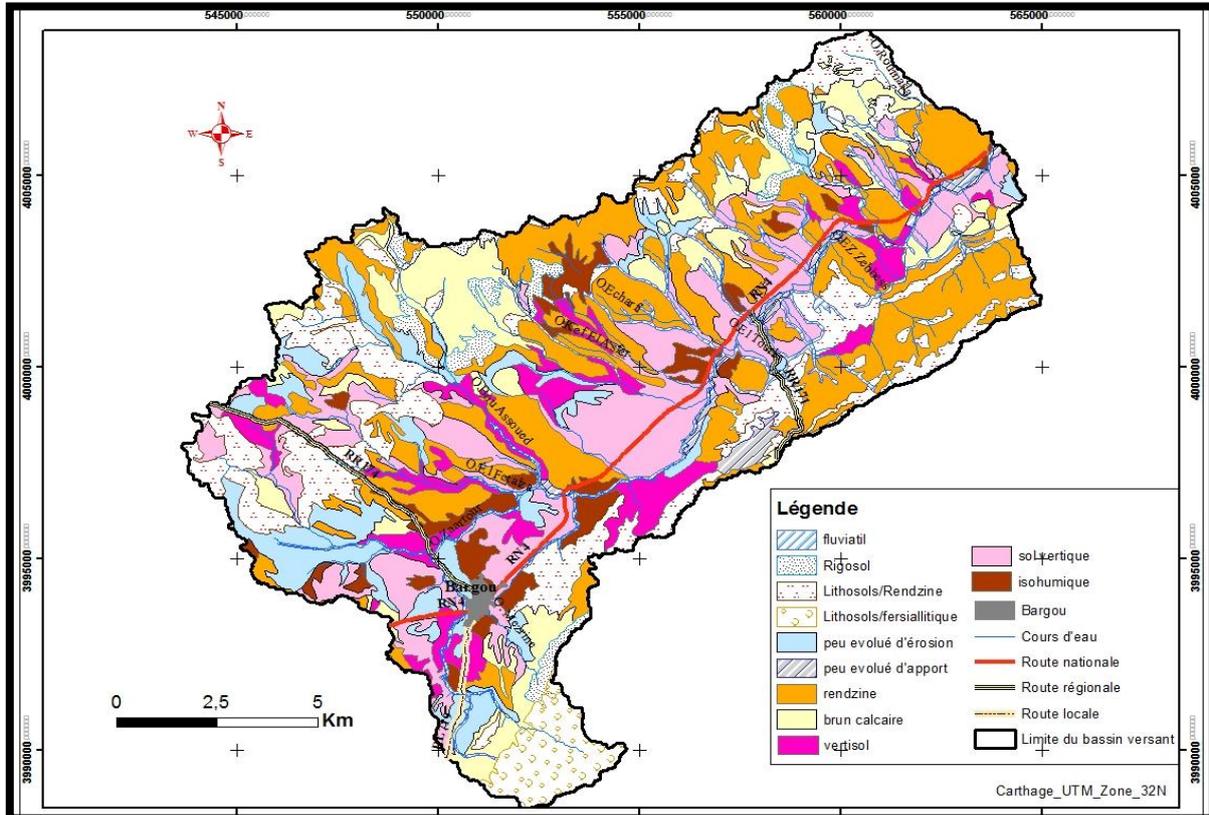
- Les sols isohumiques

Ces sols sont déterminés par la présence d'un gradient humique et calcaire et appartiennent au groupe des sols marron reposant sur des accumulations carbonatées. Ils sont de bonne qualité pour les cultures annuelles et arbustives et représentent 4,7 % de la superficie totale.

- Les sols fersiallitiques

Les sols fersiallitiques occupent les diaclases calcaires du Jbel Bargou et font apparaître un taux de Fer libre / Fer total de l'ordre de 50% ce qui leur offre une couleur bariolée. Ils se voient en juxtaposition à des lithosols et sont, souvent, couverts par des forêts de chêne vert.

Fig. n° 5 : Carte pédologique



2- Les méthodes d'analyse

La méthodologie adoptée s'appuie sur l'estimation des paramètres de l'Equation Universelle de Perte en Sol (USLE). Cette méthode d'analyse nous permet l'élaboration des documents cartographiques afin de bien appréhender les zones soumises au risque de l'érosion hydrique. Il s'agit d'un modèle empirique qui associe des facteurs¹ ayant un impact direct ou indirect sur la vitesse de l'érosion hydrique, non linéaire, des sols.

Lorsqu'elle est combinée avec les techniques de SIG, l'équation de WISCHMEIER révisée permet, non seulement, d'évaluer le taux de la perte brute des sols mais aussi d'analyser sa distribution spatiale.

2-1- Le modèle empirique de perte en terre de WISCHMEIER et SMITH (USLE)

L'objectif de WISCHMEIER et SMITH (1960 et 1978) était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux intervenant de choisir le type d'aménagement adéquat pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

Peu après, cette technique a été révisée et réemployée sur des espaces plus vastes et sur des terrains variés.

¹ L'estimation du taux de pertes en sols est calculée selon les facteurs suivants : L'énergie cinétique des pluies intenses, les propriétés du sol, l'occupation de l'espace et les pratiques anthropiques.

2-2- Les principes du modèle

Selon ce modèle, l'érosion est une fonction multiplicative d'un ensemble de facteurs, à savoir: l'érosive des pluies (R) qui est égale à l'énergie potentielle que multiplie la résistance du milieu (érodibilité du sol / K). A ceux-ci, on ajoute les facteurs de la topographie (LS), le couvert végétal, les pratiques culturales (C) et les aménagements antiérosifs (P). C'est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion serait plus faible.

Ce modèle de prévision de l'érosion est constitué d'un ensemble de cinq facteurs :

$$A = R * K * LS * C * P$$

A = Perte annuelle moyenne de sol (t/ ha/an).

R = Indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJ mm/ha. h. an).

K = Indice d'érodibilité des sols à l'érosion hydrique (t. ha. H/ ha. MJ. mm).

LS = Facteur topographique dépendant de la pente et sa longueur (L en m et S en %).

C = Facteur de culture, incluant la régie des cultures et des sols ainsi que les pratiques culturales.

P = Facteur de conservation et d'aménagement.

II-Essai de modélisation de l'érosion hydrique

Dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir, la quantification de l'érosion hydrique, non linéaire, par l'équation universelle USLE (WISCHMEIER et SMITH, 1978) combine cinq facteurs physiques. A ceux-ci, on ajoute les pratiques culturales et les moyens utilisés en matière de lutte anti-érosive.

1- Le facteur lié à l'agressivité des précipitations (R)

Pour calculer ce facteur, on a recours à la formule empirique de RONG et ARNOLDUS (1987). Celle-ci, utilise un pas de temps journalier disponible dans les différentes stations pluviométriques à l'intérieur ou à proximité du bassin-versant.

$$\text{Log } R = 1,74 \cdot \log \sum (P_i^2/P) + 1,29$$

P_i : Précipitations moyennes mensuelles.

P : Précipitations moyennes annuelles

Dans le bassin-versant objet de notre étude, on dispose d'une seule station (Roboa - Bargou). Pour calculer convenablement le facteur d'érosivité (R) on a eu recours à quatre stations limitrophes, en dehors de la zone d'étude : il s'agit d'Ain Guesil, Ain Zrigue, Ain Zakkar, et

Sidi Aouidet. La variation du gradient² pluviométrique en fonction de la hauteur nous a poussé d'ajouter une station virtuelle sur la côte la plus élevée de Jbel Bargou. (1260 m)

Fig. n° 6 : Répartition spatiale des stations pluviométriques

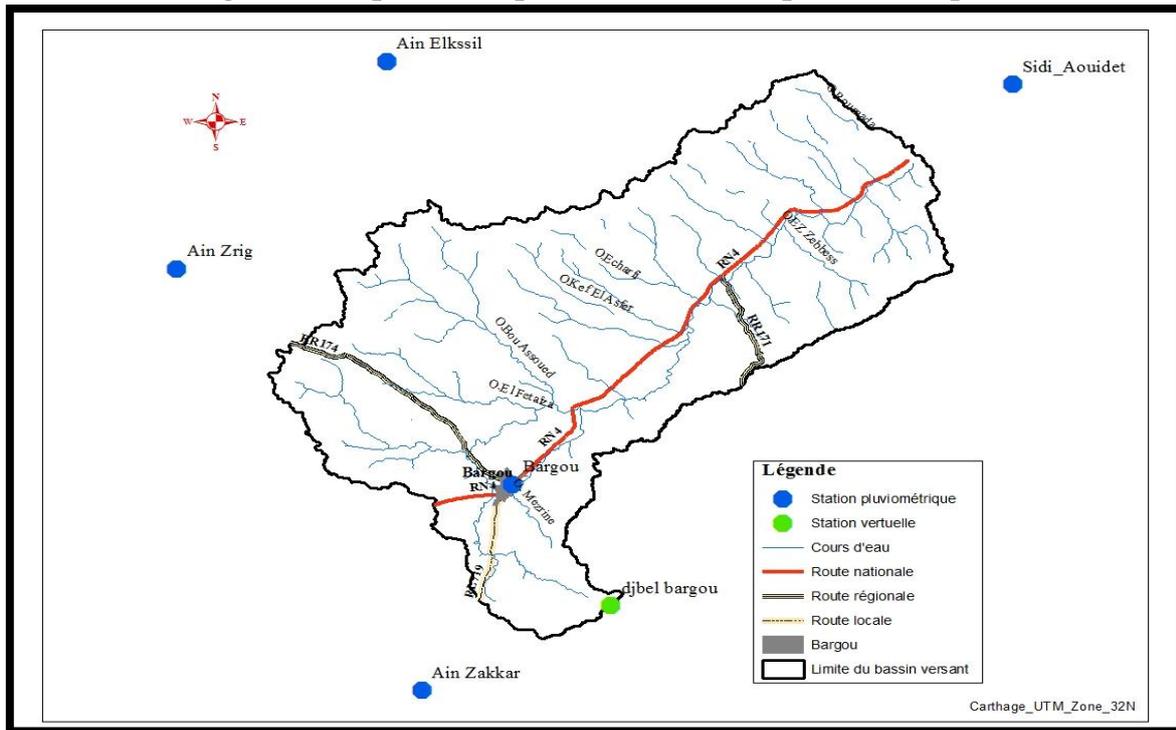


Tableau n° 1 : Répartition de la pluviométrie selon les stations

Stations	Nb d'années d'observation	Pluviométrie (mm)			Facteur R
		Min (mm)	Max (mm)	Moyenne	
Bargou	47	219	1076	540	73,1
Ain Zakkar	74	86,5	713,8	402,8	57,6
Ain Zrigue	16	188	1042	595,6	82,3
Ain Guesil	50	163,5	759,9	368,5	54,7
Sidi Aouidet	20	226,4	903	453,2	65,3
Jbel Bargou				900	145

Le facteur d'érosivité (R) varie selon les stations: il oscille entre 54,7 à Ain Guesil et peut atteindre 145 au niveau de la station virtuelle de Jbel Bargou.

² Selon Zbidi H. (1963) l'augmentation de la pluviométrie sur le versant septentrionale du Bargou augmente de 60 mm par 100 m

Fig. n° 7 : Courbe de la station virtuelle du Jbel Bargou

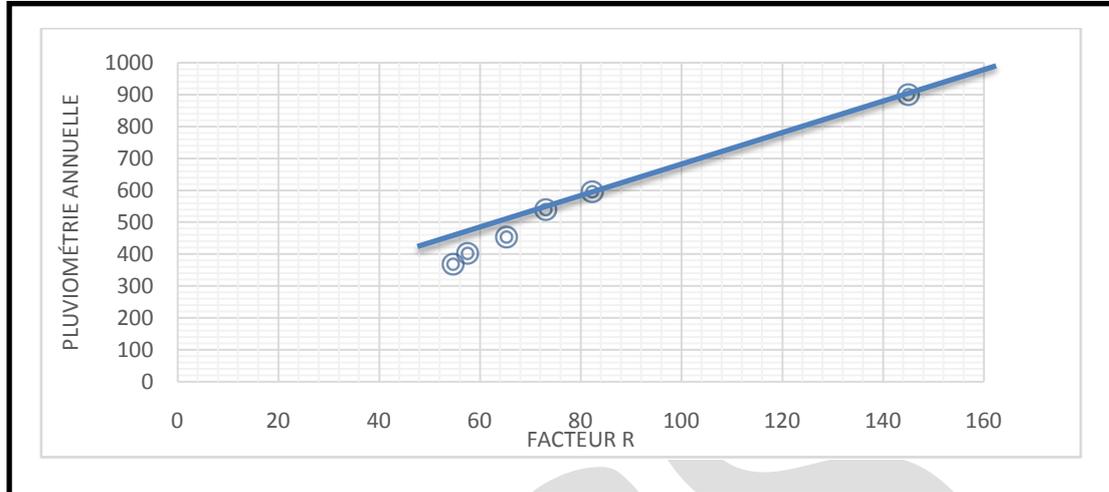
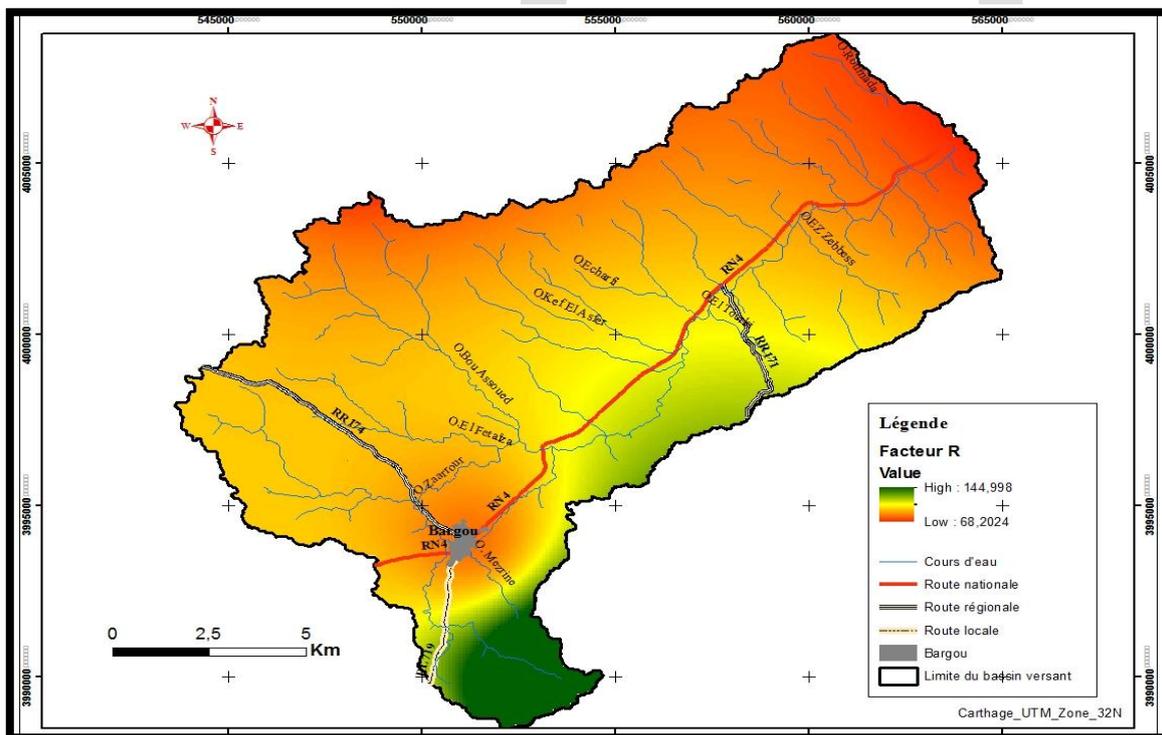


Fig. n° 8 : Carte de l'érosivité (R)



Dans le bassin-versant objet de notre étude, la valeur (R) varie de 68,2 au niveau de l'exutoire à 145 sur le Jbel Bargou avec une moyenne générale de 80,3.

2- L'érodibilité des sols (k)

L'érodibilité des sols est la fonction qui utilise le taux en matière organique, la composition granulométrique (texture), la perméabilité et la structure du sol.

La structure et la perméabilité sont déterminées à partir des abaques : triangle du code de la perméabilité et triangle de la structure qui prennent en considération les proportions des argiles et des sables du profil pédologique.

Dans la zone d'étude, le code de la structure varie de 2 (sol limoneux) à 4 (sol argileux à limono-argileux) et le code de la perméabilité de 3 pour les sols moyennement perméables à 5 pour les sols très peu perméables.

Quant à la matière organique et la granulométrie elles ont fait l'objet d'un prélèvement de terrain et d'analyse au laboratoire de la direction des sols. La matière organique varie de 1,3% pour les sols d'érosion peu évolués à 11.2 % pour les sols fersiallitiques en juxtaposition à des lithosols sous une forêt de chêne vert avec une fassies de Diss (*Ampelodesma Mauritanicum*). Le taux de la matière organique varie en fonction de la densité de la couverture végétale : elle est de 4% à 8,5 % pour les forêts de Pin d'Alep et de 7% à 11,2% pour les Chênes verts.

Pour la réalisation de la carte de l'érodibilité des terres (Facteur K) on a jugé utile d'associer la couche pédologique avec la couverture forestière. L'objectif c'est de faire attribuer les taux en matière organique à chaque unité de sol en fonction des classes de recouvrement végétal allant du sol nu à des sols où la couverture dépasse 50 %.

La valeur de K varie de 0.07 pour les lithosols en juxtaposition à des sols fersiallitiques sous une forêt de Chêne vert et de Diss dense et moyennement dense à 0.44 pour les régosols.

Toutefois, les surfaces touchées par l'érosion linéaire, non concernées par le modèle USLE, ont une valeur arbitraire de 0.8.

La classe de K= 0.7 représente 2.5 % de la superficie du bassin-versant et s'étend, principalement, sur les crêtes de Jbel Bargou.

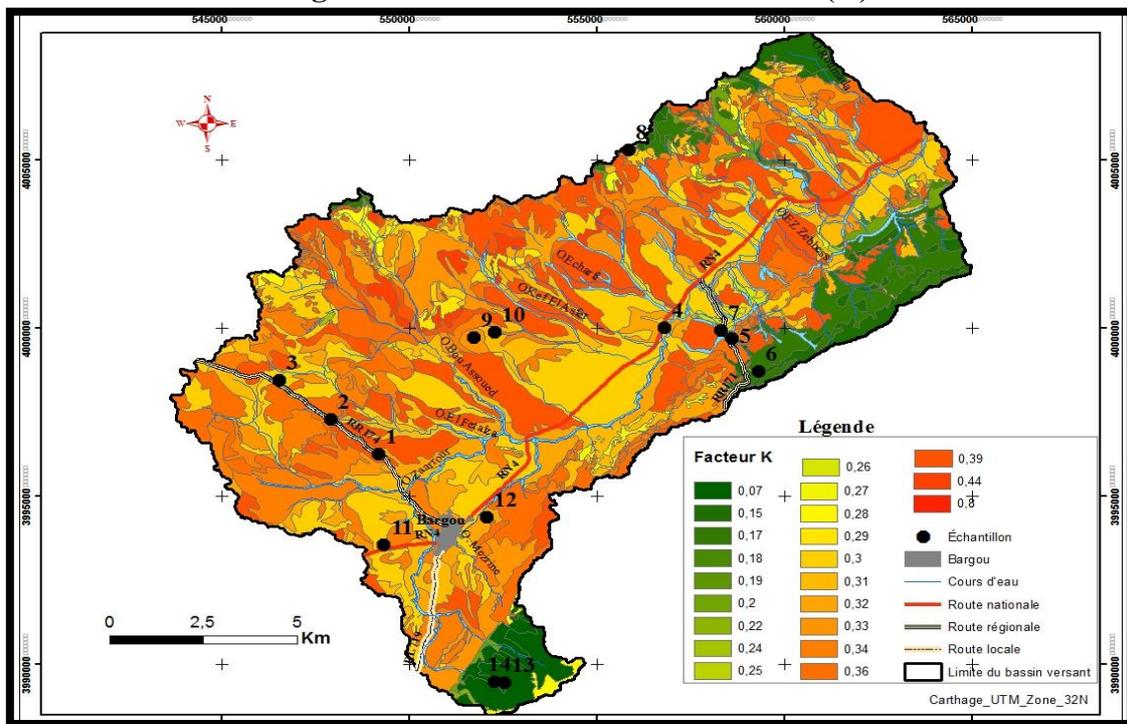
Tableau n° 2 : L'érodibilité des sols (K)

Valeur de k	Superficie	pourcentage
0,07	483	2,5
0,15	591	3,1
0,17	940	4,9
0,18	23	0,1
0,19	1	0,0
0,20	217	1,1
0,22	14	0,1
0,24	12	0,1
0,25	13	0,1
0,26	70	0,4
0,27	173	0,9
0,28	169	0,9
0,29	128	0,7
0,30	3633	18,8
0,31	1378	7,1
0,32	1153	6,0
0,33	1642	8,5
0,34	2127	11,0
0,36	1707	8,9

0,39	3880	20,1
0,44	309	1,6
0,80	622	3,2
Total	19286	100

L'examen du tableau (n° 2), ci-dessus, fait apparaitre que la valeur 0.39 est la plus répandue dans la zone d'étude (20.1%) qui correspond à des sols de type rendzine. D'une manière générale, les sols qui ont un taux élevé en limons sont les plus érodibles. Une telle situation nous laisse penser que la richesse du sol en matière organique limite davantage l'érodibilité des terres.

Fig. n° 9: Carte de l'érodibilité des sols (K)



3- La topographie (LS)

Les données altimétriques nous ont servi de secours pour faire élaborer le modèle numérique du terrain (MNT). Celui-ci, nous a permis de calculer, aussi bien, la longueur de la pente (L) mais aussi son degré d'inclinaison (S). Pour faciliter le travail on a eu recours au modèle de BLUIDER.

3-1- Valeur de L :

La longueur de la pente est celle qui correspond à la distance entre le point où commence le ruissellement et le point d'intersection avec le cours d'eau. Pour calculer L, on a besoin de calculer Lamda et m.

3-1-1- Valeur de Lamda :

Lamda est égal à la valeur du pixel de Flow accumulation multiplié par la taille du pixel (101) (m).

3-1-2- Valeur de m :

$$m = \beta / \beta + 1$$

3-1-2-1- Valeur de β :

Beta est calculer par l'extension Map Algebra raster calculator disponible dans la composante d'ArctoolBox dans l'Arc Gis. La valeur de beta dans la zone d'étude varie de 0 à 2,88.

3-1-2-2- Valeur de m :

La valeur de m varie de 0 sur les pentes faibles à 0,74 sur les pentes les plus fortes.

- Valeur de L : L est calculer par la formule $(\lambda / 22,13)^m$. dans la zone d'étude L varie de 1 à 7,75.

3-2- Valeur de S :

Pour calculer S on a besoin de calculer la pente.

3-2-1- Valeur de la pente :

La carte de pente est une couche raster exprimée en degré, elle varie de 0 à 52,02°. Elle est le résultat de la dérivation du MNT en Slope.

3-2-2- Valeur de S :

Dans la zone d'étude, la valeur de cette couche (pente) varie de 0,065 à 55,4.

Tableau n° 3 : Les valeurs de S

Valeur de S	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
< 0,065	18	0,1
0,065 - 0,5	3404	17,7
0,5 - 1	4392	22,8
1 - 1,5	3178	16,5
1,5 - 10	7994	41,4
>10	300	1,6
Total	19286	100,0

D'après le tableau, ci-haut, (n° 3) les classes supérieures à 10 et inférieures à 0,065 représentent, respectivement, 1,6 % et 0.1 % de la zone d'étude.

La classe de S entre 1,5 à 10 est la plus représentative dans le secteur d'étude puisqu'elle s'étend sur 41,4 % de la superficie totale du bassin-versant.

La valeur S de 0,5 à 1, (pente 5 à 10 %) représente 22,8 % de la superficie de la zone d'étude.

La classe S supérieure à 1 correspond aux zones en pente forte.

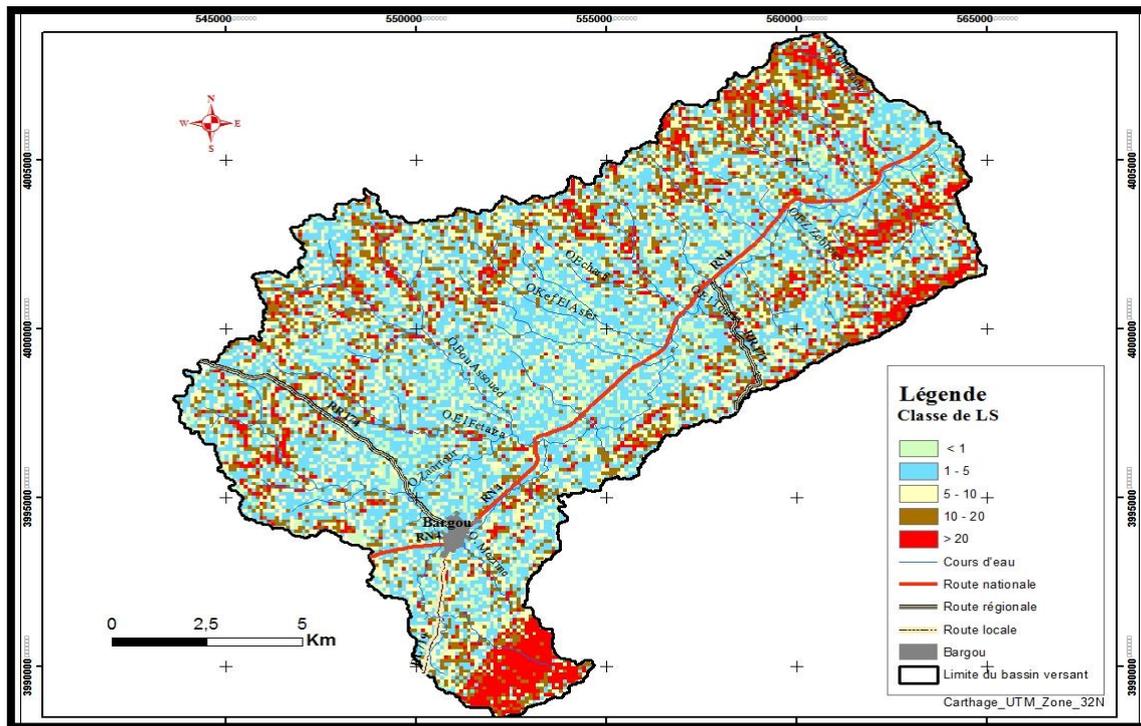
Le facteur topographique LS varie de 0,1 à 80. Pour mieux présenter la carte du facteur LS on a choisi 5 classes détaillées dans le tableau ci-dessous. (n° 4)

Tableau n° 4: Les classes du facteur LS

Valeur de LS	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
< 1	2239	11,7
1 - 5	7528	39,2
5 - 10	4349	22,6
10 - 20	3173	16,5
> 20	1926	10,0
Total	19215	100,0

La classe LS inférieure à 1 représente 11,7% de la superficie du bassin-versant et occupe, tout particulièrement, le fond de la vallée de l'Oued el Kébir. La classe (LS) la plus répandue est celle de 1 à 5 qui couvre 39,2 % de l'aire d'étude. Elle se localise sur les piémonts des reliefs et occupe aussi le fond de la vallée principale. La classe LS la plus élevée (> 20) représente 10% de la superficie du bassin-versant et caractérise les versants des reliefs.

Fig. n° 10 : Les caractéristiques de la topographie (LS)



4- Le facteur lié à l'aménagement antiérosif (P)

Selon le modèle de WISCHMEIER le facteur (P) a une valeur inférieure ou égale à 1. Les valeurs de (P) varient selon les pratiques d'aménagement adoptées et la pente. La valeur de P=1 est attribuée aux terrains sur lesquelles aucun des moyens antiérosifs n'est utilisé.

Dans la zone d'étude, les agriculteurs ne pratiquent aucune mesure antiérosive, les labours sont rarement parallèles au courbe de niveau. Les aménagements sont, essentiellement, représentés par les banquettes mécaniques avec une superficie égale à 4277 ha.

Le facteur (P) est la combinaison entre deux paramètres : la pente (4 classes) et les aménagements antiérosifs (Les banquettes mécaniques).

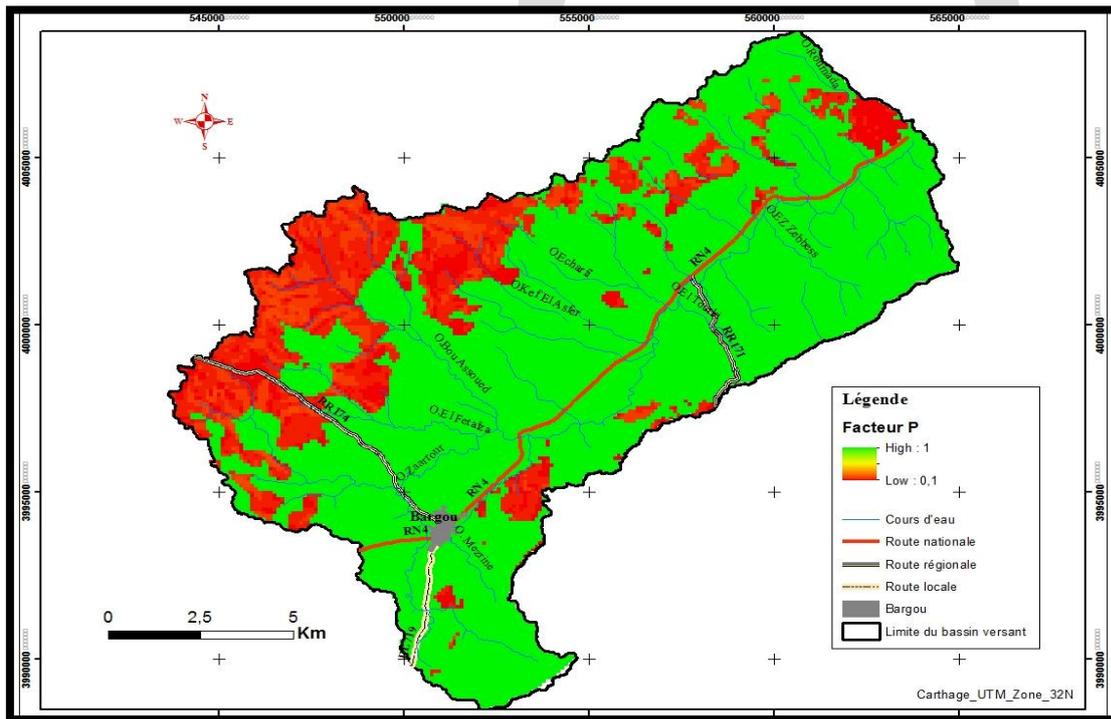
Les exploitants de la région n'exercent aucun aménagement antiérosif. Les banquettes mécaniques sont exécutées par l'arrondissement de CES du CDRA de Siliana. Quant au reboisement à base de Pin d'Alep a eu lieu dans des banquettes manuelles.

Tableau n° 5 : Répartition spatiale des aménagements antiérosifs (P)

Classe de P	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
0,1	1132	5,9
0,12	2056	10,6
0,16	1089	5,7
0,18	0	0
1	14986	77,8
Total	19263	100

Le Tableau (n°5), ci-dessus, fait apparaitre que seulement 22,2 % de la superficie de la zone d'étude a bénéficié d'un aménagement anti-érosif par des banquettes mécaniques. Les aménagements existants sont effectués sur des pentes inférieures à 18 %. Au-delà de 19 % de pente, aucune banquette mécanique n'est réalisée. Notons, par ailleurs, que la bonne partie des aménagements anti-érosifs se sont localisés sur le versant méridional de Jbel Mansour.

Fig. n° 11 : Répartition spatiale des aménagements anti-érosifs (P)



5- Les pratiques culturelles (C)

Les pratiques culturelles dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir sont interprétées grâce aux images Google Earth (2010) qui sont captées géoréférencées puis validées par des observations de terrain.

La valeur du facteur (C) varie de 0.058 pour les sols bien couverts (forêt dense) à 1 pour les sols nus et aux fonds des cours d'eau. La végétation et la litière végétale assure la protection

du sol contre les gouttelettes d'eau en fixant la terre par leur système racinaire et la matière organique.

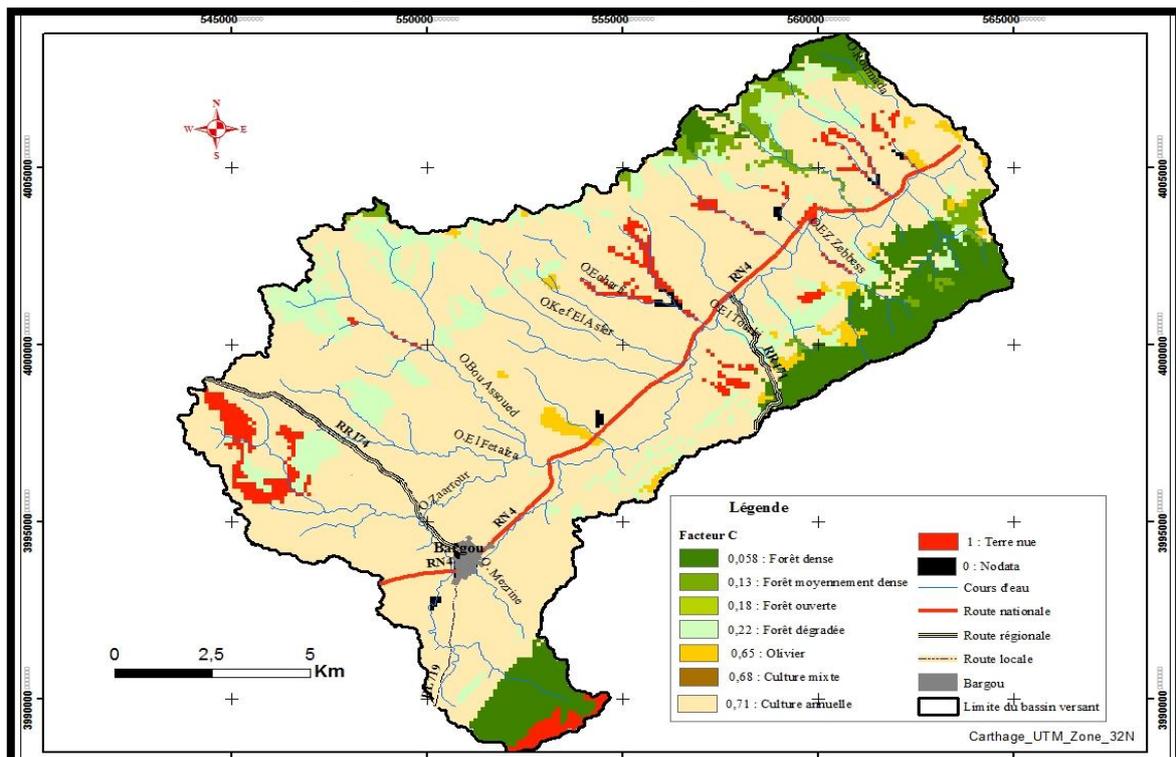
La couverture forestière occupe, tout particulièrement, les massifs de Jbel Bargou et celui de Jbel Mansour. Pour les zones forestières de la région, la valeur (C) varie de 0,058 à 0,22.

Tableau n° 6: L'occupation de l'espace

Type d'occupation	Valeur C	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Forêt dense	0,058	1831	9,5
Forêt moyennement dense	0,13	437	2,3
Forêt ouverte	0,18	677	3,5
Forêt dégradée	0,22	1107	5,7
Olivier	0,65	276	1,4
Terre mixte	0,68	826	4,3
Culture annuelle	0,71	13350	69,2
Terre nue et Cours d'eau	1	680	5,8
Zone urbaine et Retenue d'eau	0	97	0,5
Total		19281	100

Les sols céréaliers de valeur C = 0,71 occupent 69,2 % de la superficie totale du bassin-versant de l'Oued el Kébir.

Fig. n° 12 : Carte de l'occupation du sol



6- Estimation de la perte en sols (A)

Les pertes en sols sont le résultat de multiplication des cinq facteurs (R, P, LS, C, K) sous ArcGIS (MapAlebra, raster Calculator).

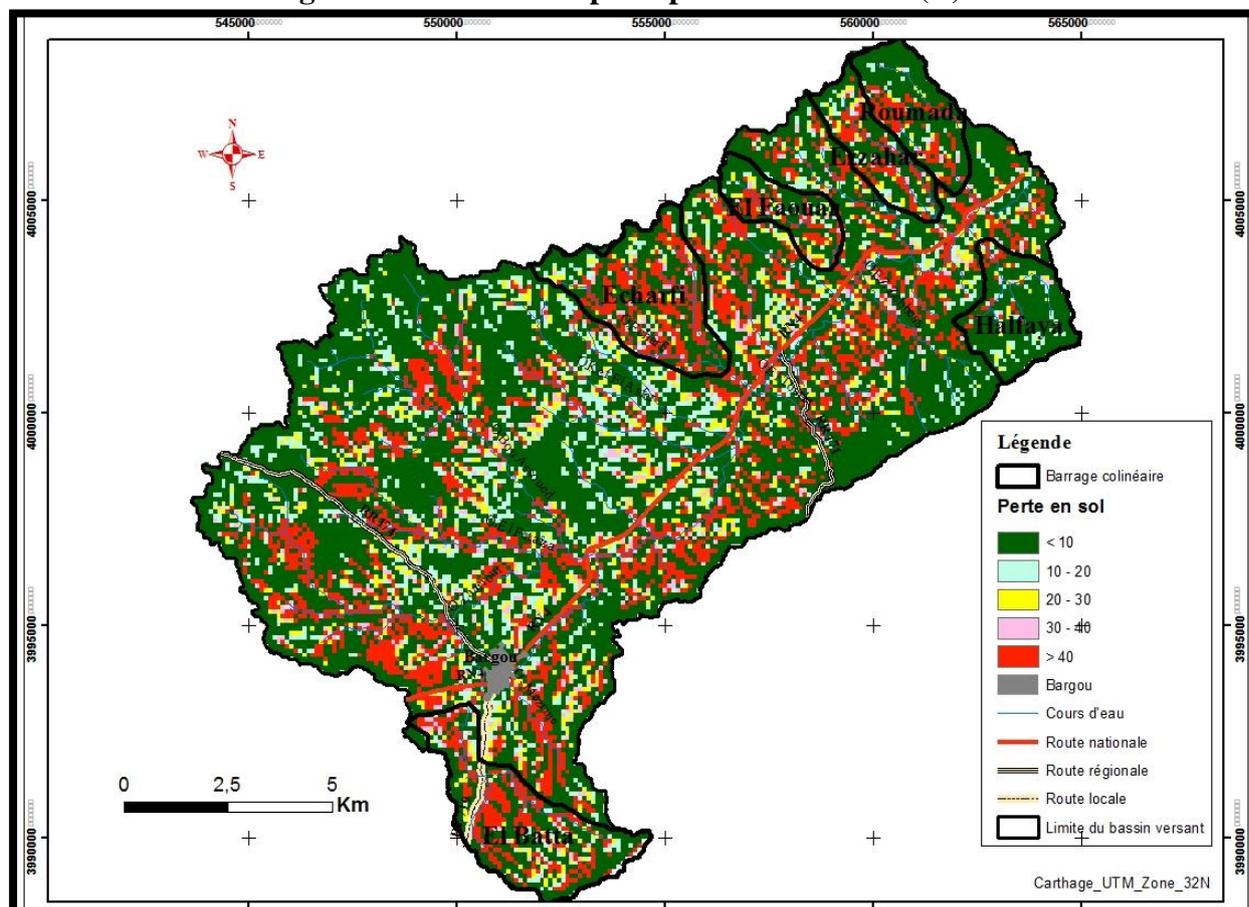
Dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir, les résultats obtenus sont ordonnés en cinq classes :

- La classe 1 est celle où le taux de perte en terre est inférieur à 10 t/ha/an s'étend sur 59,7 % de la superficie totale du bassin-versant. Elle occupe le fond de la vallée principale de l'Oued el Kébir et se localise aussi sous les forêts denses et moyennement denses et les terres traitées par des travaux de CES.
- La classe 2 dont la perte est de 10 à 20 t/ha/an représente 10,6 % de la superficie du bassin-versant. Elle concerne les secteurs dotés de très fortes pentes mais en présence d'une végétation dense. Cette catégorie est visible, aussi, sur les piémonts des reliefs, secteurs de transition entre les versants pentus et les bas-fonds.
- La classe 3 concerne un taux de perte de 20 à 30 t/ha/an et couvre environ 1200 ha de la superficie du bassin-versant. Elle s'étend, essentiellement, sur les plateaux à vocation céréalière.
- La classe 4 avec une perte en terres égale à 30 à 40 t/ha/an se trouve peu répandue dans la zone d'étude (4,4% de la superficie totale). Elle ne concerne que les plateaux pentus, à terre nue, ou ceux qui sont occupés par les cultures annuelles.
- La classe 5 où le taux de perte est supérieur à 40 t/ha/an couvre 19 % de la superficie totale du bassin-versant. Elle concerne, tout particulièrement, les berges des cours d'eau et les secteurs très pentus dépourvus de couverture végétale et de structures d'aménagements antiérosifs.

Tableau n° 7 : Les classes de perte en sols

Classe de (A)	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
> 10	11279	59,7
10 - 20	2001	10,6
20 - 30	1199	6,3
30 - 40	825	4,4
< 40	3597	19,0
Total	18901	100,0

Fig. n° 13 : Carte de la perte potentielle en sols (A)



Conclusion générale

Le bassin-versant de l'Oued el Kébir a subi une forte agressivité climatique qui atteint 145 MJ/mm/ha.h. La valeur moyenne d'érodibilité (K) est de 0,33 avec des aménagements antiérosifs ne dépassant pas les 22% de la superficie totale et dont certaines unités nécessitent des interventions d'urgence et de réhabilitations immédiates.

Quant à la couverture forestière, elle reste faible au tour de 22% de la superficie totale de la zone d'étude. La situation devient encore plus compliquée dans la mesure où la moitié de la couverture forestière se trouve en état dégradé.

La pente est dans l'ensemble forte puisque 61,1 % de la superficie du bassin versant est dotée d'une pente supérieure à 10 %.

Par ailleurs, l'évaluation de la quantité des terres touchées par le processus érosif en nappe et en rigole est grave. A ce propos, 3600 ha (19%) de la superficie de la zone d'étude sont fortement affectés par l'érosion hydrique de surface (perte en sol supérieur à 40 t/ha/an), 800 ha (4,4 %) ont des pertes en sol comprise entre 30 et 40 t/ha/an. Les pertes en sols de la classe 20 à 30 t/ha/an concerne 6,3 % de la superficie du bassin-versant ; alors que les pertes en sols comprise entre 10 à 20 t/ha/an et inférieur à 10 sont respectivement 10,6 % et 59,7 %.

À cette érosion de surface s'ajoute le ravinement linéaire ou concentré qui mérite d'être mis en exergue.

Manifestement, une bonne partie des ouvrages hydrauliques dans le bassin-versant de l'Oued el Kébir est, aujourd'hui, sérieusement menacée par l'envasement. Seul le barrage collinaire Halfaya est bien protégé par une couverture végétale adéquate.

Les sous-bassins Oued Echarfi et Ezahar, peu protégés contre l'érosion hydrique, sont fortement menacés par l'érosion hydrique. Les autres barrages collinaires (El Batta, Roumada, El Faouar) nécessitent eux aussi des interventions, en urgence, en matière d'aménagement antiérosif. Notons, aussi, qu'une bonne partie des aménagements est réalisée sur des terres de faible à moyenne érosion.

A ce propos, il s'est avéré que l'utilisation du support cartographique (carte des pertes en sols) est sollicitée pour le choix des zones d'intervention.

Les choix des actions antiérosives doivent prendre en compte les caractéristiques pédologiques, topographiques, le mode de l'occupation des sols sans oublier le volet socio-économiques de la population locale.

En guise de conclusion, il semble que la modélisation de quantification de perte des terres via l'équation universelle USLE apporte une aide considérable aux décideurs et aux aménagistes en matière de lutte antiérosive.

Remerciements

L'auteur exprime sa gratitude à l'*Université King Khalid*, en Arabie Saoudite pour leur soutien administratif et technique.

Acknowledgements

The author would like to express his gratitude to *King Khalid University*, Saudi Arabia for providing administrative and technical support.

Bibliographie

- AMAMI L. (2011) - Dynamique de l'érosion des terres dans un milieu semi-aride de la Tunisie centrale : le cas du chaînon de Mrhila et de ses piémonts. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 55, n°1, p. 63-93.
- BANNARI A., EL-HARTI A., HABOUDANE I., BACHAOUI M. et EL-GHMARI A. (2007) - Intégration des variables spectrales et géomorphologiques dans un SIG pour la cartographie des aires exposées à l'érosion. *Téledétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 327-342.
- BELAID R. (1965) – Le bassin-versant du moyen Miliane entre pont du Fahs et le Jbel Oust. Etude géomorphologique. Thèse de troisième cycle, Strasbourg, 200 p.
- BEN CHEIKHA L. et GUEDDARI M. (2008) - Le bassin versant du Jannet (Tunisie): évaluation des risques d'érosion hydrique. *M@ppemonde*, n° 90, 15 p.
- BEN CHAABANE H. (2000) - L'érosion hydrique sur les piémonts de Jbel Semmama. Rapport du Ministère de l'Agriculture et des Ressources en Eau, 30 p.
- BKHAIRI A., « Suffosion et érosion hydrique en milieux semi-arides, le cas des Hautes Steppes tunisiennes (Tunisie centrale) », *Physio-Géo*, Volume 6 | -1, 1-22.
- BLOND N., JACOB-ROUSSEAU N., OUERCHFANI D et CALLOT Y. (2019) - Étude de l'évolution du ravinement dans les *jessour* du Sud Tunisien grâce aux images aériennes. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 906.
- BOU KHEIR R. et al. (2001) - Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. 12(3), pp. 157-66.
- BOU KHEIR R., (2002) - Étude des risques de l'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG. Application à une région représentative du Liban. Paris: Institut national agronomique Paris-Grignon. Thèse de Doctorat en sciences biologiques fondamentales et appliquées, 262 p
- BOUGUERRA S, BOUANANI A. (2016) - Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique- Cas oued Boukiou l'Algérie), *Étude et Gestion des Sols*, Vol 23, 96p.
- BOURGOU M. (1993) - Le bassin-versant du Kébir-Miliane (Tunisie nord-orientale) : étude géomorphologique. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Tunis, 435 p.

- BOURGOU M., OUESLATI A. (1987) - Les dépôts historiques de la vallée du Kébir-Miliane (Nord-Est de la Tunisie). In: *Méditerranée*, troisième série, tome 60, 1-1987. pp. 43-49.
- EL GAROUNI A., MARZOUK A., JABRANE R. et BOUSSEMA M.R. (2005) - Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le Pré-Rif marocain. *Téledétection*, vol. 5, n° 1-2-3, pp. 69-80.
- EL HAGE HASSAN H. CHABREL L. et TOUCHART L. (2015) - Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqôura, *Physio-Géo*, Volume 9, p. 141-156.
- FARHAN Y, ZREGAT D. et FARHAN I. (2013) - Spatial Estimation of Soil Erosion Risk Using RUSLE approach, RS, and GIS Techniques: a Case Study of Kufranja Watershed, Northern Jordan. *Journal of Water Resource and Protection* 5 (12), 1247.
- HAMZA A. (1988) -Érosion et lutte antiérosive dans le bassin versant de l'Oued Zeroud ; (Tunisie centrale) de l'approche exogène à la stratégie technico-paysanne. Thèse de Doctorat d'État, Université de Strasbourg, 1191 p.
- HERMASSI T., CHERIF M.A. et HABAIEB H. (2014) - Etude du transport solide au niveau du bassin versant de Merguellil, Tunisie centrale : le cas des bassins versants d'Ettiour et de Rajela, *La Houille Blanche*, n°4, p. 88-96.
- OGILVIE A., LE GOULVEN P., LEDUC C., CALVEZ R., et MULLIGAN M. (2016)- Hydrological response of a semi-arid catchment to rainfall events and water and soil conservation works (Merguellil catchment, central Tunisia). *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL*, 61 (2), 441-453.
- RAISSOUMI A et al. (2016)- Water Erosion Risk Mapping and Materials Transfer in the Smir Dam Watershed (Northwestern Morocco). *SCIENCEDOMAIN international. Journal of Geography, Environment and Earth Science International* 5(1), pp. 1-17.
- ROOSE E., SABIR M., ARABI M., MORSLI B. et MAZOUR M. (2012) - Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Physio-Géo*, Volume 6 | -1, 43-69.
- SADIKI A., BOUHLASSA S., AUAJJAR J., FALEH A. et MACAIRE J.J. (2004) - Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation Universelle des Pertes en Sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, vol. 26, p. 69-79.

- YJJOU M., BOUABID R., EL HMAIDI A., ESSAHLOUI A. et EL ABBASSI M. (2014) - Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), Volume 3, Issue 8 p 83-91.