

Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab

Abdelhamid SADIKI¹, Saïdati BOUHLASSA², Jamal AUAJJAR³,
Ali FALEH⁴ & Jean-Jacques MACAIRE⁵

1. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Faculté des Sciences Dhar Mahraz, Département de Géologie, B.P. 1796 Atlas, Fès, e-mail : sadiki_a@yahoo.fr

2. Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Laboratoire de Radiochimie, Rabat.

3. Université Mohammed V-Agdal, Ecole Mohammedia d'Ingénieurs, Département de Génie Minéral, Rabat.

4. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Faculté de Lettres Saïss, Département de Géographie, B.P. 59, Fès.

5. Faculté des Sciences et Techniques de Tours, Laboratoire GÉEAC, F-37200 Tours, France.

Résumé. Le bassin versant de l'oued Boussouab (Rif oriental, Maroc) est caractérisé par un climat semi-aride. Des pluies rares et irrégulières, le plus souvent à caractère orageux, combinées à une déforestation importante, provoquent une érosion sévère. Les sols sont de plus en plus dégradés et les sédiments issus de cette érosion contribuent à l'envasement des retenues des barrages. L'intégration des cartes thématiques des différents facteurs de l'Equation universelle de pertes en sol dans le Système d'information géographique (SIG PAMAP) avec leurs bases de données, a permis d'une manière rapide et efficace de démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs dans l'analyse des risques d'érosion, de mieux cerner l'impact de chaque facteur et d'évaluer sa contribution aux pertes en sol. L'intégration dans le SIG des formules de l'Equation universelle des pertes en sol a permis de hiérarchiser les différentes zones du bassin versant, en produisant une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion, de déterminer le taux d'érosion par le ruissellement en nappe (55,35 t/ha/an en moyenne) et d'établir les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique qui sont, par ordre d'importance, la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale.

Mots clés : Maroc, Rif, érosion, oued Boussouab, Système d'information géographique, Equation universelle de pertes en sol.

Evaluation and cartography of erosion risks by the Universal soil loss equation using a GIS in Eastern Rif (Morocco) : case of oued Boussouab Watershed.

Abstract. The oued Boussouab watershed (Eastern Rif, Morocco) is characterized by a semi-arid climate. Rare and irregular rains, generally of stormy character, combined with an important deforestation, causes severe erosion. The soils are degraded and the sediments resulting from this erosion contribute to silt up the dams. Integration of thematic maps of the Universal soil loss equation factors into GIS with their databases allowed, in a fast and efficient way, to disentangle complexity and interdependence of factors in erosion risks analysis and to better determine the impact of each factor and to evaluate its contribution to soil loss. Crosscutting of thematic maps and the application of the USLE formulas made possible to assess on a hierarchical basis the watershed area by producing a synthetic map of sensitivity degrees to erosion, to evaluate the average rate of the sheet erosion (55,35 t/ha/yr) and to establish the decisive factors which controls erosion which are by order of importance, the slope, the soil erodibility and the vegetable cover.

Key words: Morocco, Rif, erosion, Oued Boussouab, Geographical Information System, Universal Soil Loss Equation.

INTRODUCTION

Le Rif en général et le Prérif en particulier sont des zones caractérisées par la prédominance de formations lithologiques friables telles que les marnes, les marmo-calcaires et les schistes (Ennadifi 1974, Leblanc 1975, Suter 1980). Les sols formés sur ces roches étaient jusqu'aux années 50 protégés par une végétation naturelle relativement dense (Pujos 1958). A partir des années 60, la pression démographique s'est manifestée par un surpâturage et un défrichement de plus en plus intenses des zones forestières. Cette pression, combinée à plusieurs années de sécheresse, a eu pour conséquence la destruction grandissante de la forêt qui ne subsiste actuellement que sous forme de matorrals très dégradés dans le Rif oriental (El Haddad *et al.* 1996). La déforestation s'est répercutée sur le sol qui subit une dégradation importante par érosion hydrique.

Les études d'évaluation des risques d'érosion et de quantification des pertes en sols dans le Rif ont été limitées au Rif central et occidental (Heusch *et al.* 1970, Benmoussa *et al.* 1993, Daghmoumi 1994, Aït Fora 1995, Rahhou

1999, Al Karkouri 2003, Siteri *et al.* 2003). Les bassins versants du Rif oriental, bien que moins arrosés, présentent une érosion des sols très accélérée liée au régime des pluies limitées dans le temps et dans l'espace, mais qui sont le plus souvent à caractère violent et orageux. Le choix du bassin versant de l'oued Boussouab a été dicté par sa richesse en formations lithologiques friables, d'où une importante contribution à l'envasement du barrage Mohammed V sur l'oued Moulouya, et par son extension sur trois domaines structurellement et lithologiquement distincts : le Mésorif, le Prérif et l'avant-pays.

L'évaluation des risques d'érosion des sols du bassin versant a nécessité la cartographie et l'analyse des nombreux facteurs intervenant dans le processus érosif : l'agressivité des précipitations, la pente et la longueur de pente, l'érodibilité des sols, le couvert végétal et les pratiques culturales. Chaque facteur présente un comportement différent d'une zone à l'autre du bassin versant. On a abouti ainsi à une multitude de données à cartographier, stocker, structurer et traiter de manière rationnelle.

Le Système d'information géographique (SIG) permet de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs d'érosion qui y sont rangées.

L'Equation universelle de pertes en sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1978) reste, de loin, le modèle le plus utilisé parmi les modèles mathématiques de prédiction de l'érosion en nappes. L'intégration des cartes thématiques des facteurs de ce modèle dans le SIG a permis de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol.

La présente étude vise les objectifs suivants :

- rassembler et cartographier les différents facteurs intervenant dans le processus érosif en utilisant le SIG ; cet outil informatique permet de stocker et de structurer les informations cartographiques de base, et d'intégrer les différentes caractéristiques du bassin versant ;
- créer une base de données interactive des facteurs de l'érosion, qui englobe des données codifiées et structurées des facteurs majeurs intervenant dans le processus érosif ; localiser les zones susceptibles de produire les sédiments et évaluer les quantités de pertes en sol à l'hectare par l'intégration du modèle universel de perte en sol (USLE) de Wischmeier & Smith (1978) dans le SIG.

CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

L'oued Boussouab est un affluent de l'oued Msoun, lui-même affluent de l'oued Moulouya. Son bassin versant couvre une superficie de 252,20 km². L'altitude varie de 625 m à 1622 m et les pentes de 0 % à 60 %. Il s'étend sur trois domaines structuraux : le Mésorif, le Prérif et l'avant-pays (Fig. 1).

Le Mésorif est représenté par la nappe de Bouhaddoud. Dans le bassin versant de l'oued Boussouab, cette nappe, d'origine intrarifaine, est constituée par des terrains d'âge jurassique moyen à miocène. La lithologie se compose de pélites sombres, de marnes claires, de calcaires marneux et de marnes alternant avec des calcaires à silex en petites barres de quelques décimètres.

Le Prérif forme dans le secteur une bande orientée NE – SW. Sa largeur varie de 5 à 10 km. Dans sa partie interne, apparaît un flysch schisto-gréseux d'âge jurassique et un calcaire tithonique qui forme d'étroits synclinaux très disloqués (Leblanc 1975). Le Prérif externe, plus étendu, est formé par la Nappe prérifaine, série de marnes bleues, très puissante, relativement homogène d'âge Miocène moyen et Tortonien. Elle domine presque tout le paysage à l'exception de certains sommets couverts par des lambeaux de la Nappe d'Ouazzane constituées par des marnes blanches à silex et des alternances de grès et de marnes en bancs décimétriques, formant les parties sommitales de certaines collines prérfaines.

Des dépôts marins post-nappes du Tortonien, formés par une importante série gréseuse, reposent aussi bien sur la Nappe prérifaine que sur celle de Bouhaddoud.

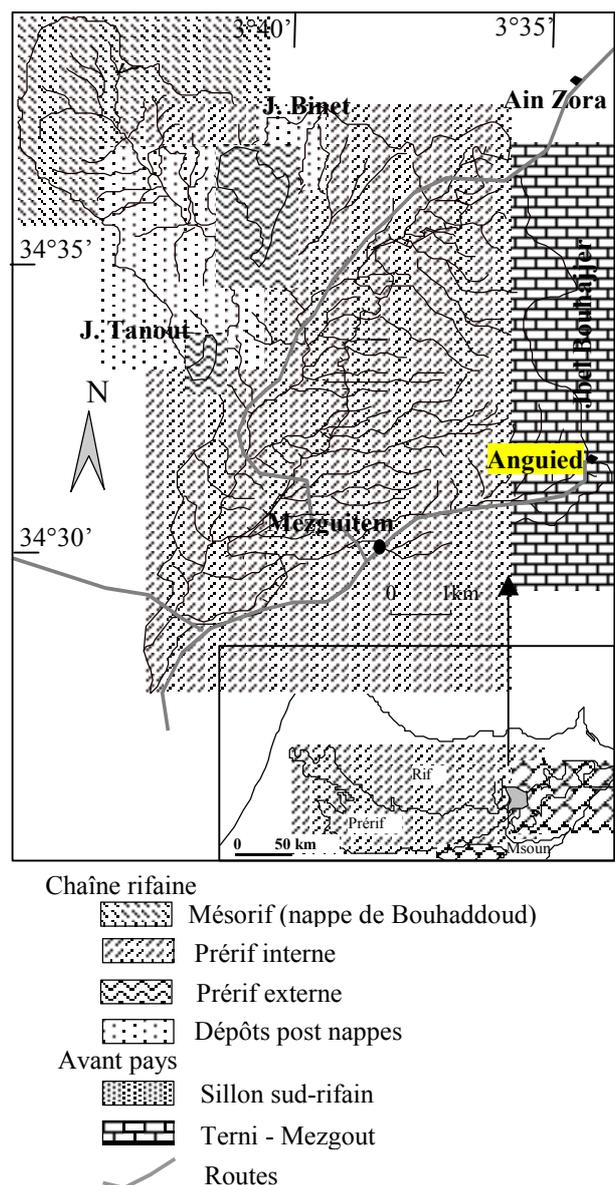


Figure 1. Localisation et cadre structural du bassin versant de l'oued Boussouab, d'après la carte structurale du Rif au 1/500.000 (Suter 1980).

L'avant-pays est constitué par le massif du Terni-Mezgout et le bassin de Guercif. Le massif de Terni-Mezgout est formé par des terrains d'âge bajocien à portlandien. Ce sont de puissantes formations de calcaires, de grès et de marnes qui affleurent sur le versant ouest de Jbel Bouhajjer (Suter 1980). Le bassin de Guercif fait partie du sillon sud-rifain. C'est un bassin de comblement néogène. Les affleurements sont formés par le Miocène marin transgressif. De la base vers le sommet, on distingue une molasse de base constituée par des conglomérats et des calcarénites et une épaisse série marneuse du Tortonien supérieur – Messinien (Rachid 1997).

Le climat qui règne sur le bassin versant est de type semi-aride à aride. Les précipitations moyennes annuelles varient de 150 mm (Anguied) au sud à 350 mm au nord (Tizi Ousli) selon les données météorologiques fournies par les services des Eaux et forêts de Taza. Les précipitations ont lieu le plus souvent sous la forme d'orages violents et

courts. L'irrégularité du régime des pluies peut se vérifier au cours d'une même année ou d'une année à l'autre.

La végétation naturelle du bassin versant de l'oued Boussouab appartient à l'étage bioclimatique aride et semi-aride. Elle se présente sous forme de matorral très dégradé sur les hauteurs. On y trouve le pin d'Alep, le genévrier et le thuya ainsi que des reboisements d'Eucalyptus. Sur les pentes plus faibles, les zones qui n'ont pas été défrichées pour l'agriculture sont couvertes par l'alfa et de l'armoise (Tribak & Iffegh 1984). Le fond de vallée, en pente faible, est occupé par une céréaliculture très modeste.

METHODOLOGIE

Equation universelle de perte en sol (Universal Soil Loss Equation : USLE)

L'Equation universelle de pertes en sol (Wischmeier & Smith 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques anti-érosives :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

où A est le taux annuel de perte en sol en t/ha/an,

R est le facteur de l'érosivité des pluies ; il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 mn consécutives ; il est exprimé en MJ . mm / ha . H . an,

K est l'érodibilité des sols ; il dépend de la granularité, de la quantité de matière organique de la perméabilité et de la structure du sol ; il est exprimé en t . ha . H / ha . MJ . mm,

LS est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m),

C est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale,

P, facteur sans dimension, est un rapport qui tient compte des techniques culturales anti-érosives telles que le labour en courbes de niveau.

L'application de l'USLE dans le bassin versant de l'oued Boussouab a nécessité l'évaluation des différents facteurs de l'équation universelle sur toute la superficie du bassin versant et leur expression sous forme de cartes thématiques. L'intégration de ces cartes dans le Système d'information géographique PAMAP 5.2b se fait par numérisation. Les différents polygones obtenus pour chaque carte sont associés à leurs bases de données. Le croisement des cartes par le module « Overlay » du SIG et l'application des équations mathématiques du modèle de Wischmeier & Smith (1978) par le module « Modeller » a permis d'évaluer le taux d'érosion sur tous les points du bassin versant et l'élaboration de la carte synthétique des pertes en sol selon l'organigramme méthodologique (Fig. 2).

Agressivité des précipitations (R)

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier & Smith nécessite la connaissance des énergies cinétiques (Ec) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I₃₀) des

gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule empirique de Wischmeier & Smith (1978) :

$$R = K E_c I_{30} \quad (1)$$

K étant un coefficient dépendant du système d'unités de mesure.

Les seules données disponibles concernant les précipitations dans les stations qui se trouvent dans le bassin ou à sa proximité sont des moyennes mensuelles et annuelles.

Certains auteurs (Kalman 1967, Arnoldus 1980, et Rango & Arnoldus 1987) ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R. La formule de Rango & Arnoldus (1987) a été appliquée à douze stations se trouvant dans ou à proximité du bassin versant de l'oued Boussouab. Les précipitations annuelles et mensuelles ainsi que les résultats des calculs du facteur R pour six de ces stations ont été reportés sur le tableau I.

$$\log R = 1,74 \cdot \log \sum \left(\frac{P_i^2}{P} \right) + 1,29 \quad (2)$$

où Pi représente les précipitations mensuelles et P les précipitations annuelles en mm.

Pour extrapoler les valeurs du facteur R à l'ensemble du bassin versant, des lignes de même agressivité climatique (isoérodent) ont été tracées selon le principe de traçage des isohyètes de Thiessen entre les douze stations. La figure 3 représente la répartition des isoérodents dans le bassin versant de l'oued Boussouab.

Les valeurs de R pour le bassin versant de l'oued Boussouab varient de 31,2 à Anguied au sud-est du bassin à environ 60 au nord-ouest. Ces valeurs sont relativement faibles comparativement à celles du Rif central (bassin versant de l'oued Leben) où Rahhou (1999) indique des valeurs allant de 43 à 87,56, à celle de la vallée de l'Ouergha où le service des Eaux et forêts (Le Landais *et al.* 1995) a déterminé des valeurs de 51 à 194 et dans la péninsule tingitane (bassin versant de Telata) où Dhman *et al.* (1997) ont trouvé des valeurs de R allant de 215 à 228.

Presque 70 % de la superficie du bassin versant de l'oued Boussouab a subi une agressivité climatique variant de 40 à 50 MJ.mm/ha.h.an.

Erodibilité des sols (K)

Le facteur érodibilité des sols est le taux d'érosion déterminé expérimentalement sous des conditions standard. La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier & Smith (1978) de développer une équation pour le calcul de l'érodibilité des sols :

$$100K = 2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3) \quad (3)$$

où M est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) \cdot (100 - \% \text{ argile})$,

a est le pourcentage de matière organique,

b est le code de la perméabilité,

c est le code de la structure.

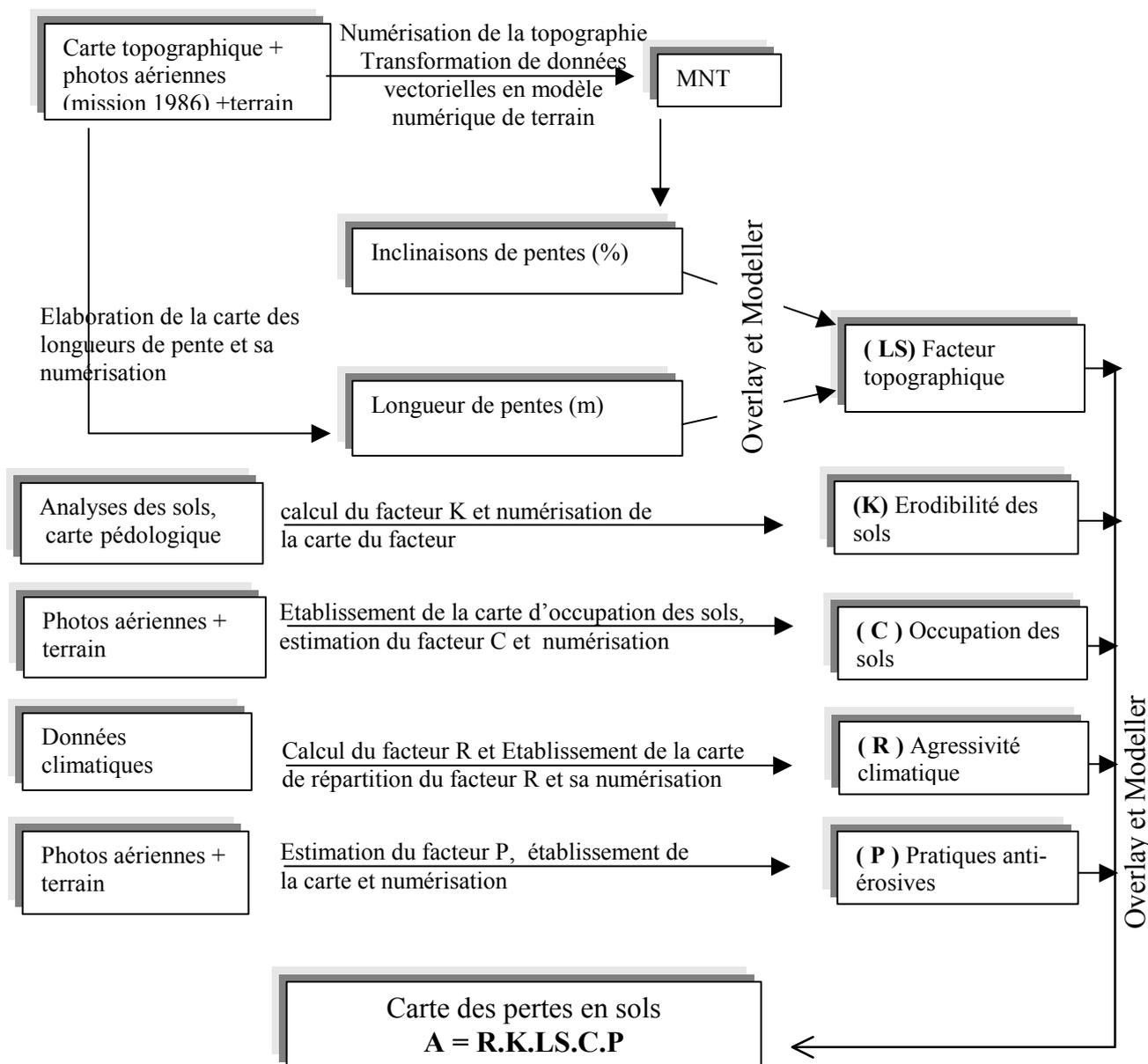


Figure 2. Organigramme méthodologique de l'intégration de l'Equation universelle de perte en sol dans le SIG.

Tableau I. Précipitations moyennes mensuelles (mm), annuelles (mm) et valeur de R moyen pour la période 1970-1999

STATION	sept.	oct.	nov.	dec.	jan.	fev.	mar.	avr.	mai	juin	juil.	aout	total	R
Ain Zora	35,7	16,6	43	19	22,2	22,7	45,6	16	21,1	17,3	0,5	1,2	261	52,6
Aknoul	23	29,1	44	45,6	47,6	42,6	34,2	32	27,3	13,8	4,6	6,7	351	62,7
Anguied	4,3	30,8	20,4	15,4	15,2	31,2	14,1	23,9	19,2	7,7	1,4	3,7	187	38
El Kifane	11,5	29,9	24,9	45,6	32,3	52,8	45	45,1	25,2	15,9	2,7	5,2	336	56
Mezguitem	2,3	14	39,3	15,7	21,1	18,1	16	38,2	15,7	2,2	0,5	1,1	194	41,4
Tizi Ousli	8,2	8,2	28,5	60,6	16,9	38,8	36,2	36,3	37,5	26,1	2,9	14,4	315	61,5

Pour déterminer le facteur K dans le bassin versant de l’oued Boussouab on a analysé la surface des formations meubles pouvant être mobilisées par l’érosion (altérites, sols, alluvions et colluvions) couvrant les différentes formations géologiques affleurant dans le bassin. Pour

limiter l’influence des autres facteurs, nous avons retenu la moyenne de 3 ou 4 valeurs de K pour chaque formation lithologique. Certaines surfaces montrent une grande quantité d’éléments grossiers qui ralentissent l’érosion en interceptant les

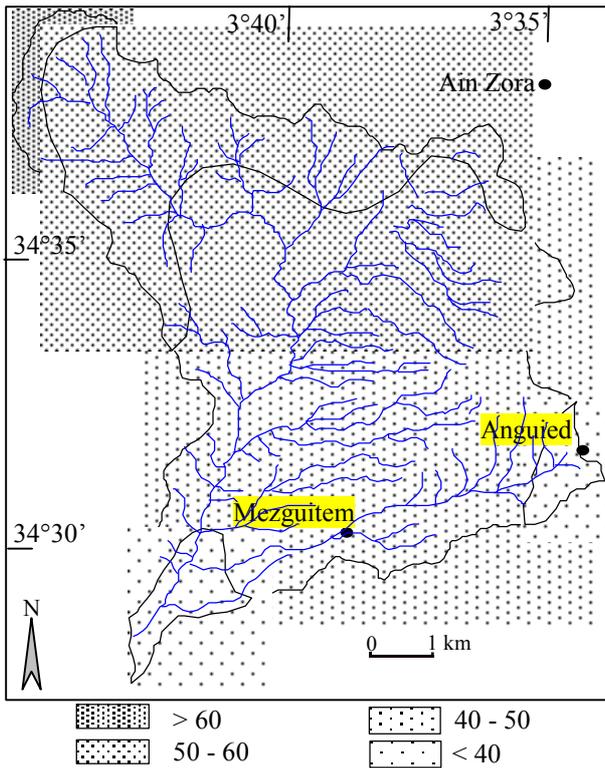


Figure 3. Distribution des valeurs du facteur R, calculées d'après la formule de Rango & Arnoldus (1987).

gouttes de pluie, ce qui inhibe l'effet splash (désagrégation des mottes du sol par l'impact des gouttes de pluie). Ils réduisent la vitesse du ruissellement et font diminuer son énergie et sa capacité à détacher et à transporter les particules du sol. Plusieurs auteurs ont proposé des équations qui impliquent les proportions en éléments grossiers en surface et ajustent la formule de Wischmeier & Smith (Dumas 1964, Römkens *et al.* in Renard *et al.* 1996). La formule 4 a été choisie pour effectuer l'ajustement, ce qui permet d'obtenir un facteur K plus proche de la réalité :

$$K_{\text{ajusté}} = K (0,983 - 0,0189 X + 0,0000973 X^2) \quad (4)$$

où X est le pourcentage des éléments grossiers de taille > 2 mm en surface ; K est le facteur calculé par l'équation de Wischmeier & Smith.

Les valeurs obtenues pour le facteur K varient de 0,021 (altérites du calcaire détritique du Miocène supérieur de l'avant-pays) à 0,60 (pélites sombres du Crétacé inférieur de la nappe de Bouhaddoud et marnes bleues de la Nappe prériétaire). La carte de répartition du facteur K épouse celle de la lithologie du bassin versant (Fig. 4). La figure 5 montre les fréquences des classes de K dans le bassin versant.

Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique (LS) a été calculé à partir de l'inclinaison des pentes et de leur longueur par la formule de Wischmeier & Smith (1978) :

$$LS = (L/22,13)^m \cdot (0,065 + 0,045 \cdot S + 0,065 \cdot S^2) \quad (5)$$

où L est la longueur de pente en m,

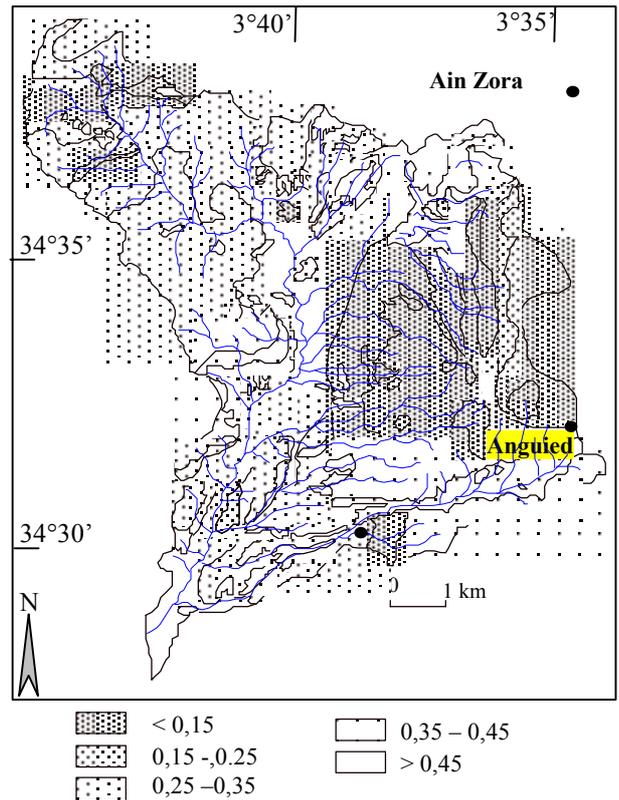


Figure 4. Répartition des classes des valeurs du facteur K dans le bassin versant de l'oued Boussouab en (t. ha . H / ha . MJ . mm).

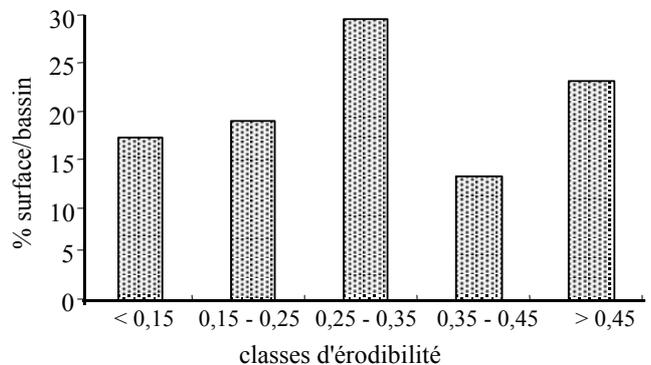


Figure 5. Fréquence des classes du facteur érodibilité K dans le bassin versant de l'oued Boussouab.

S est l'inclinaison de la pente en % ,

m est un paramètre tel que m = 0,5 si la pente est > 5%, m = 0,4 si la pente est de 3,5 à 4,5 %, m = 0,3 si la pente est de 1 à 3 % et m = 0,2 si la pente est < 1%.

Les données topographiques ont été intégrées dans le SIG par digitalisation des courbes de niveau (carte topographique au 1/50000, équidistance 10 m). Le SIG permet la transformation de ces données en modèle numérique de terrain (MNT). Par l'application du module « Topographier », nous avons extrait du MNT les cartes qui nous intéressent : la carte hypsométrique par tranches d'altitude ; la carte des expositions des versants ; la carte des pentes (Fig. 6A). Généralement c'est une multitude de

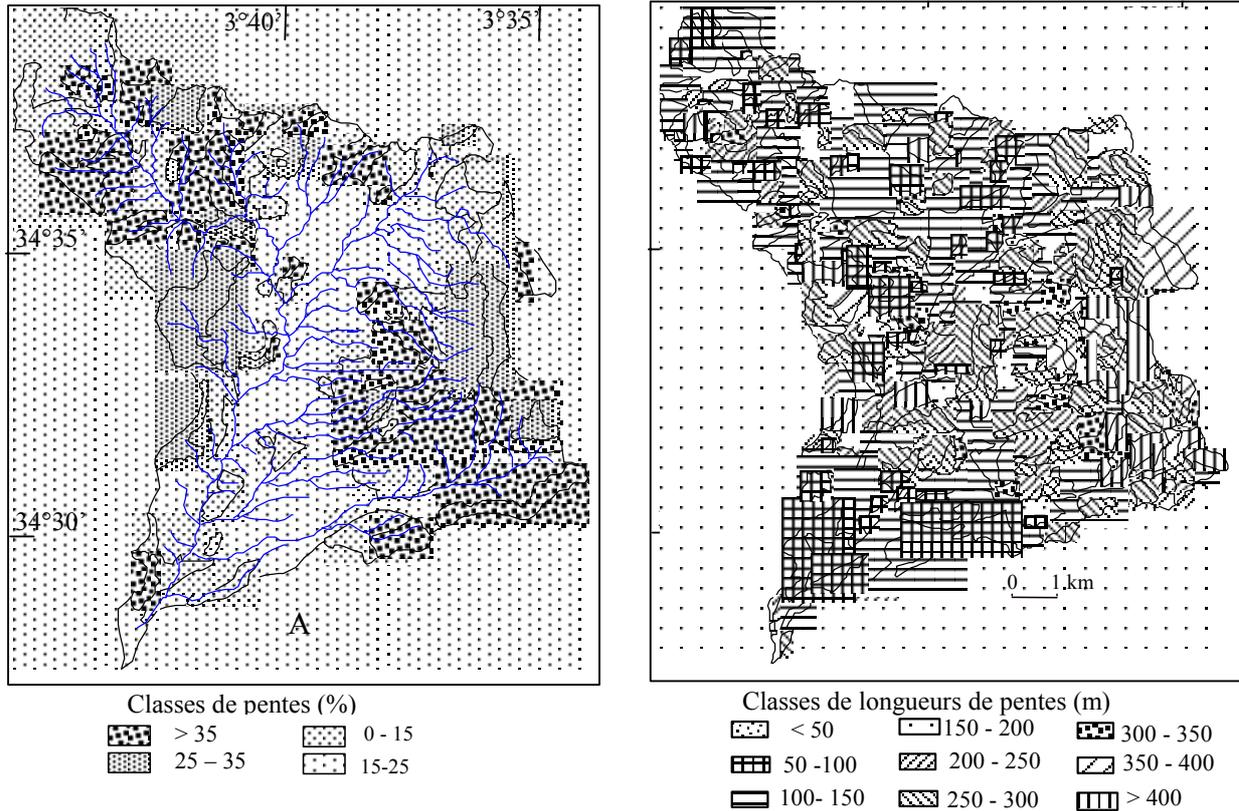


Figure 6. Carte des classes de pentes en % (A) et de longueurs de pente en m (B) du bassin versant de l'oued Boussouab.

petits polygones représentant chacun une valeur de pente mais qui sont regroupés en classes pour une meilleure lecture de la carte.

Sur la carte des longueurs de pente (Fig. 6B) ont été délimitées des surfaces où le ruissellement ne rencontre pas d'obstacles. La longueur de la pente de chaque surface a été mesurée suivant la plus grande pente entre le point où commence le ruissellement et le point où commence le dépôt, ou le point d'intersection avec un chenal de drainage. Elle a nécessité l'utilisation des photographies aériennes et de la carte topographique au 1/50.000. Ceci a permis de délimiter des surfaces entre les lignes de crête, les thalwegs, les pistes et les routes. Par la suite, une vérification sur le terrain a été effectuée, car beaucoup de ruptures de pente et de limites de champs qui constituent des limites d'écoulement ne sont pas représentées sur les cartes et ne sont pas décelables sur les photos aériennes (sentiers étroits, limites de parcelles de cultures...), aussi, a-t-on préféré la réaliser manuellement. Cette carte a été ensuite intégrée au SIG par digitalisation.

La superposition des cartes des pentes et des longueurs de pentes a été effectuée à l'aide du module « Overlay » du logiciel PAMAP, et l'application de la formule (5) de Wischmeier & Smith (1978) pour le calcul de LS pour chaque polygone résultat de la superposition a été effectué à l'aide du module « Modeller ».

La carte résultante est composée de 2682 unités de facteur LS différents. Chaque unité mesure en moyenne 9 hectares et la valeur de LS est homogène sur l'ensemble de l'unité.

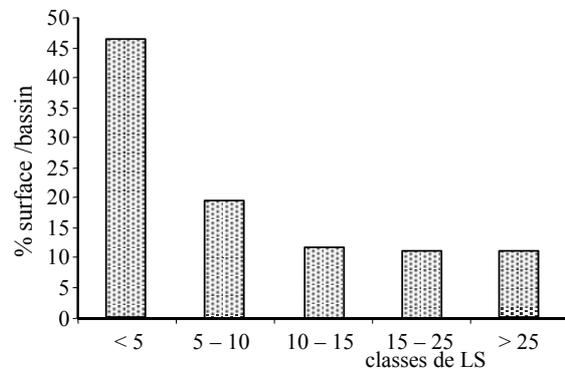


Figure 7. Distribution des classes du facteur LS dans le bassin versant de l'oued Boussouab.

Les valeurs de LS varient de 0,48 à 87,9. Ces différentes unités ont été regroupées en 5 classes (Fig. 7).

Occupation des sols (C)

La détermination du facteur C repose sur la densité de la couverture de la surface du sol par la végétation et sur la hauteur des strates végétales. La partie NW du bassin de Boussouab où les altitudes dépassent 1000 m et les précipitations sont supérieures à 300 mm/an, constitue la seule zone où on rencontre le pin d'Alep. Dans cette zone se trouve la limite des forêts de pin d'Alep. Plus à l'est et au sud, à des altitudes comprises entre 800 et 1000 m, les peuplements de pin d'Alep disparaissent progressivement

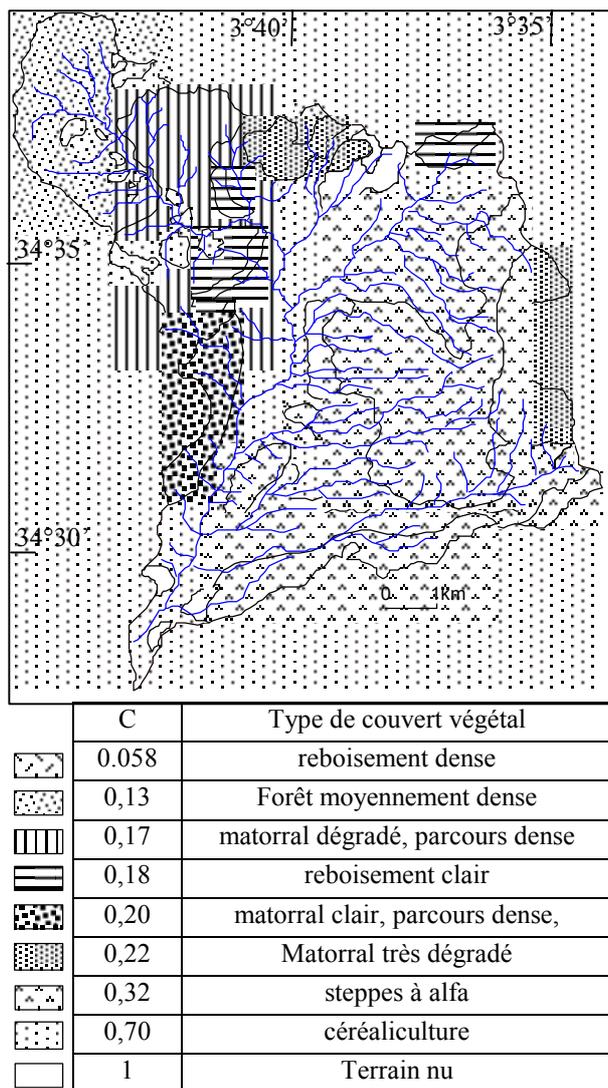


Figure 8. Distribution spatiale des principales valeurs du facteur C dans le bassin versant de l'oued Boussouab.

pour laisser la place aux touffes de thuya, romarin et alfa. Sur les sommets de l'est du bassin versant, où l'altitude atteint 1600 m à Jbel Bouhajjer, les peuplements forestiers très dégradés sont constitués surtout par du chêne vert qui passe directement au thuya à des altitudes inférieures à 1100 m. La partie centrale et méridionale du bassin où les altitudes passent en dessous de 800 m, au sud où les précipitations sont inférieures à 200 mm/an, c'est le domaine de l'alfa qui forme parfois des aires très denses accompagnée du jujubier, du romarin et de l'armoise. Toutes les anciennes forêts ne sont plus qu'à l'état de matorral très dégradé. Le service des Eaux et Forêts a réussi à réhabiliter quelques zones en y reboisant des Eucalyptus ou des pins d'Alep ; la forêt y est moyennement dense.

Les collines du Prérif sont généralement occupées par des cultures (céréaliculture très modeste) ; la pauvreté des sols combinée à un climat semi-aride font que la rentabilité est très faible.

Pour la détermination du facteur C, nous avons utilisé les tableaux de Wischmeier & Smith (1978) qui donnent des

valeurs préétablies pour les forêts, les matorrals et les pâturages. Ces tableaux, établis aux Etats-Unis, se basent sur la hauteur de la végétation, sur l'indice de recouvrement et sur le pourcentage de la couverture herbacée et les résidus de végétation ou litière.

La distinction des terrains cultivés est basée sur le type de culture, le calendrier et les rotations culturales. Les résultats ont été ensuite comparés aux travaux effectués par Cormary & Masson (1963) en Tunisie. Ils sont résumés dans la figure 8.

Pratiques anti-érosives (P)

Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient selon la pratique adoptée et aussi selon la pente. Dans tout le bassin versant de l'oued Boussouab, il n'y a pas d'aménagements anti-érosifs, et les agriculteurs n'utilisent pas de pratiques culturales anti-érosives. Les cultures sont surtout céréalières et les labours sont rarement parallèles aux courbes de niveau. Il y a quelques essais de réhabilitation des forêts par des reboisements mais pas en banquettes. Dans ce contexte, la valeur P = 1 a été attribuée à toute la superficie du bassin.

RESULTATS

Estimation des pertes en sol

Le croisement des cartes des principaux facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols permet d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant. L'application de la formule de Wischmeier & Smith (1978) en tenant compte des valeurs numériques des cinq facteurs donne la perte en sol pour chaque point du bassin versant. Ce traitement permet de subdiviser le territoire de 25220 ha du bassin versant en 5822 unités distinctes d'une surface de 4,3 ha en moyenne. Chaque unité possède des valeurs homogènes des cinq facteurs de l'USLE, avec une perte en sol, moyenne de tous les pixels de l'unité exprimée en t/ha/an.

Pour les besoins de lisibilité de la carte, ces différentes unités ont été regroupées en classes (Fig. 9). La classification adoptée est une classification établie aux Etats-Unis fondée sur la tolérance des sols aux pertes. Elle suppose qu'en moyenne, les sols peuvent tolérer des pertes allant jusqu'à 7,41 t/ha/an tout en permettant un niveau élevé de production agricole. Au-delà de 20 t/ha/an, la perte est forte et les sols sont très dégradés ce qui peut nuire à la production.

La perte moyenne par érosion hydrique en nappes pour l'ensemble des unités homogènes est d'environ 55,35 t/ha/an. Les pertes maximales et minimales par unité sont respectivement de 1159,51 t/ha/an et de 0,09 t/ha/an. Les pertes totales annuelles du bassin sont de 322 246 t/an. Les taux d'érosion diffèrent d'une zone à l'autre du bassin versant, selon l'influence des différents facteurs qui

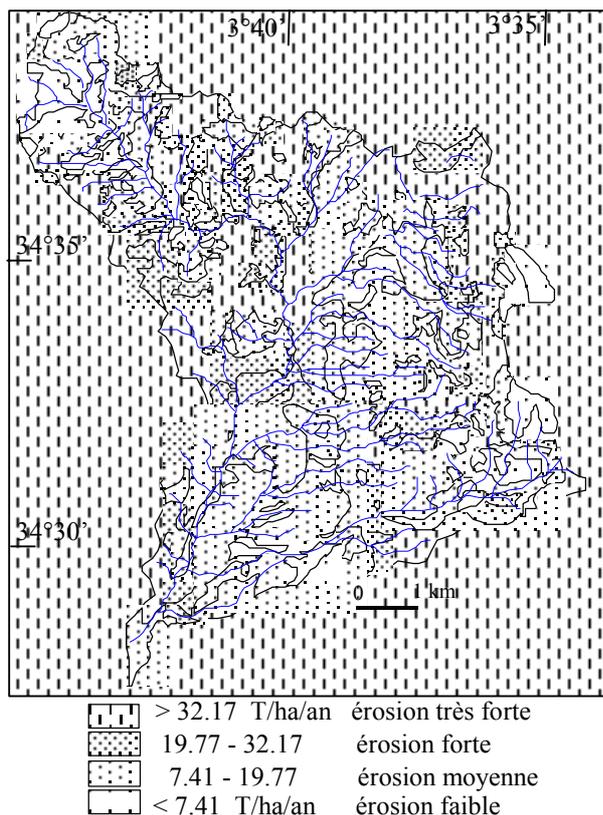


Figure 9. Distribution des pertes en sol dans le bassin versant de l'oued Boussouab.

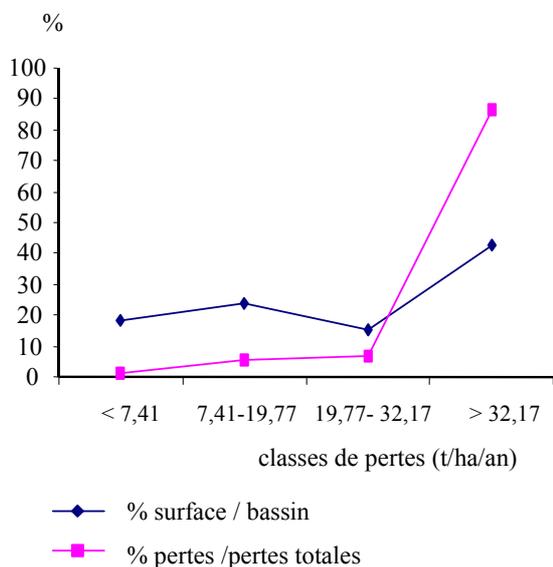


Figure 10. Répartition des pertes en sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab

contrôlent l'érosion. La répartition des pertes en terre n'est pas proportionnelle aux surfaces ; en effet, 42,74% de la surface du bassin contribuent à 86,45 % des pertes (Fig. 10).

Influence de chaque facteur sur les pertes de sol

La distribution inégale des pertes en sol dans le bassin versant résulte de l'impact variable dans l'espace des divers

facteurs dans le processus d'érosion. Les résultats des pertes moyennes ont été confrontés aux valeurs de chaque facteur pour appréhender l'impact de ces derniers. Ceux qui montrent une bonne corrélation sont présentés et des explications seront fournies pour les anomalies observées.

Pour chaque facteur seront présentés des graphiques qui montrent d'une façon schématique les variations des pertes moyennes, les proportions des pertes moyennes par rapport aux pertes totales du bassin et les proportions des surfaces par rapport à la superficie totale du bassin pour chaque classe de valeurs des différents facteurs.

Effet de l'inclinaison des pentes

La figure 11A montre que les pertes moyennes augmentent linéairement avec l'inclinaison des pentes. Le coefficient de corrélation ($R^2=0,98$) atteste de l'importance de l'inclinaison des pentes dans le processus d'érosion en nappe dans le bassin versant.

Effets de l'érodibilité des sols

Les variations des surfaces de répartition des classes de K évoluent dans le même sens que l'accroissement des valeurs de ce facteur (Fig. 11B). Le diagramme montre que parallèlement à l'augmentation des valeurs de K, il y a une augmentation des pertes moyennes et des proportions de pertes par rapport aux pertes globales.

Au niveau des pertes moyennes, une certaine stabilité des pertes en sol est constatée pour les valeurs de K comprises entre 0,15 et 0,35 mais cette stabilité n'atténue pas la tendance générale qui est celle d'une augmentation dans le même sens que la variation des valeurs du facteur K. Le facteur d'érodibilité des sols K présente une bonne corrélation avec les pertes moyennes ($R^2 = 0.88$).

La variation des surfaces des classes du facteur K, qui évolue dans le même sens que les valeurs de K, n'a pas caché l'influence de ce facteur sur les pertes. Elle est très nette dans les proportions des pertes par rapport aux pertes totales du bassin. On peut donc conclure que le facteur K joue aussi un rôle décisif dans le contrôle de l'érosion, mais à un moindre degré que la pente.

Effet du couvert végétal (C)

D'une manière générale, le degré de protection des sols par le couvert végétal se traduit au niveau des pertes moyennes, qui enregistrent une augmentation parallèle à l'augmentation des classes de valeurs de C, à l'exception de la classe 0,2-0,3 où les pertes moyennes enregistrent une augmentation «anormale»(Fig. 11C).

Pour tenter de justifier l'augmentation anormale des pertes moyennes de la classe 0,2-0,3 des valeurs de C, l'effet des facteurs amplificateurs de l'érosion sur cette classe ont été examinés. En combinant la classes 0,2-0,3 du facteur C avec les différentes classes de pentes, on remarque que 33 % de la surface des sols sur lesquels la classe 0,2-0,3 de C est enregistrée se trouvent sur des pentes supérieures à 35 % où la moyenne de pertes atteint 151,63 t/ha/an (Fig. 12A) et que 60 % des pertes émises par cette classe de C proviennent justement à travers cette classe de pentes (> 35

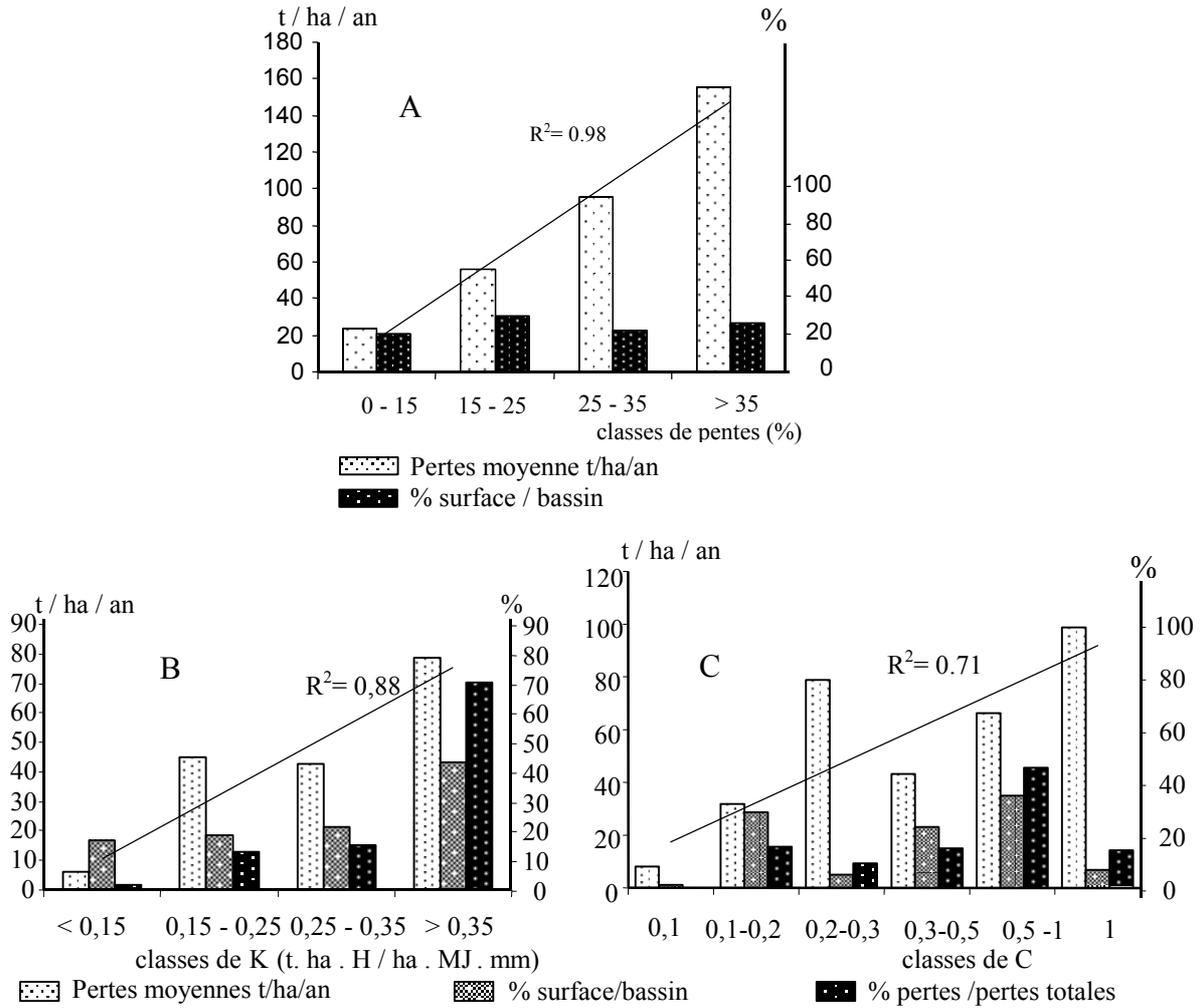


Figure 11. Répartition des pertes en sol en fonction de classes de pentes (A), du facteur K (B) et du facteur C (C) dans le bassin versant de l'oued Boussouab..

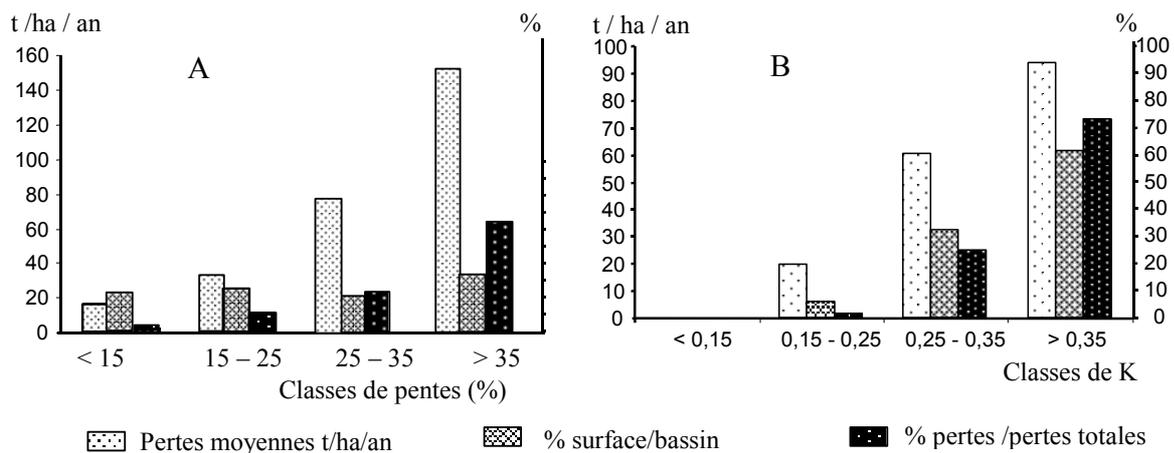


Figure 12. Variation des pertes de la classe 0,2-0,3 du facteur C en fonction des classes d'inclinaison des pentes (A) et du facteur érodibilité des sols K (B) dans le bassin versant de l'oued Boussouab.

%). Le facteur pente a donc une influence sur l'augmentation anormale des pertes de la classe 0,2-0,3 du facteur C. Bien que relativement protégée par la végétation, la proportion de surface des sols (33 %) se trouvant sur pente forte (>35 %) conduit à des pertes importantes.

En combinant la classe 0,2-0,3 du facteur C avec le facteur érodibilité des sols (K), la surface occupée par cette classe sur le bassin versant se répartit d'une façon très inégale sur les différentes classes de valeurs de K (Fig. 12B). Elle est absente des sols peu érodables (K < 0,15) ; plus de 61 % de

cette surface se trouve dans la zone des sols très érodables ($K > 0,35$).

Le facteur K a aussi une influence sur cette classe du facteur C. La présence de 61 % de la surface de cette classe dans des zones très érodables accentue les pertes en sol subies par cette classe.

La distribution de la classe 0,2-0,3 du facteur C sur des pentes fortes (33% de la surface) et sur des sols très érodables (61% de la surface) expliquerait les valeurs élevées des pertes moyennes.

Effet de l'agressivité climatique et de la longueur de pente

L'agressivité climatique et la longueur de pente n'ont pas montré une bonne corrélation avec les pertes.

Concernant l'agressivité climatique, plusieurs raisons peuvent expliquer cette mauvaise corrélation :

- le principe de traçage des courbes isohyètes (méthode de Thiessen) ne reflète pas la réalité de répartition des précipitations ; il ne tient pas compte des reliefs et de l'exposition des versants et surtout de l'irrégularité des pluies, ce qui peut causer une fausse estimation de R ;
- l'éloignement des stations d'enregistrement des précipitations et l'extrapolation de leurs données aux différentes zones du bassin alors que les précipitations peuvent parfois avoir lieu sous forme d'averses localisées ravinant seulement une partie du bassin versant ;
- l'écart entre les valeurs extrêmes de R est faible ;
- l'interaction probable entre les différents facteurs qui contrôlent l'érosion.

Pour la longueur de pente, l'effet accélérateur du courant de ruissellement en nappe pour des longueurs de plus en plus grandes n'aboutit pas à une ablation homogène sur une surface, laquelle apparaîtrait dans les calculs des pertes par l'équation de Wischmeier & Smith (1978), mais aboutit probablement à une concentration plus poussée de l'écoulement. Cela se manifeste certainement sur le type d'érosion qui se transforme en érosion linéaire qui n'est pas prise en compte par le modèle de Wischmeier & Smith.

DISCUSSION

Le modèle empirique de Wischmeier & Smith (1978) présente plusieurs limites à son applicabilité dans des conditions différentes de celles où il a été élaboré. Outre le fait qu'il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et que les quantités de pertes estimées n'incluent pas les pertes par les autres types d'érosion (linéaire, solifluxion, ...), le modèle considère que toutes les surfaces sont soumises à l'érosion si aucun des facteurs n'est nul. Il ne met pas en évidence les dépôts aussi bien de versants que fluviaux.

Ces limites étant admises, l'intégration du modèle dans un SIG présente en revanche beaucoup d'avantages, surtout ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'érosion. Cette intégration permet de :

- gérer d'une façon rationnelle une multitude de données qualitatives et quantitatives relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols ; ceci permet de conclure que les facteurs décisifs de l'érosion dans le bassin versant de

l'oued Boussouab sont la pente et à un moindre degré l'érodabilité des sols et la couverture végétale, et que c'est sur ces facteurs que les interventions doivent être focalisées pour lutter contre l'érosion hydrique en nappes ;

- démêler la complexité et l'interdépendance des facteurs déterminant de l'érosion par croisements successifs des couches informatives relatives aux cartes thématiques, comme par exemple le cas de la hausse anormale de la classe 0,2-0,3 du facteur C ; il y a donc un cumul d'influence de la pente et de l'érodabilité des sols sur cette classe du facteur C, ce qui a accentué les pertes dans les zones où se trouve cette classe et l'a empêché de s'exprimer plus librement ;

- introduire la notion d'évolutivité à travers l'enrichissement et l'actualisation permanente des données ; le SIG offre la possibilité de mise à jour continue des données ;

- établir une carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion des différentes zones du bassin versant ; chaque zone du bassin versant est analysée à travers la combinaison des facteurs intervenant dans le processus érosif.

CONCLUSION

La présente note expose les résultats de l'application de l'Equation universelle de pertes en sol à l'aide d'un Système d'information géographique dans le bassin versant de l'oued Boussouab. L'étude a montré que le bassin versant perd en moyenne 55.35 t/ha/an. Cette valeur correspond à une érosion très élevée non tolérée par les sols qui subissent un climat agressif avec des précipitations faibles mais à caractère orageux. Localisées dans le temps et dans l'espace, elles ne permettent pas une évolution pédogénétique pour compenser la perte en sol. Les grandes surfaces de terrains nus décapés de leurs sols et affectés par des ravinements généralisés en témoignent. Cette situation grave est favorisée par les autres facteurs de l'érosion qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion, les pentes fortes (55% de la surface du bassin versant de l'oued Boussouab présente des pentes supérieures à 15%), sols très érodables (60 % des sols montre un facteur $K > 0.25$) et une dégradation alarmante du couvert végétal.

Bien que la validité des pertes en sols de l'USLE soit sujette à discussion, la méthode apporte une aide importante aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution de la région et planifier les interventions de lutte contre l'érosion, surtout dans les zones où l'érosion en nappe est prédominante sur l'érosion linéaire. Elle permet aussi de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'Action Intégrée MA/10/01 entre le Laboratoire GÉEAC de la Faculté des Sciences et Techniques de Tours (France) et la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès. Les auteurs remercient vivement tous les membres du Laboratoire GÉEAC.

Références

- Ait Fora 1995. *Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin versant du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments*. Thèse de PhD, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- Al Karkouri J. 2003. *Dégradation du milieu naturel dans le bassin de Beni Boufrah (Rif central-Maroc) : analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et modélisation spatiale*. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V, Fac. Lett. Rabat, 392 p.
- Arnoldus H.M.J. 1980. Methodologie used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco, *Bulletin F.A.O.*, 34.
- Benmoussa M., Elyamani M. & Saidi A. 1993. Application de l'équation universelle de perte en sol au bassin versant de l'oued Tasrafet. *GéoObserver*, Rabat, 3, 59-70.
- Cormary Y. & Masson J. 1963. Application à un projet type de la formule de perte de sols de Wischmeier. Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de recherches du génie rural de Tunisie, 26 p.
- Daghmoumi R. 1994. *Apport de la géologie et du SIG à l'étude des bassins versants de l'Aoudour (Rif central)*. Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 162 p.
- Dumas J. 1964. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques *O.R.S.T.O.M. Tunis*, sér. pédologie, 3, 307-333.
- Dhman L., Merzouk A., Sabir M. & Fenjiro I. 1997. Cartographie des pertes en terre dues à l'érosion hydrique par utilisation d'un système d'information géographique et des images satellites. Cas du bassin versant de Telata. *Atelier de travail sur la modélisation de l'érosion hydrique par « RUSLE »*. Marrakech, 24-28 mars 1997, 52-65.
- El Haddad M., Zeryouh A., Hai M. & Fares A. 1996. Plan d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'oued Msoun en amont du barrage Mohammed V. *Rapport inédit, Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols*.
- Ennadifi Y. 1974. Etude géologique du Prérif oriental et son avant-pays (région comprise entre Mezguitem, Ain Zora et Tizroutine). *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 253, 66 p.
- Heusch B., Kalman R., Duhamel P.L. & Robert P. 1970. Erosion, transport solide, sédimentation. *Ann. Rech. Forest. Maroc*. n° sp. Etude sur l'érosion, 10, 390 p.
- Kalman R. 1967. Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin de Sebou. *Projet Sebou, Rapp. inédit*, 40 p.
- Le Landais F. & Fabre G. 1975. Plan d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'oued Ouergha en amont du barrage El Ouahda. *Rapport inédit, Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols*.
- Leblanc D. 1975. Etudes géologiques dans le Rif externe oriental au nord de Taza. *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, 281, 160 p.
- Pujos A. 1958. Etude des érosions dans le bassin de la Moulouya. SOGETIM, Maroc. *Administration des Eaux et forêts*, 5 volumes, 1 carte de la couverture végétale.
- Rachid A. 1997. *Les bassins néogènes du sillon sud-rifain et du Rif nord-oriental (Maroc) : sédimentologie, paléogéographie et évolution dynamique*. Thèse Doct. Etat, Univ. Sidi Mohammed Ben Abdallah, Fac. Sci. Dhar Mahraz, Fès, 331 p.
- Rango A. & Arnoldus H.M.J. 1987. Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*.
- Rahhou M. 1999. *L'érosion dans le Prérif central, zone interfluviale Leben-Sebou-Ouergha, un prolongement de l'évolution naturelle, une production sociale*. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V, établissement? Rabat.
- Renard K.G., Foster G.R., Wessies G.A., Mc Cool D.K. & Yoder D.C. 1996. Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *US Dept. Agric. Handbook 703*, 384 p.
- Siteri H., Ait Brahim L., Sossey A.F., Al Hamdouni I., El Hatimi N., Labraimi M., Ammar A., Baghdad B. & Tahri M. 2003. Intégration du modèle USLE dans un SIG pour la détermination de la dégradation spécifique des sols dans le Rif Septentrional (cas du bassin versant de l'oued Nakhla). *Trav. Inst. Sci. Rabat, sér. Géol. & Géogr. phys.*, 21, 241-276.
- Suter G. 1980. Carte structurale de la chaîne rifaine. *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 245b.
- Tribak A. & Iffegh M. 1984. Etude sur les précipitations dans la province de Taza. *Rapport d'ingénieurs des services des eaux et forêts de la direction provinciale de Taza*, 72 p.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. 1965. Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains : a guide for selection of practices for soil and water conservation. *U.S. Dept Agriculture. Agric. Handbook 282*.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. 1978. Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science. *U.S. Dept. Agriculture. Agric. Handbook 537*, 60 p.

Manuscrit reçu le 16 février 2004
Version modifiée acceptée le 17 septembre 2004