
Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique :

Cas du bassin versant oued Boukiou (nord ouest de l'Algérie)

S. Bouguerra et A. Bouanani

Département D'hydraulique, Faculté De Technologie Université Abou bakrBelkaid, Tlemcen, Algérie

* : Auteur correspondant : sid_bouguerra@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'étude porte sur une analyse des principaux facteurs naturels entraînant le phénomène de l'érosion hydrique des sols dans l'un des bassins-versants de l'ouest algérien. La méthodologie se base sur la technique usuelle de cartographie numérique depuis l'acquisition et le traitement d'images satellitaires et des données de la télédétection jusqu'à leur croisement avec d'autres données géographiques dans l'outil SIG (système d'information géographique). Les paramètres à estimer sont liés aux conditions du milieu : sol, relief, occupation du sol. Ainsi, le croisement de ces facteurs selon des règles qualitatives choisies nous a permis d'élaborer une carte décrivant quatre classes de vulnérabilité multifactorielle des sols à l'érosion hydrique : faible (27 %), moyenne (36 %), forte (23 %) et très forte (14 %). Les zones très vulnérables à l'érosion se manifestent dans les sols et substrats fragiles à pente raide et/ou subissant une agriculture très extensive où le couvert végétal est peu protecteur. Les résultats de cette étude serviront à hiérarchiser et sélectionner des périmètres particulièrement sensibles à l'érosion des sols pour en décider des différents aménagements antiérosifs à prévoir.

Mots clés

Erosion hydrique, facteurs d'érosion, érodibilité, cartographie, SIG, traitement d'images, vulnérabilité, bassin O.Boukiou.

SUMMARY**QUALITATIVE MAPPING OF SOIL SUSCEPTIBILITY TO WATER EROSION**

The study includes an analysis of key natural factors causing the phenomenon of water erosion in a watershed of western Algeria. The methodology is based on the standard technique of digital mapping since the acquisition and processing of satellite images and remote sensing data to the use of the GIS tool (Geographical Information System). The parameters to be estimated are related to environmental conditions: climate, soil, topography, land cover. However, the crossing of these factors by qualitative rules chosen allowed us to develop a map depicting four multifactorial vulnerability to water erosion classes: low (27 %), medium (36 %), high (23 %) and very high (14 %). High-risk areas of erosion occur in fragile lands in steep and / or undergoing a very extensive agriculture where the soil cover is little protection. The results of this study will be used to prioritize and select areas particularly susceptible to soil erosion to decide the various anti-erosion facilities expected.

Key- words

Water erosion, erosion factors, erodibility, mapping, GIS, remote sensing, vulnerability, O.Boukiou basin.

RESUMEN**CARTOGRAFÍA CUALITATIVA DE LA SENSIBILIDAD DEL SUELO A LA EROSIÓN HÍDRICA:****Caso de la cuenca vertiente oued Boukiou (Noroeste de Argelia)**

El estudio consiste en un análisis de los principales factores naturales que influyen el fenómeno de la erosión hídrica de los suelos en una de las cuencas vertientes del Oeste argelino. La metodología se basa en la técnica usual de cartografía numérica desde la adquisición y el tratamiento de imágenes satelitales y de datos de la teledetección hasta su cruzamiento con otros datos geográficos en la herramienta SIG (sistema de información geográfica). Los parámetros que se deben estimar son relacionados a las condiciones del medio: suelo, relieve, uso del suelo. Así, el cruzamiento de estos factores según reglas cualitativas elegidas nos permitió elaborar un mapa que describe cuatro clases de vulnerabilidad multifactorial de los suelos a la erosión hídrica: baja (27%), media (36%) fuerte (23%) y muy fuerte (14%). Las zonas muy vulnerables a la erosión se manifiestan en los suelos y substratos frágiles con pendientes fuertes y/o que sufren una agricultura muy extensiva donde la cubierta vegetal es poco protectora. Los resultados de este estudio servirán para jerarquizar y seleccionar perímetros particularmente sensibles a la erosión de los suelos para decidir de los diferentes acondicionamientos anti-erosivos para prever.

Palabras clave

Erosión hídrica, factores de erosión, erodabilidad, cartografía, SIG, tratamiento de imágenes, vulnerabilidad, cuenca O.Boukiou.

Le nord de l'Algérie où règne un climat méditerranéen semi-aride, est particulièrement affecté par l'érosion hydrique. Ceci est dû à de longues périodes sèches suivies d'orages avec de violentes chutes de pluies érosives, tombant sur des pentes raides aux sols fragiles (roches tendres, couvert végétal dégradé). Les pratiques culturales inappropriées, la déforestation, le surpâturage et les activités anthropiques sont autant de causes qui accentuent l'érosion des sols au Maghreb. Le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural estime que 14 millions d'hectares de zones de montagne au nord (soit 6 % du territoire national) sont touchés par l'érosion hydrique, 32 millions d'hectares en zones steppiques (soit 13 % de la surface globale du pays) sont directement affectés et/ou menacés par la désertification et 4,1 millions d'hectares de forêts (environ 2 %) soumises aux menaces des effets des changements climatiques (Mostephaoui *et al.*, 2013).

L'érosion constitue un grave problème environnemental, agricole et social qui affecte et menace d'immenses espaces de notre pays. Parmi les conséquences les plus remarquables, on note la baisse de la fertilité des sols agricoles, la pollution des eaux, une aggravation des coulées boueuses sur les zones urbaines, l'ensablement des barrages et une désertification du milieu naturel (FAO, 1980). Le phénomène se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg (Le Bissonnais *et al.*, 2004). L'un des sous bassins du nord ouest algérien sous climat semi-aride, à savoir l'oued Boukiou, connaît les effets de fortes érosions avec toutes ses formes et ses aspects (en nappe, en rigole et en ravinement). Le bassin a été ciblé afin de localiser et d'identifier les zones sensibles à l'érosion en fonction de l'influence d'un certain nombre de facteurs déterminants. Ceux-ci font maintenant l'objet d'un consensus entre plusieurs auteurs et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Mazour, 2004; Morsli *et al.*, 2004). Depuis les années 1990 (Bonn, 1998; El. Garouani *et al.*, 2008), l'intérêt de cartographier les risques potentiels des sols à l'érosion sur de grandes étendues est devenu très répandu. L'exécution des mesures efficaces de conservation de sol doit d'abord être précédée par une identification et une évaluation dans l'espace du risque d'érosion (Moussa *et al.*, 2002; Souchère *et al.*, 2005).

Notre travail s'inscrit dans ce contexte et nous proposons une approche cartographique qui porte sur l'intégration dans un SIG de trois facteurs influençant l'érosion hydrique tels que la pente, la nature des matériaux affleurant et le couvert végétal. Ainsi, une évaluation de l'érosion qualitative est établie grâce à divers croisements des cartes thématiques entre elles. Cette étude pourrait constituer un document de référence dans les aménagements à prévoir pour le bassin-versant oued Boukiou.

ZONE D'ÉTUDE

Le bassin-versant oued Boukiou se situe au nord ouest algérien, entre les longitudes 1° 29' 41" W et 1° 43' 32" W et les latitudes 34° 59' 52" N et 35° 6' 42" N. De forme allongée, il s'étend sur une superficie de 116 km² pour un périmètre de 66 km (*figure 1*). Il est limité à l'Ouest par les monts des traras, au Nord par les montagnes de Djebel dhareddis, au Sud-ouest par les reliefs du Djebel Fellaoucene qui culminent à 1200 m., tandis qu'à l'Est des plaines basses entourent le bassin à son exutoire vers l'oued Tafna. Son réseau hydrographique est bien développé, témoignant d'une densité de drainage importante égale à 2,97 km⁻¹, ce qui justifie l'existence des pentes fortes et des affleurements superficiels moins perméables, favorisant les grandes exportations des terres résultant du ruissellement. Le bassin présente aussi un caractère montagneux avec des altitudes qui varient entre 100 m et 1250 m. Il montre une diversité de reliefs, avec des formes structurales, des ravins et des formes d'accumulation représentées par les terrasses alluviales. Affluent rive gauche de la Tafna, l'oued Boukiou est long de 21 km. Il prend sa source sur les hauteurs d'ouled Chaabane en amont d'Ain kebira non loin de Nedroma à 855 m d'altitude. Le climat local est de type semi-aride, humide et froid en hiver et chaud et sec en été. Il est caractérisé par de forts contrastes saisonniers avec des pluies brutales et concentrées, la pluviométrie moyenne interannuelle est de 266 mm (période : 1985/86 - 2005/06). Les mois les plus pluvieux sont novembre, janvier, février et mars où l'on a enregistré des pluies maximales journalières variant entre 30 et 85 mm. Du point de vue géologique à l'Ouest, un substrat rigide de roches anciennes de Dj. Fellaoucène est caractérisé par des formations schisto- quartziques très compactes du Dévonien. Par ailleurs, on rencontre à l'Est des formations du miocène inférieur et moyen avec une alternance de poudingues formés d'éléments calcaires dolomitiques à ciment calcaréogréseux et des séries argilo-marneuses au sein desquelles s'intercalent des bancs décimétriques de grès ferrugineux friables (Bouanani, 2004). Concernant les types d'occupation du sol, les plus représentatifs du bassin-versant sont : maquis et broussaille, céréaliculture et parcours, forêt.

A l'instar des bassins du nord du Maghreb caractérisés par un climat semi-aride, le phénomène d'érosion se manifeste sur le bassin-versant d'O. Boukiou selon différentes formes. Pour donner un ordre de grandeur des impacts de l'érosion sur les sols, on cite qu'en Algérie entre 1985 et 1995, 60 % des banquettes n'ont jamais été entretenues et sont ravinées ou presque effacées (Roose *et al.*, 2012). Dans le bassin de l'Isser voisin de celui de Boukiou, 75 % des gabions (murs de soutènements en casier remplis de pierres) construits ont été affouillés ou emportés par les eaux de pluie (Mazour, 2004). Dans le bassin d'étude, le ravinement et les glissements de terrain sont fréquents et marquent profondément les paysages médi-

terraneens (badlands, coulées boueuses et envasement des barrages). Quant à l'érosion en nappe qui se traduit par une diminution de la fertilité, elle reste faible au Maghreb (1 à 20 t/ha/an) (Roose et Barthes, 2006).

DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

Différents modèles empiriques (quantitatif et qualitatif) ont été adaptés pour prédire, caractériser et comprendre le phénomène de l'érosion hydrique et mettre en évidence les facteurs qui entrent en jeu tout le long de ce processus. La méthodologie entreprise vise à exploiter des données satellitaires, topographiques, géologiques et climatiques pour la restitution et la cartographie des zones exposées à l'érosion hydrique après les avoir intégrées et analysées dans un environnement SIG. Les résultats de cette approche donneront un aperçu pour identifier et interpréter des formes d'érosion qui se sont manifestées sur de grandes surfaces dans le bassin, en relation avec les degrés de vulnérabilité des sols. L'acquisition des données a nécessité une approche bibliographique et des connaissances de terrain. Après traitement, il a été possible d'en réaliser une combinaison additive multisources dans un SIG (Aké et al., 2012).

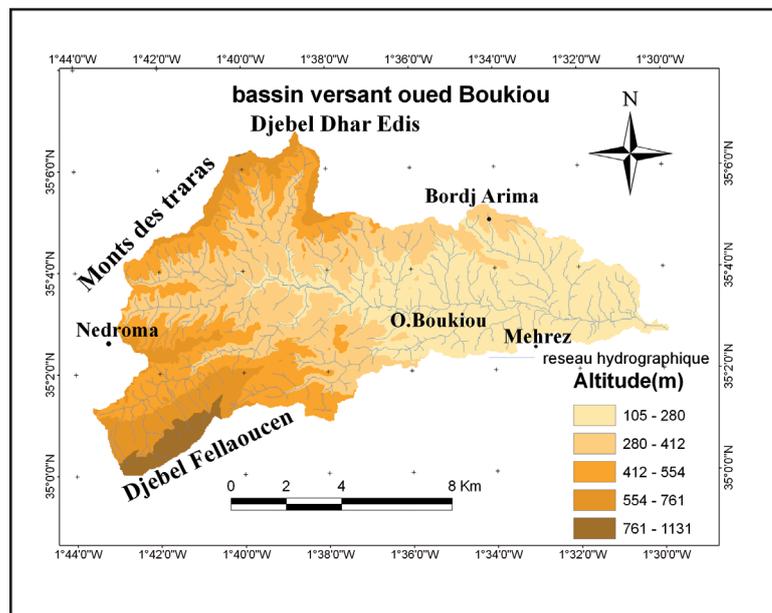
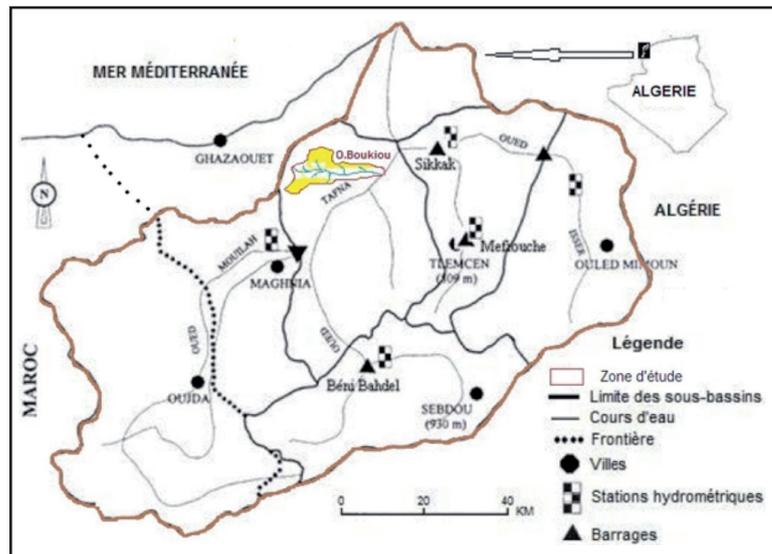
Acquisition et traitement des données

Le matériel utilisé est composé de données cartographiques et d'images satellitaires. Les images satellitaires sont de deux types :

- L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de coordonnées N35W1, du 11 octobre 2000, du satellite TERRA, obtenue sur le site <ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>. Son traitement a permis d'établir un modèle numérique d'altitude (MNA) de résolution 90 m, la carte des pentes et des ombrages, ainsi que le réseau hydrographique caractérisant le bassin-versant.
- L'image Landsat ETM + 2000, scène 280-763 du 11 mars 2006, fournie par le site <http://www.glcf.umd.edu>. Son exploitation a abouti à la caractérisation de l'occupation du sol.
- Une carte géologique au 1 : 100 000 de la région fournie par l'agence nationale de l'aménagement du territoire (ANAT), numérisée et géopositionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert de la zone nord de l'Algérie. Cette carte

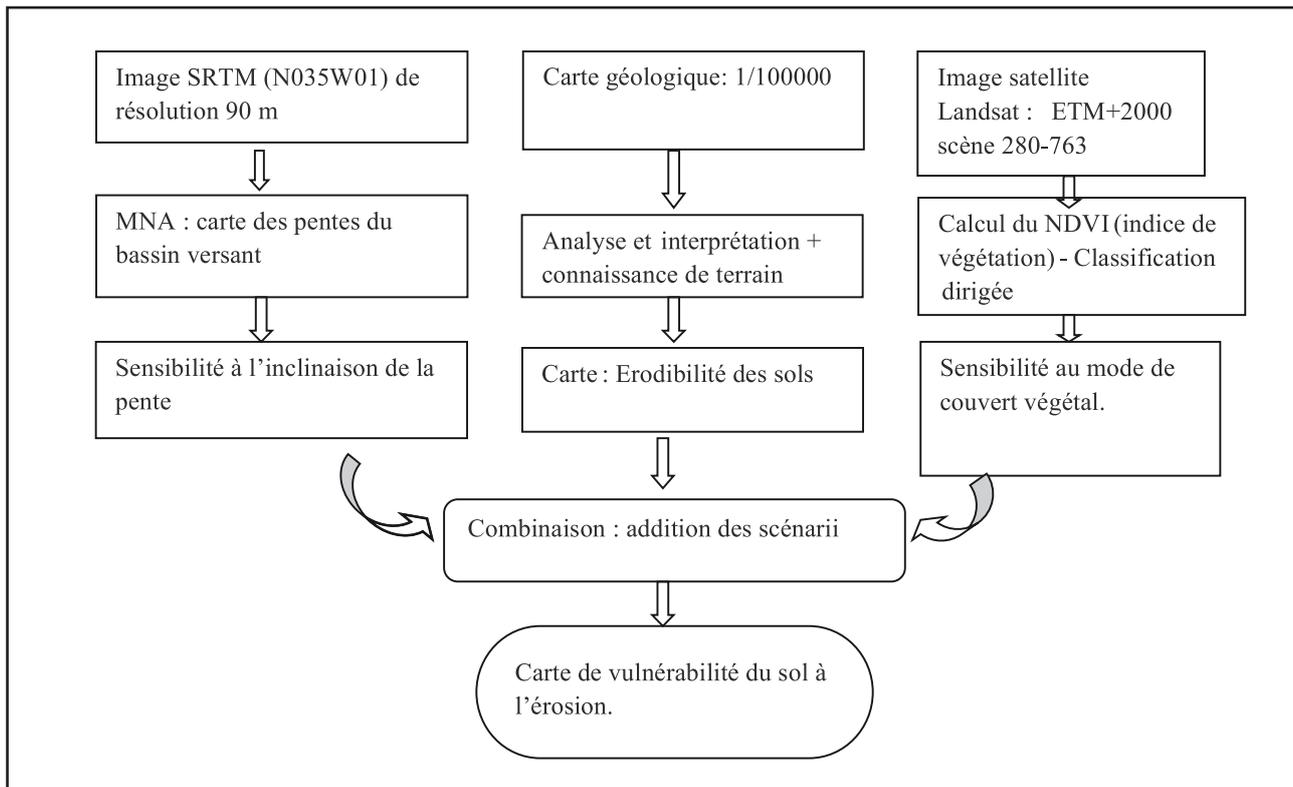
Figure 1- Localisation de la région d'étude.

Figure 1- Localization of study area.



permettra d'en déduire les unités lithologiques rencontrées dans le bassin-versant.

Le traitement des données a été effectué avec un SIG (Arc Gis 10.1). A l'issue de ce traitement, une base des données physiques de la zone d'étude a été constituée pour élaborer des cartes thématiques (couches d'information spatialisées sur chacun des paramètres de l'érosion) et cartographier la vulnérabilité multifactorielle des sols à l'érosion hydrique.

Figure 2 - Etapes de cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique.**Figure 2** - cartography steps of soil vulnerability to water erosion.

Cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique

La méthode de cartographie réalisée dans cet article s'inspire d'un modèle qualitatif de type système expert, comme MESALES, le modèle d'évaluation spatiale de l'aléa d'érosion des sols (Le Bissonnais *et al.*, 2004), c'est-à-dire un modèle utilisant un croisement de paramètres déterminants dans l'érosion sous forme de combinaisons logiques à savoir la résistance des matériaux affleurements, la pente topographique, l'occupation des sols, dont le poids doit être pondéré (Bou Kheir *et al.*, 2001) à partir des connaissances actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs. Le rôle unanimement reconnu de la végétation contre l'érosion hydrique nous a conduits à retenir un coefficient de pondération plus élevé pour le couvert végétal. La démarche consiste à attribuer à chaque facteur d'érosion des classes codées de façon à traduire l'influence de chacun dans l'estimation de la vulnérabilité à l'échelle spatiale. La classification des différents facteurs en fonction de leur implication dans l'occurrence du phénomène a été établie en tenant compte des observations de terrain et de connaissances bibliographiques (Bou Kheir *et al.*, 2001; N'dri *et al.*, 2008). L'intégration des données cartographiques et descriptives des facteurs

qui influencent le processus d'érosion hydrique dans un SIG. Il est important de géoréférencer (selon la projection conique conforme de LAMBERT : zone nord WGS 84) et de caler (en fonction du système de coordonnées de référence de la zone) les données cartographiques, afin d'effectuer le croisement spatial adéquat des facteurs de l'érosion. Enfin, la production de la carte synthétique de répartition des degrés de sensibilité à l'érosion est effectuée à partir de la combinaison des cartes thématiques précédentes, en appliquant l'approche qualitative (de type système expert).

La méthodologie est décrite selon l'organigramme présenté dans la *figure 2*.

Détermination des paramètres d'érosion

Facteur d'érodibilité du sol (K)

L'érodibilité d'un sol dépend de sa résistance à deux sources d'énergie, la battance des gouttes de la pluie à la surface du sol et l'entaille du ruissellement entre les mottes dans les griffes ou les rigoles. Selon Wischmeier *et al.* (1971), le facteur K dépend de plusieurs propriétés du sol (texture du sol, teneur en matières organiques, structure de sol et perméabilité). Faute de mesures

directes de ces paramètres physiques, la détermination de l'indice K (figure 3) s'est faite en se basant sur notre connaissance du terrain et sur l'analyse de la carte géologique disponible. Ceci nous a permis de distinguer quatre classes de matériaux affleurant (très résistants, assez résistants, moyennement résistants et vulnérables) (tableau 1).

Le facteur K varie de 0,6 pour les affleurements friables rencontrés surtout en aval à 0,08 pour les sols les plus résistants et les plus stables fréquents en amont du bassin. Les valeurs de l'érodibilité trouvées indiquent une nette fragilité des sols augmentant les potentialités érosives du bassin-versant.

Facteur topographique

Il est bien entendu que plus la pente est raide, plus la quantité d'eau ruisselée ainsi que sa force érosive seront importantes. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation de l'énergie érosive de la lame d'eau ruisselée. La fusion de petits champs pour en faire de plus grands a généralement comme conséquence d'allonger les

pentés, d'augmenter les risques d'érosion par l'augmentation de la vitesse de l'eau, occasionnant un plus grand lessivage (capacité de transport des sédiments) (El. Garouani *et al.*, 2003). La longueur de la pente a des effets plus incertains (Roose, 1994), il n'en a pas été tenu compte dans cette étude.

Le modèle numérique du terrain d'étude provenant de l'extraction des courbes de niveau des cartes topographiques par l'intermédiaire du logiciel Arc Gis nous a permis d'établir la carte des pentes d'une façon précise (figure 4). Sur la figure, les pentes les plus abruptes très fortes à fortes se concentrent surtout dans la partie amont du bassin-versant caractérisée par un relief montagneux où la pente dépasse 20°. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles à très faibles (< 8°) sont réparties beaucoup plus en aval et sur l'ensemble du bassin. Nous avons ordonné et cartographié les pentes en quatre classes.

Facteur de la couverture végétale et des pratiques culturales (C)

Le couvert végétal est, après la topographie, le second facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols. Il est défini comme un ratio de la perte en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à la perte en sol correspondante sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978). Le couvert des principales cultures du Maghreb réduit l'érosion de 20 à 60 % en fonction de l'intensité du couvert en saison des pluies et des techniques culturales (Roose *et al.*, 2012).

A l'aide du logiciel ArcGis, la combinaison de plusieurs bandes spectrales de l'image Landsat ETM + 2000 a permis d'extraire la carte du NDVI (Normalised-DifferenceVegetation Index), l'indicateur de croissance de la végétation le plus largement utilisé en télédétection. Ainsi, en s'inspirant de méthodes avancées par beaucoup d'auteurs qui ont travaillé sur des régions à climat méditerranéen et en adoptant des corrélations appropriées entre le NDVI et les propriétés de la végétation (Van Der Knijff *et al.*, 2000; Roose *et al.*, 2012), des valeurs de (C) à dire d'expert ont été attribuées à différents types de végétation de notre bassin-versant, tout

Figure 3 - Sensibilité des sols à l'érosion en fonction de l'érodibilité.

Figure 3 - Soil erosion sensitivity as a function of erodibility.

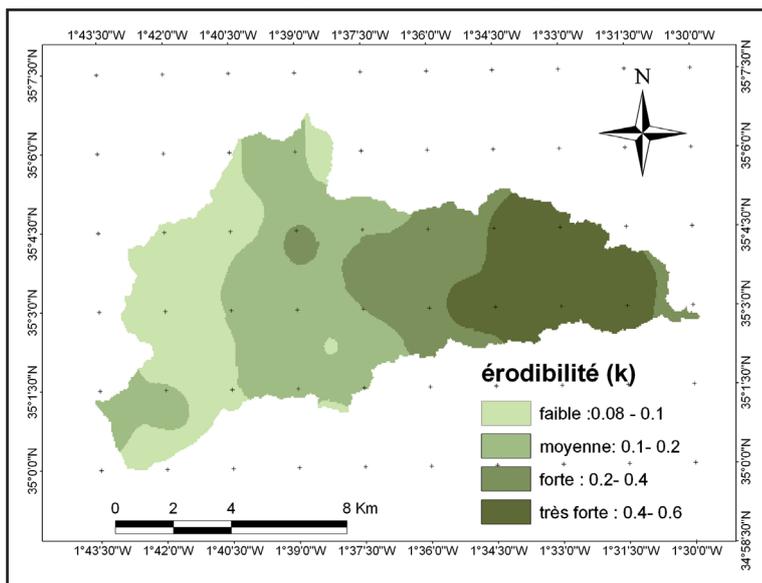


Tableau 1 - Valeurs de l'érodibilité K en fonction de la nature de sol.

Table 1 - Values of K erodibility as a function of soil nature.

Nature des sols	Erodibilité	Valeurs de K
Lithosols caillouteux - sols ferrallitiques résiduels	Très résistants	K = 0,08 - 0,1
Sols bruns calcaires - sols peu évolués, sols rouges ferrallitiques méditerranéens	Assez résistants	K = 0,1 - 0,2
Marnes sableuses et alluvions limoneuses	Moyennement résistants	K = 0,2 - 0,4
Vertisols sodiques (alternance de marnes et grès)	Vulnérables	K = 0,4 - 0,6

en tenant compte des observations de terrain (figure 5). Plusieurs classes de couverture végétale ont ainsi été définies : les terrains nus (C = 0,8), terrains cultivés (C = 0,4), végétation éparses ou de densité moyenne (C = 0,25), végétation très dense (C = 0,01). Chaque classe est assignée à une valeur entre 1 et 4, 1 étant affecté à la classe la moins vulnérable et 4 à la classe la plus vulnérable.

Le tableau 2 suivant résume les caractéristiques des classes pour chacun des trois facteurs principaux engendrant le phénomène d'érosion :

Élaboration de la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique :

Le croisement des différentes cartes thématiques a été effectué en appliquant des coefficients de pondération inspirés de la connaissance du terrain et des principes généraux utilisés par Le Bissonnais (Le Bissonnais *et al.*, 2004) : 1 (pour l'érodibilité des terrains), 2 (pour la topographie), 3 (pour le couvert végétal). Pour réaliser la carte de vulnérabilité multifactorielle à l'érosion du bassin, on détermine tout d'abord pour chaque secteur donné des indices de vulnérabilité (I) tenant compte de l'effet des trois paramètres, par la formule suivante :

$$I = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^3 p_i * S_j \quad (1)$$

Où : p_i représente la pondération du paramètre i (sol, pente, végétation)
 S_j est la contribution de la classe j pour chacun des paramètres i

Ainsi, pour la classe 123 qui représente des lithosols caillouteux affleurant sur une pente variant de 8 à 15° à terrains cultivés, l'indice est de 14 (1*1+2*2+3*3). Quatre classes de vulnérabilité à l'érosion ont été tirées : faible (indices 6 à 14), moyenne (indices 15 à 17), forte (indices 18 à 20) et très forte (21 à 24) (figure 6).

Ainsi, les zones à forte et très forte vulnérabilité couvrent en moyenne 37 % du bassin-versant et se concentrent particulièrement en amont, alors que les valeurs faibles et moyennes (63 %) s'observent en aval, principalement le long de l'oued. Ceci est expliqué essentiellement par :

- En amont, la forte dispersion des formations végétales (forêt claire, céréaliculture), la dominance de sols peu évolués où les affleurements sont tendres avec une érodibilité relativement importante ($K > 0,2$) et situés sur des pentes assez raides ($> 20^\circ$)

Figure 4 - Effet de l'inclinaison de la pente sur l'érosion hydrique.

Figure 4 - Effect of gradient slope on water erosion.

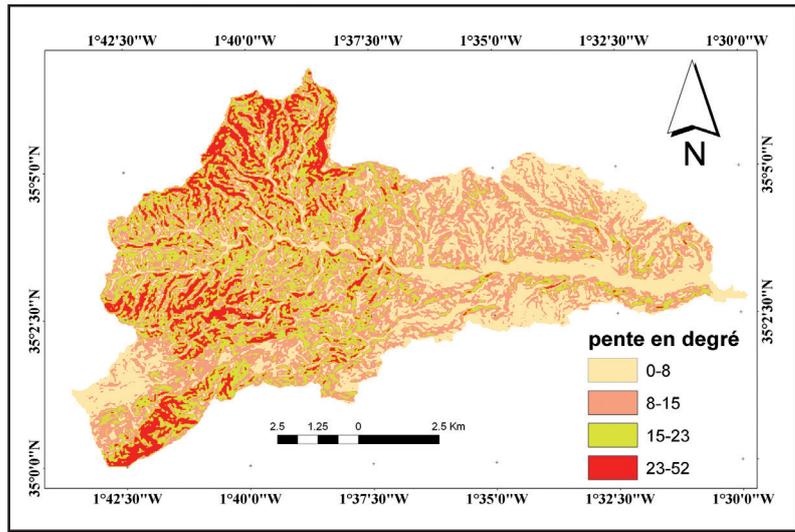
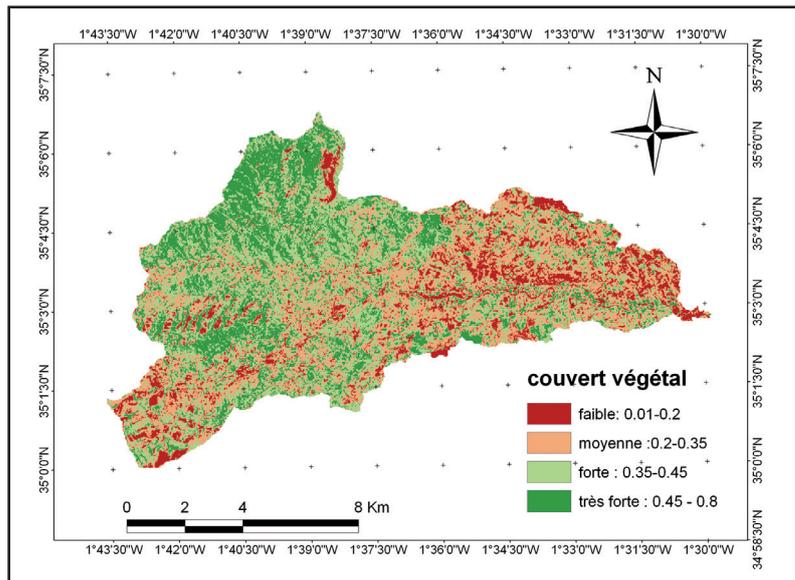


Figure 5 - Influence du couvert végétal sur l'érosion hydrique des sols.

Figure 5 - Influence of the subsoil (vegetation) on water erosion.



accentuent l'érosion et les pertes en sols. En outre, cette région se trouve presque démunie de couvert végétal protecteur (arbustes dispersés, strate herbacée clairsemée) à cause du surpâturage laissant parfois place à une agriculture excessive.

- En aval, malgré les altitudes basses et la présence d'un couvert végétal relativement protecteur ($C < 0,2$), la présence de sols cultivés très érodables ($K > 0,55$) contribue davantage à accentuer les risques d'érosion des sols avec une sensibilité

Tableau 2 - Classification des facteurs de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant oued Boukiou.**Table 2** - Classification of factors of water erosion on soils in the wadi catchment Boukiou.

Facteur d'érosion	Coefficient de pondération	Classe	Vulnérabilité à l'érosion hydrique	Code
Typologie des sols	1	Sithosols caillouteux : $K = 0,08 - 0,1$ sols ferrallitiques résiduels	Faible	1
		Sols bruns calcaires : $K = 0,1 - 0,2$ sols peu évolués, sols rouge fersiallitiques méditerranéens	Moyenne	2
		Marnes sableuses et alluvions limoneuses : $K = 0,2 - 0,4$	Forte	3
		Vertisols sodiques : $K = 0,4 - 0,6$	Très Forte	4
Pentes en degré	2	0 - 8	Faible	1
		8 - 15	Moyenne	2
		15 - 23	Forte	3
		23 - 52	Très Forte	4
Couvert végétal	3	Végétation très dense : ($C = 0,01 - 0,2$) maquis et reboisement	Faible	1
		Végétation éparses ou de densité moyenne ($C = 0,2 - 0,35$)	Moyenne	2
		Cultures et/ou jachère terrains cultivés ($C = 0,4$)	Forte	3
		Terrains nus, parcours ($C = 0,8$)	Très Forte	4

moyenne à l'érosion affectant 36 % du bassin. A proximité de l'oued le long des rives où les pentes deviennent douces, une végétation représentée par des cultures abondamment paillées, des assolements céréaliers et des fourrages, contribuent à réduire les pertes en terres et à diminuer ainsi la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique.

En vue de mieux orienter la priorité d'intervention par une localisation plus précise des zones les plus sensibles à l'érosion à l'échelle du bassin-versant, on a présenté une deuxième carte plus lissée (figure 7) schématisant les zones d'intervention prioritaires en fonction des risques érosifs les plus potentiels.

Validation des résultats

Diverses méthodes ont été utilisées pour valider les résultats de ce type d'approche, on peut citer à titre d'exemple : mesure d'accumulation des sédiments dans une retenue, mesure par traceurs radio actifs et susceptibilité magnétique des sédiments (Ait Fora, 1995) ou encore confrontation directe avec la réalité de terrain selon des critères visuels adaptés (Bou Kheir, 2001). Dans cette perspective, nous avons adopté cette dernière technique. Faute de travail expérimental difficile à réaliser sur terrain en raison de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques sur de grandes étendues du bassin, on a enregistré ces changements :

- *Sensibilité faible* : secteurs où les racines d'arbustes sont déchaussées de moins de 5 cm et où les ravines ont moins de 5 cm de profondeur et une largeur de 10 cm.

- *Sensibilité moyenne* : racines d'arbres déchaussées de 5 à 10 cm et buttes de sol résiduelles de 15 cm de hauteur avec des ravines de 10 cm de profondeur et 20 cm de largeur.

- *Sensibilité forte* : racines d'arbres déchaussées de plus de 15 à 20 cm, pédicules d'érosion (colonnes de terre protégées par des pierres) de plus de 15 cm de hauteur et ravines dépassant 30 cm de profondeur.

- *Sensibilité très forte* : racines d'arbres déchaussées de plus de 20 cm, pédicules d'érosion (colonnes de terre protégées par des pierres) de plus de 20 cm de hauteur, ravines de plus de 50 cm de profondeur s'étalant sur des longueurs de plus de 10 m. Selon le degré de dégradation causée aux types de sols. Le taux de bonne concordance entre la carte ainsi produite et la réalité du terrain avoisine 80 %.

CONCLUSION

L'approche adoptée a permis une cartographie qualitative de la sensibilité des terrains à l'érosion dans la région d'étude. Les résultats de cette approche montrent que les sols du bassin-versant oued Boukiou subissent l'effet de plusieurs facteurs favori-

Figure 6 - Carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique du bassin oued Boukiou.
Figure 6 - Vulnerability map for water erosion of the river basin Boukiou.

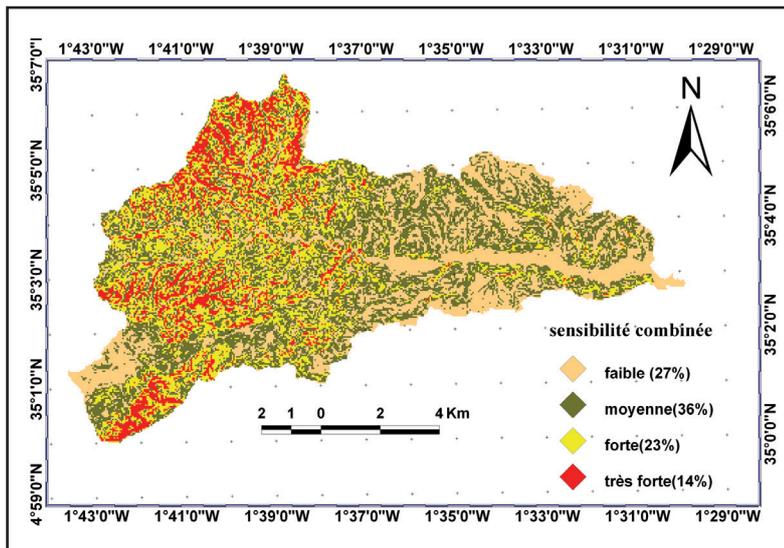
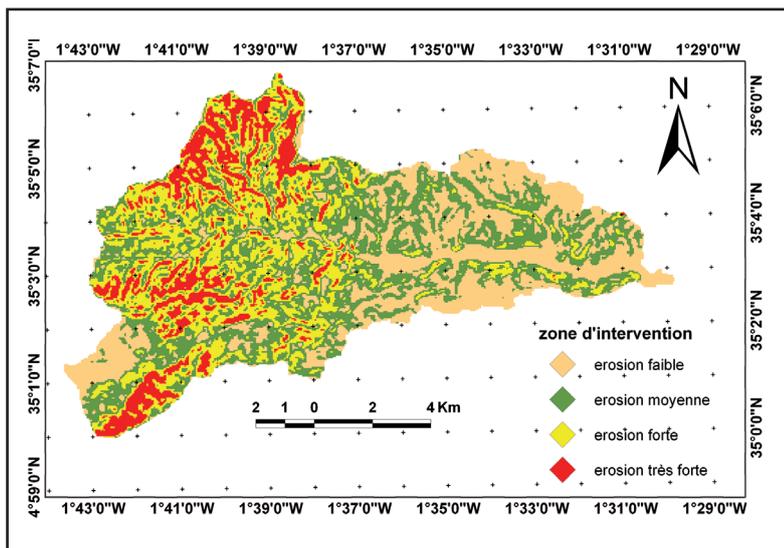


Figure 7 - Carte des zones d'intervention prioritaire du bassin oued Boukiou.
Figure 7 - Priority intervention area of the river basin Boukiou.



sant le phénomène d'érosion à savoir l'importance des pentes, le faible couvert végétal et l'érodibilité des sols. Ils indiquent également que le bassin est soumis à une érosion forte et moyenne touchant plus de 70 % des sols du territoire. En effet, dans ces zones fortement exposées, les facteurs d'érosion se conjuguent entre eux : des pentes fortes (45 % de la surface du bassin présente une pente dépassant 15°), une dégradation alarmante du couvert végétal suite à la sécheresse qui sévit ces trente dernières années sur le Maghreb et des sols fortement érodables.

Pour affiner ces résultats, il sera nécessaire d'actualiser les données disponibles d'améliorer les procédures de combinaisons logiques qui ont été mises en œuvre (hiérarchisation des paramètres, etc.) et d'intégrer des paramètres complémentaires (l'érosivité des pluies, l'infiltrabilité des sols, la battance...). Cette étude est un premier essai pour produire une carte de vulnérabilité à l'érosion des sols pour l'ensemble de la zone d'étude et pourrait constituer un document de référence pour tout aménagement proposé.

Enfin, des mesures sont à proposer en vue de limiter l'impact de l'érosion et du ruissellement sur le bassin. Les solutions sont basées sur des techniques de gestions appropriées et des méthodes de pratiques culturales, tel que le déchaumage, le binage, l'écroûtage, la mise en place et l'entretien de bandes enherbées, de haies, de talus, de fascines (fagots de branchages permettant de limiter le ruissellement), l'interdiction des pratiques agricoles sur les pentes de plus de 15°, la protection de la forêt, le reboisement des zones dénudées, l'installation des murs de soutènement et la construction de terrasses qui conservent les terrains pour l'agriculture (Druais, 2009).

BIBLIOGRAPHIE

- Ait Fora A., 1995 - Modélisation spatiale de l'érosion hydrique dans un bassin du Rif marocain : validation de l'approche géomatique par la sédimentologie, les traceurs radioactifs et la susceptibilité magnétique des sédiments. Thèse de Ph.D. en télédétection, université de Sherbrooke, Québec, Canada, 251 p.
- Ake G.E., Kouadio B.H., Adja M.G., Ettien J.B., Effebi K.R. et Biémi J., 2012- Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud- Est de la Côte d'Ivoire). Physio- Géo, vol. VI, pp. 23-42.
- Arnoldus H.M.J., 1980 - An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In : De Boodt M, Gabriels D, eds. Assessment of erosion. New York : John Wiley et Sons : 127- 32.
- Bonn F., 1998 - La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. Sécheresse, vol. 9, n° 3, pp. 185-192.
- Bouanani A., 2004 - Hydrologie, Transport solide et modélisation : étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW - Algérie). Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen, 250 p., 81 Fig.
- Bou Kheir R., Girard M.C., Shaban A., Khawle M., Faour G. et Darwish T., 2001 - Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. Télédétection, vol. 2, n° 2, pp. 79-90.
- Desmet P.J.J. et Govers, G., 1996 - A GIS procedure for automatically calcu-

- lating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of soil and water conservation* 51, pp. 427-433.
- Druais J., 2009 - Caractérisation de l'érosion et du ruissellement des territoires aval de la Chalaronne. Propositions de mesures de gestion. Mémoire de fin d'études d'ingénieur agronome, Syndicat des Rivières des Territoires de Chalaronne, 84 p.
- El. Garouani A., Merzouk A., Jabrane R., Boussema M.R., 2003 - Cartographie de l'érosion des sols dans le bassin-versant de l'Oued Jemâa (Pré- rif, Maroc). *Géomaghreb*, Vol. 1, n° 1, pp. 39- 46.
- El. Garouani A., H. Chen, L. Lewis, A. Tribak ET M. Abahrour, 2008 - Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du sig Idrisi au nord- est du Maroc. *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 3, pp. 193-201.
- FAO, 1980 - Conservation des ressources naturelles en zone arides et semi-arides. *Cahiers FAO : conservation des sols* 3 : 135 p.
- Heusch B., 1970 - Estimation et contrôle de l'érosion hydrique, *Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc; special*, pp. 41-54.
- Kalman R., 1970 - Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie). *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, tome 12, Rabat, pp. 177- 287.
- Le Bissonnais Y., N. Dubreuil, J. Daroussin et M. Gorce, 2004 - Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne", *Étude et Gestion des Sols*, vol. 11, 3, pp. 307-321.
- Mazour M., 2004 - Étude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin-versant de l'Isser - Tlemcen, Thèse de Doctorat D'État, Université de Tlemcen, 184, 131 p.
- Morsli B., Mazour M., Mededjel N. et Roose E., 2004 - Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie, *Sécheresse*, vol. 15, n° 1, pp. 96-104.
- Mostephaoui T., Merdas S., Sakaa B., Hanafi M. T. et Benazzouz M.T., 2013 - Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin-versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie. *Journal Algérien des Régions Arides*, Numéro Spécial 2013, pp. 131- 147.
- Moussa R., Voltz M. et Andrieux P., 2002 - Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during floods events. *Hydrological Processes*, vol. 16, pp. 393-412.
- N'dri B.E., N'go Y.A., Kadio H.N., Ouattara A., Touré B. et Biémi J., 2008 - Effect of soil slope and cover on runoff and rate soil loss from experimental plots in area of Attécoubé. *European Journal of Scientific Research*, vol. 21, n° 3, pp. 459-470.
- Renard K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., et Yoder, D.C., 1991 - Predicting Soil Erosion by Water, A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US. Department of Agriculture, Washington. *Agriculture Handbook*.
- Roose É., 1994 - Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *FAO Soils Bulletin*, vol. 70, Rome, 420 p.
- Roose É. et Barthès B., 2006 - Soil carbon erosion and its selectivity at the plot scale in tropical and Mediterranean regions. *In : Soil erosion and carbon dynamics*, É. Roose, R. Lal, C. Feller, B. Barthès et B.A. Steward édit., Édit. CRC Press, *Advances in Soil Science*, vol. 15, pp. 55-72.
- Roose É, 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 - Géographie Physique et Environnement*, 2012, volume VI.
- Souchère V., Cerdan O., Dubreuil N., Le Bissonnais Y. et King, C., 2005 - Modelling the impact of agri environmental scenarios on overland flow in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena*, vol. 61, pp. 229-240.
- Van Der Knijff J.M., Jones R.J.A et Montanarella L., 2000 - Estimation du risque d'érosion en Italie. *European Soil Bureau* : 1-45.
- Wischmeier W. H., Johnson C. B. et Cross B. V., 1971 - A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites - *Journal of soil and water conservation* - vol 26, pp. 189-193.
- Wischmeier W.H. et Smith D.D, 1978 - Predicting Rainfall Erosion Losses : A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., *Agricultural Handbook* n° 537, 58 p.