

Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de l'Oued Zgane (Moyen Atlas tabulaire, Maroc)

Modelling and mapping of water erosion risk by application of the GIS and PAP/RAC Guidelines in the watershed of Oued Zgane (Middle Atlas Morocco)

Habiba OUSMANA*, Abdellah EL HMAIDI, Ali ESSAHLAOUI, Hachem BEKRI & Abdelhadi EL OUALI

Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Equipe Sciences de l'Eau et Ingénierie de l'Environnement, BP 11201, Zitoune, Meknès, Maroc, * (habiba.ousmana@gmail.com)

Résumé. La présente étude tente de cartographier les zones vulnérables à l'érosion hydrique en se basant sur la méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire/ Centre d'Activités Régionales) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) au niveau du bassin versant de l'Oued Zgane. Ce dernier, abritant les lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh, est localisé au Nord du Moyen Atlas central marocain dans le causse tabulaire. L'approche prédictive, première phase de la méthode PAP/CAR, fournit une carte synthétique de la répartition des états érosifs, avec 19,48% de la surface totale du bassin versant soumis à un degré d'érosion élevé et très élevé. La cartographie descriptive des diverses formes d'érosion, seconde phase de PAP/CAR, montre que 84,7% de la superficie du bassin est connue par les rigoles, ravinements superficiels et l'érosion en nappe. La superposition des résultats des approches prédictives et descriptives, 3^{ème} phase de PAP/CAR, donne la carte consolidée PAP/CAR qui montre des pertes de sol dans la zone d'étude proportionnelles à l'augmentation des principaux facteurs d'érosion hydrique. Cette carte consolidée d'érosion indique des pertes maximales de sol en relation avec des ravins moyennement profonds situés au Nord-Est du bassin versant. La présence de ces formes peut être liée à la pente forte, à l'agressivité des pluies et à l'absence de la couverture végétale.

Mots-clés : Erosion hydrique, méthode PAP/CAR, SIG, bassin versant, Oued Zgane, Moyen Atlas tabulaire.

Abstract. The aim of this study was to map area vulnerable to water erosion based on the The Priority Actions Programme/Regional Activity Centre (PAP/RAC) method combined with Geographic Information Systems (GIS) of the Oued Zgane Watershed, this watershed sheltering Ifrah lakes and Iffer Afourgagh, is located in the north of the Middle Atlas, Morocco, in the tabular Middle Atlas (Middle Atlas cause). The predictive approach, the first step of the PAP / RAC method, provides a synthetic map of the distribution of erosive states, with 19.48% of the total area of the catchment area subject to a high and very high degree of erosion. The descriptive cartography of the various forms of erosion, the second step of PAP / RAC, shows that 84.7% of the basin area is known by the rigids, the superficial gullies and the sheet erosion. The superposition of the results of the predictive and descriptive approaches, 3rd phase of PAP / RAC, carried out the consolidated PAP / RAC map showing soil losses in the study area proportional to the increase of the main factors of water erosion. This consolidated erosion map indicates maximum soil losses in relation to moderately deep ravines located to the northeast of the watershed. The presence of these forms may be related to the steep slope, the aggressiveness of the rains and the lack of vegetation cover.

Keywords: Water erosion, PAP/RAC method, Geographic Information System (GIS), Watershed, Oued Zgane, Tabular Middle Atlas.

Abridged English version

Introduction

Erosion is one of the biggest environmental problems in Mediterranean regions with semi-arid climates. The functionalities of erosion and land use are very diverse because of their essentially topographic, lithological, morphological and climatic

conditions. Land degradation causes enormous problems with very negative socio-economic and environmental consequences. The overcome of this challenge requires a valuable methodology to ensure a sustainable management of natural resources (forests, water, soil, and biodiversity). Several methods and tools have been developed for estimating the water erosion (USLE, RUSLE, LEAM, PAP/RAC,...). The use of remote sensing and

Geographic Information Systems (GIS) has made possible the modeling and spatialization of water erosion at a reasonable cost (Boggs *et al.* 2001; Bou Kheir *et al.* 2001, Pradhan *et al.* 2012, Lee 2004; Bayramin *et al.* 2003, Raissouni *et al.* 2012, Bachaoui *et al.* 2014, Akalai *et al.* 2014).

Geology and geographic situation of study area

The Oued Zgane watershed is located in the north of the central Moroccan of Tabular Middle Atlas, between the coordinates 33°50 and 33°30 latitudes north, 5°06 and 4°37 longitudes west. It is a part of the upstream area of the Sebou watershed. It has an elongated shape and occupies an area of 549.15 Km². Its compactness index of Gravelius Kc is equal to 2.7. It is drained by the Wadi Zgane over a length of 69.38 km. Topographically, the study area is characterized by a significant altitudinal variation, ranging from 561 m to 2051 m on the highest peak. It generally presents a sub-tabular and faulted geological structure (Charriere 1990, Martin 1981, Fedan *et al.* 1989). The lithology consists mainly of dolomitic limestone's of the Lower Jurassic (Lower and medium Lias), which overcome the series consisting of Triassic red shale and basalt. The lower Jurassic consists of carbonate rocks that were deposited on an extended platform (Martin 1981). Smaller outcrops of Eocene and Miocene limestone appear mainly in the catchment of Lake Ifrah (Colo 1961). Quaternary formations, in the form of alluvial cones, are very small (Hinaje *et al.* 2002). The climate of the study area is Mediterranean subhumid with cold winters. The rainy season extends from October through May. The average annual rainfall varies between 600 and 1013 mm/year. The precipitations are characterized by a very strong irregularity. They have varied between a minimum of 558.16 mm (Azzaba) and a maximum of 1063.63 mm (Dayet Hachelaf) (1979-2013). The average temperature is between 3 and 22 °C. The monthly mean temperature is highest in August (22.8 °C) and lowest in January (3.2 °C) (Etebaai 2009).

Material and methods

The methodology followed in this research is the PAP / RAC method. It includes three methodological approaches of mapping, evaluating and estimating water erosion (PAP/CAR 1998). The predictive approach controls erosion from the thematic mapping of the factors (slope, lithology, and/or soil type, land cover and vegetation density). The result of this phase allows to prioritize the study area basin according to the degree of erosion and to have a map of erosive state. The descriptive approach corresponds to the cartography on site of erosion forms and their exposure to erosion. It is particularly interested in the qualitative aspect of water erosion. The approach of integration is the end result of the two previous approaches, by superimposing the map of erosion forms to those of the erosion states. This

approach provides a consolidated synthetical map of water erosion.

Results and discussion

Predictive Approach

Predictive approach is based on the interaction and the interdependence of the major factors of water erosion. In the first step, the erodibility map was generated by combining the slope and lithofacies maps. The density of vegetation and the land use permit secondly to have a map of soil protection while the superposition of the two previous provides a synthetic map of erosion states and therefore the degree of erosion soils. Erosion status map reveals five classes representative of erosion risk. These classes are very low, low, moderate, high and very high. The classes very low and low risk of erosion occupy the majority of the territory (57.27% an area of 315.7 km²), mainly to the South, the South -West of the basin and towards its North-West part. These areas are less rugged characterized by low to moderate slopes, a more or less abundant vegetation cover and moderate to moderate erodibility. High and very high erosion risk classes occupy small areas (19.48%). They are scattered and located along the Oued Zgane and on the left part of Oued Atchane. They are also concentrated downstream at point of confluence the Oued Azghare and Oued Zgane.

Descriptive Approach

The completion of the map of forms of erosion was done by digitizing thanks to the extension of Quantum-GIS that connects to Google satellite, with verifications on ground. This method gives an idea of the different forms of erosion in the study area. The resulting map was codified according to the PAP/RAC guidelines, it shows that the rigids, the superficial gullies and the sheet erosion are the most apparent with a surface area of 73.31% and 11.39% respectively of the total area of the watershed studied. The presence of these two forms of erosion, especially near watercourses, can be explained by the vulnerability of the terrain, the action of rivers and by anthropogenic action. Otherwise, moderately deep and deep ravines (C3 and C4) affect 15.30% of the study area and are located mainly in the eastern part of the watershed.

Integration phase

The consolidated PAP/RAC erosion map is a qualitative map obtained by the combination of the two previous steps. It is used as a complementary result during the predictive phase by the descriptive data of the erosion processes mapped and realized during the second phase. The superposition of the erosive state map data and the Erosion status Map provides a very accurate cartographic product that reflects the reality of the state of soil degradation. It leads to the final mapping product identifying and evaluating both potential erosion (predictive). The

areas of low and moderate erosion risk correspond to erosion forms such as gullies and shallow gullies, and sheet erosion. While forms of erosion in moderately deep, deep ravines coincide with areas of high and very high risk of erosion. The presence of these deep ravines could be related to the steep slope. In general, it can be concluded that the areas mostly affected by risk of erosion are located mainly in the eastern part of the watershed and along the Oued Zgane, Atchane and Azghar where the deep ravines are located. The presence of these forms may be related to the steep slope, the aggressiveness of the rains and the low degree of vegetation cover. The absence of visible erosion on a site protected by a fairly dense vegetation cover coincides with areas where the degree of erodibility is low and the degree of protection is high. The superposition of predictive and descriptive states confirms that the vulnerability of the Oued Zgane watershed to high to very high erosion is mainly in the middle and west of the study area.

Conclusion

The mapping and estimation of potential erosion by the PAP / RAC method based on natural factors (slope, vegetation cover and lithology) made it possible to analyze and understand the problematic of the study area at the risk plan erosive.

This study enabled us to build a multi-source database on the study area and to show the importance and contribution of a geographic information system and remote sensing to the mapping of risk areas for water erosion. The map shows that almost the studied watershed (80.52%) present low to-moderate erodibility and 19.48% with a high and very high erodibility. The descriptive approach has shown that this degradation is manifested by different forms of water erosion. There is a loss of soil in different ways: Those are largely dominated by rills, superficial gullies, and sheet erosion. The superposition of the predictive and descriptive cartography made it possible to show the global tendencies of the superficial evolution of the soils of the watershed. Hence, the coincidence of some very degraded states could be brought out forms of erosion spectacular and other states more stable with minor forms of erosion or even stable areas. In the face of degradation threats to natural resources (forests, water, soil and biodiversity) and watershed infrastructure and consequently to the quality of life of population from an economic and social point of view, it is urgent to intervene to combat erosion in a global and innovative way that will reconcile the growing needs of a growing population and the limited potential of natural resources which are depleted by their over exploitation.

INTRODUCTION

L'érosion est l'une des plus grandes problématiques environnementales dans les régions méditerranéennes à climat semi aride. Les fonctionnalités de l'érosion et l'usage des sols sont très diversifiés en raison de leurs conditions essentiellement topographiques, lithologiques, morphologiques et climatiques. La dégradation des sols cause d'énormes problèmes à retombés socio-économiques et environnementales très négatives. D'un point de vue économique, les pertes sont importantes et sont estimées en milliards de DH. Elles sont dues à la destruction des infrastructures routières et des ouvrages d'art et à la dégradation de la productivité des terrains agricoles. Du côté humain la situation dans le monde rural est catastrophique et très dangereuse. On assiste à un appauvrissement persistant des populations, ce qui provoque leur migration vers les villes ou vers l'étranger. D'un point de vue écologique, on assiste à la dégradation des milieux qui s'exprime par la diminution de la diversité biologique et de la productivité forestière. La résolution de ce problème nécessite une méthodologie convenable pour une gestion durable des ressources naturelles (forêts, eau, sols et biodiversité). Plusieurs méthodes et outils ont été développés pour l'estimation de l'érosion hydrique (USLE, RUSLE, LEAM, PAP/CAR, etc.).

L'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) a rendu possible la modélisation et la spatialisation de l'érosion hydrique à un coût raisonnable (Boggs *et al.* 2001 ; Bou Kheir *et al.* 2001, Pradhan *et al.* 2012, Lee 2004 ; Bayramin *et al.* 2003, Raissouni *et al.* 2012, Bachaoui *et al.* 2014, Akalai *et al.* 2014). L'approche PAP/CAR a été utilisée par plusieurs chercheurs qui ont démontré sa grande utilité pour la cartographie et la modélisation de l'érosion hydrique (Elbouqdaoui *et al.* 2006, Bachaoui *et al.* 2007, El Aroussi *et al.* 2013, Akalai *et al.* 2014, Lahlaoui *et al.* 2015, Iaaich *et al.* 2016). Au Maroc, plusieurs chercheurs ont appliqués les SIG et la méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire / Centre d'Activités Régionales) pour la cartographie du risque de l'érosion hydrique. Boukrim *et al.* (2016) ont utilisé la méthode PAP /CAR pour cartographier l'érosion qualitative des sols du bassin versant de l'Aoudour (Rif-Maroc). La méthode PAP/CAR a été appliquée aussi pour la modélisation de l'érosion hydrique et ses facteurs causaux dans le bassin versant de l'Oued Sahla dans le Rif Central au Nord du Maroc (Mesrar *et al.* 2015). Les SIG et la méthode PAP/CAR ont été utilisées aussi avec un grand succès pour la cartographie des formes d'érosion et des mouvements de terrain dans le bassin versant de l'Oued Sahb Laghrik (Nord-Ouest de Taza, Maroc) (Hili *et al.* 2016). Au nord du Maroc, cette méthode a été aussi appliquée pour

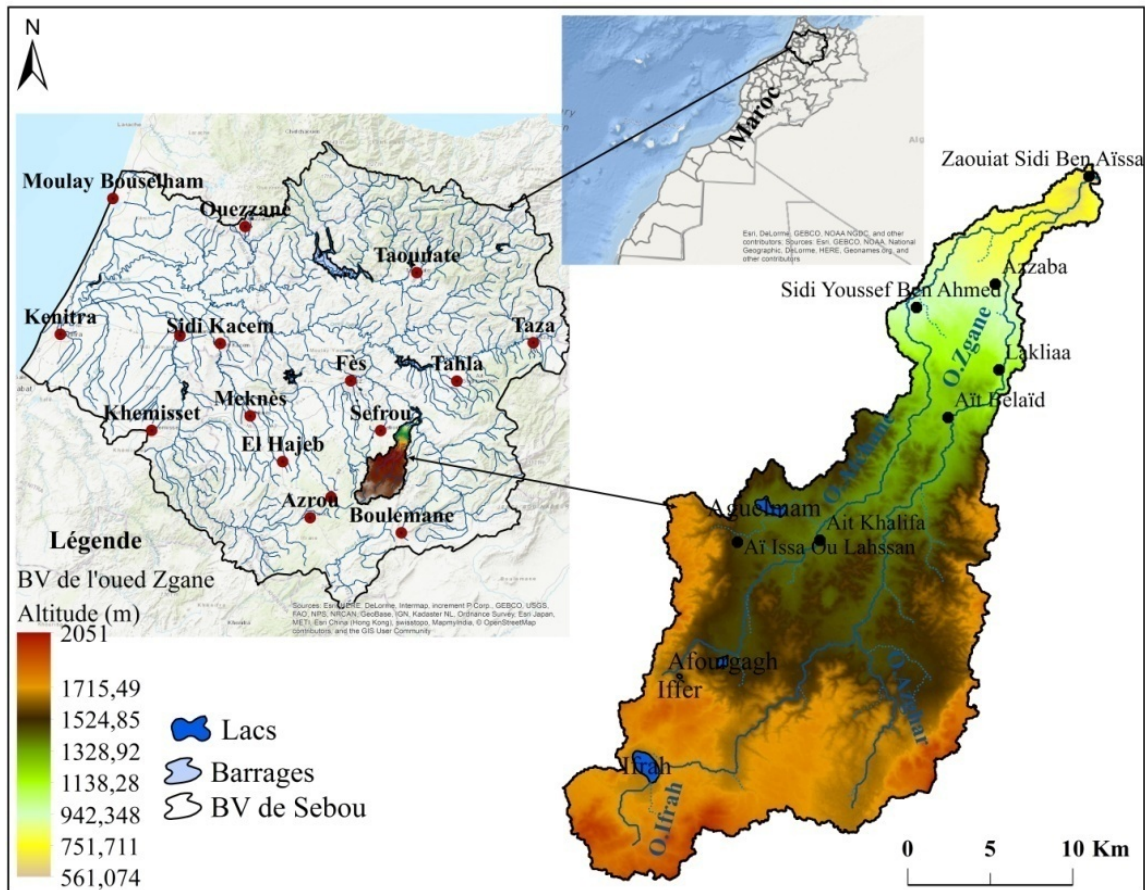


Figure 1. Situation géographique et MNT du bassin versant de l'Oued Zgane.
Figure 1. Geographical situation and DEM of Oued Zgane watershed.

cartographier l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'Oued Arbaa Ayacha, dans le Rif occidental (Ouallali *et al.* 2016).

Cette étude propose de cartographier les zones vulnérables à l'érosion hydrique en se basant sur les directives du modèle PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire/ Centre d'Activités Régionales), les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection au niveau du bassin versant de l'Oued Zgane, localisé au nord du Moyen Atlas central marocain dans le Causse moyen atlasique tabulaire. Ce modèle est choisi pour ses facilités d'utilisation. Des résultats préliminaires ont déjà permis de superposer et d'analyser plusieurs facteurs, tels que la pente, la nature des matériaux et le couvert végétal (Ousmana *et al.* 2014).

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de l'Oued Zgane est localisé au Nord du Moyen Atlas central marocain dans le Causse moyen atlasique tabulaire entre les longitudes 5°06'et 4°37' ouest et les latitudes 33°50'et 33°30'

nord. Il fait partie de la zone amont du bassin versant de Sebou. Il présente une forme allongée et occupe une superficie de 549,15 Km². Son indice de compacité de Gravelius Kc est égal à 2,7. Il est drainé par l'Oued Zgane sur une longueur de 69,38 km. De point de vue topographique, la zone d'étude est caractérisée par une variation altitudinale importante, allant de 561 m à 2051 m sur le sommet le plus élevé (Fig. 1).

Il présente dans l'ensemble une structure géologique sub-tabulaire et faillée (Martin 1981). La lithologie est formée essentiellement de dolomies, de calcaires dolomitiques et de calcaires du Lias inférieur et moyen qui reposent sur des terrains imperméables du Trias, composés d'argiles rouges à intercalations de basaltes doléritiques altérés. L'importante étendue de ces dépôts carbonatés marins de plate forme liasique, qui repose sur les terrains argileux gypso-salières triasiques, ont permis la formation d'une importante nappe d'eau et le développement d'une intense karstification, surtout dans les zones les plus faillées et facturées (Charrière 1990, Martin 1981, Fedan *et al.* 1989). Les petits affleurements de calcaires éocènes et miocènes apparaissent principalement dans le bassin versant du lac Ifrah (Colo 1961).

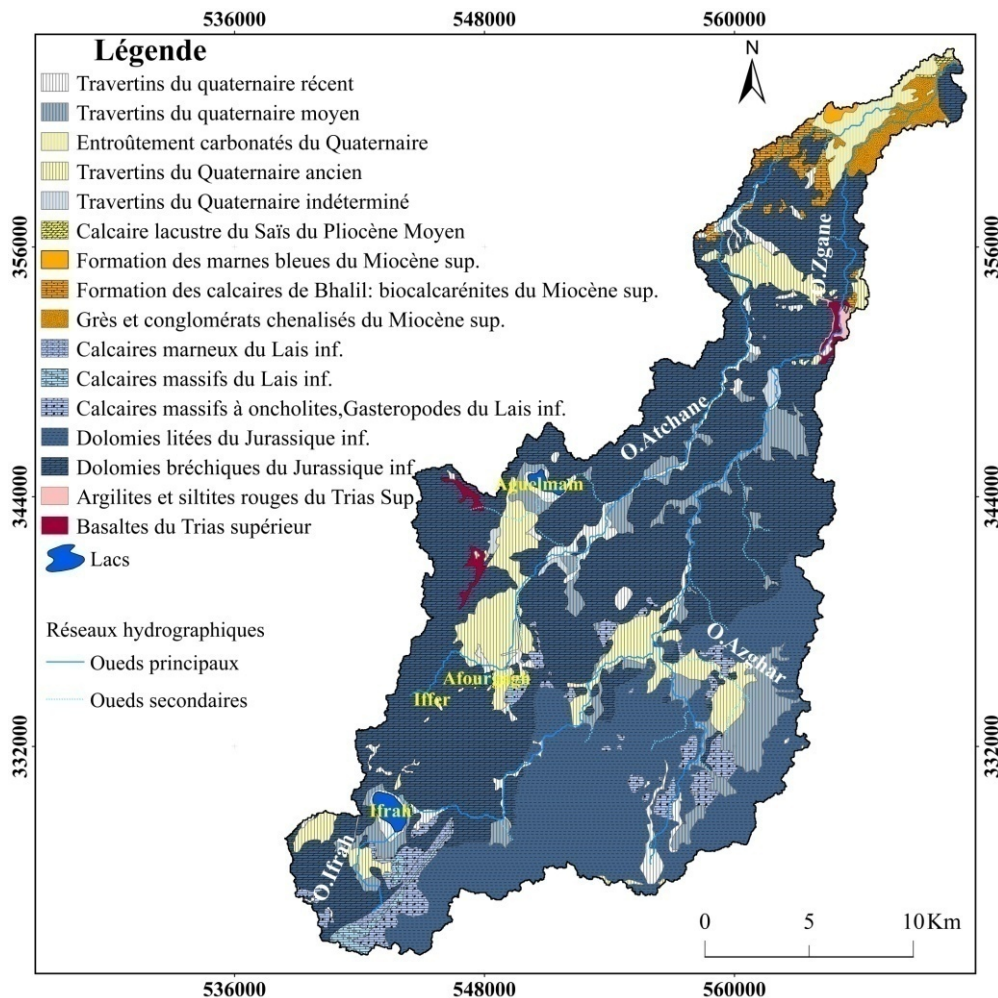


Figure 2. Carte géologique du bassin versant de l'Oued Zgane.
 Figure 2. Geological map of Oued Zgane watershed.

Les formations quaternaires, sous forme de cônes de déjection, sont très réduites (Hinaje *et al.* 2002, Fig. 2).

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen sub-humide, avec une aridité estivale marquée et un hiver froid. La saison humide s'étend d'octobre à mai. La pluviométrie moyenne annuelle varie selon les régions entre 600 et 1013 mm/an. Les précipitations sont caractérisées par une très forte irrégularité. Elles ont varié au cours du dernier siècle entre un minimum de l'ordre de 558,16 mm (Azzaba) et un maximum de 1063,63 mm (Dayet Hachelaf) (1979-2013).

La température moyenne se situe entre 3 et 22°C. La température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois d'août avec 22,8°C alors que la plus basse est celle du mois de janvier avec 3,2°C (Etebaai 2009). L'occupation des sols est représentée essentiellement par la céréaliculture, arboriculture et une végétation naturelle sous forme de matorrals très dégradés sur des surfaces restreintes (Etebaai 2009).

MATERIELS ET METHODES

Matériels utilisés

Le modèle qualitatif adopté pour la cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Zgane, repose sur l'exploitation des données relatives à la topographie, à la géologie, au couvert végétal et aux observations effectuées sur le terrain.

Les images satellitaires Landsat 8 et Google Earth, les observations sur le terrain, le modèle numérique de terrain (MNT), provenant d'images radar ASTER GDEM de 30m de résolution, et la carte géologique de Sefrou au 1/100 000 ont permis de délimiter le secteur d'étude et la réalisation des différentes cartes thématiques, en faisant appel aux fonctionnalités des logiciels dédiés à la télédétection et au Système d'Information Géographique (SIG). Ces données ont été géoréférencées au système de coordonnées Maroc.

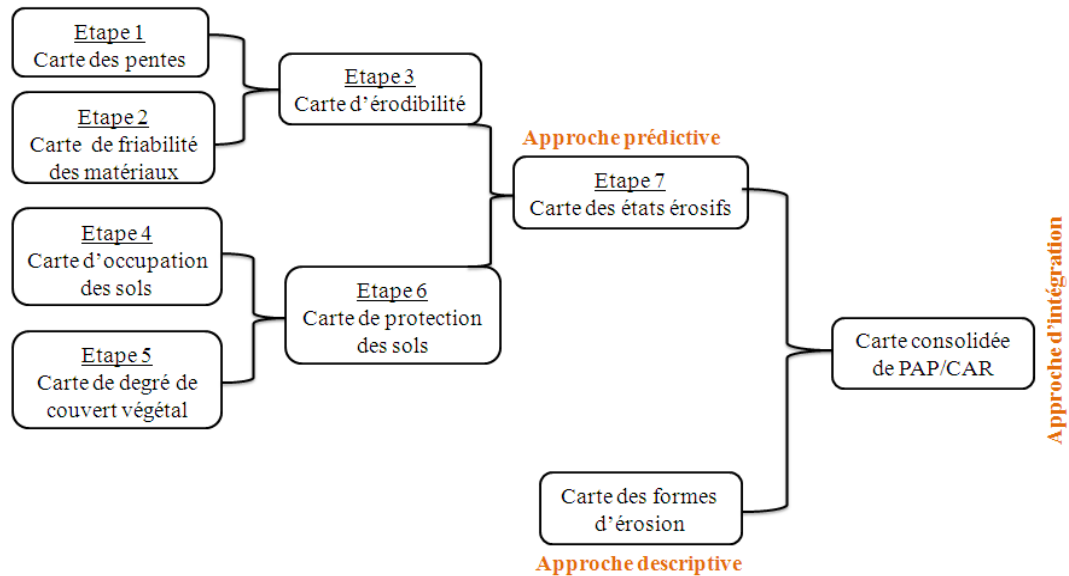


Figure 3. Méthodologie adoptée pour l'estimation de l'érosion potentielle par la méthode PAP/CAR.

Figure 3. Methodological flowchart of the application of the method PAP/RAC.

Tableau 1. Classification des paramètres de l'approche prédictive selon PAP/CAR (1998).

Tableau 1. Classification of the parameters of the predictive approach according to PAP/RAC (1998).

Pente			Lithofaciès		
Classes	Inclinaison	Degré	Classes	Résistance	Type de matériel
1	Nulle à faible	(0-3%)	(a)	Très forte	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, etc.
2	Modérée	(3%-12%)	(b)	Fort	Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés.
3	Abrupte	(12%-20%)	(c)	Moyenne	Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.)
4	Très abrupte	(20%-35%)	(d)	Faible	Roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés (marne, gypse, ardoise argileuse, etc.).
5	Extrême	(>35%)	(e)	Très faible	Sédiments ou sols meubles, non cohésifs et matériels détritiques.

Occupation du sol			Degré de couvert végétal		
Classes	Protection	Type de couverture	Classes	Protection	Degré de couvert végétal
1	Très faible	Culture sèche (herbacée)	1	Faible	<25%
2	Faible	Arboriculture, culture en ligne et reboisement	2	Moyenne	25%-50%
3	Moyenne	Culture intensive de proximité d'habitat	3	Forte	50%-75%
4	Fort	Forêts	4	Extrême	>75%
5	Très fort	Arbustes denses			
6	Extrême	Arbustes clairsemés, pâturages			

Tableau 2. Matrice d'occupation du sol Vs couvert végétal.
Tableau 2. Land covers matrix Vs vegetation density.
 Légende : Très élevé (MA), Elevé (A), Moyenne (M), Faible (B) et Très faible (MB).

Occupation du sol	Degré de couvert végétal			
	1	2	3	4
1	5(MB)	5(MB)	4(B)	4(B)
2	5(MB)	5(MB)	4(B)	3(M)
3	3(M)	2(A)	1(MA)	1(MA)
4	4(B)	3(M)	2(A)	1(MA)
5	5(MB)	4(B)	3(M)	2(A)
6	5(MB)	4(B)	3(M)	2(A)

Tableau 3. Matrice de degré de protection des sols Vs degré d'érodibilité.
Tableau 3. Degree matrix of soils protection Vs degree of erodibility.

Degré de protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1(EN)	2(EB)	3(EM)	4(EA)	5(EX)
1(MA)	1	1	1	2	2
2(A)	1	1	2	3	4
3(M)	1	2	3	4	4
4(B)	2	3	3	5	5
5(MB)	2	3	4	5	5

Tableau 4. Matrice des pentes Vs friabilité.
Tableau 4. Slope matrix VS friability.

Classes de pente	Classe de lithofaciès				
	1(a)	2(b)	3(c)	4(d)	5(e)
1	1(EN)	1(EN)	1(EN)	1(EN)	2(EB)
2	1(EN)	1(EN)	2(EB)	3(EM)	3(EM)
3	2(EB)	2(EB)	3(EM)	4(EA)	4(EA)
4	3(EM)	3(EM)	4(EA)	5(EX)	5(EX)
5	4(EA)	4(EA)	5(EX)	5(EX)	5(EX)

Présentation de la méthode PAP/CAR

La nature lithologique, liée aux variations physico-chimiques des matériaux, joue un rôle considérable dans les processus érosifs (Demmak 1984, Terfous *et al.* 2001). Les conditions topographiques s'associent souvent à la lithologie pour favoriser certains processus. Ainsi, la carte des lithofaciès a été réalisée à partir de la carte géologique de Sefrou au 1/100 000. La carte de la résistance des matériaux à l'érosion est déduite à partir de la carte des lithofaciès. Elle est appelée carte de friabilité dans la méthode PAP/CAR et représente

les principaux substrats, roches ou sédiments de surface classés en 5 classes suivant leur degré relatif de cohésion et de résistance à l'érosion. Pour chaque classe, un code est affecté en fonction du degré de friabilité ; (a) pour les roches les plus compactes et résistantes et (b), (c), (d) et (e) respectivement pour les roches progressivement de moins en moins compactes et résistantes (Tab. 1). La carte de la susceptibilité à l'érosion hydrique a été établie en utilisant la méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire/ Centre d'Activités Régionales) qui comporte essentiellement trois approches (PAP/CAR 1998, Fig. 3).

L'approche prédictive (carte des états érosifs) consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres essentiels, tels que la physiographie (pentes), la lithologie (friabilité ou résistance des matériaux à l'érosion), l'occupation des sols et le couvert végétal pour la détermination des hypothèses préliminaires concernant le risque d'érosion. La carte des états érosifs est réalisée à partir de la superposition de la carte d'érodibilité et de celle de la protection des sols. Les polygones résultant sont classés selon la matrice degré de protection des sols - degrés d'érodibilité (Tab. 4). Cette approche se base principalement sur le traitement des données selon plusieurs étapes.

L'élaboration de la carte des pentes à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) provenant des images ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). Il est produit en 2009 par les Etats-Unis et le Japon. Ce MNT a été réalisé avec le radar ASTER du satellite Terra de la NASA et qui offre une grande couverture géographique mondiale (99%) avec une résolution très fine de 30 m (Terra 2009). Ce modèle numérique a été pris le 17 Octobre 2011.

L'élaboration de la carte des lithofaciès qui représente les principaux substrats de la zone d'étude à partir de la carte géologique de Sefrou au 1/100000. Les différents substrats sont ensuite regroupés en 5 classes pour obtenir la carte de friabilité ou de résistance des matériaux à l'érosion. La carte d'érodibilité est obtenue par la superposition des cartes de pentes et de friabilité des matériaux (Tab.1). A l'aide des logiciels de télédétection, une image satellitaire Landsat 8, prise le 18/05/2017 (Path 200, row 37), à haute résolution spatiale (30 m), a servi à une classification supervisée afin d'établir la carte d'occupation des sols de la zone étudiée. La même image Landsat 8 a fait l'objet du calcul de l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pour estimer la densité de la végétation et réaliser la carte du couvert végétal. La carte de protection des sols est réalisée à partir de la superposition de la carte d'occupation des sols et de celle de la densité de recouvrement par le couvert végétal (Tab. 2). La première a pour objectif de diviser le terrain selon le

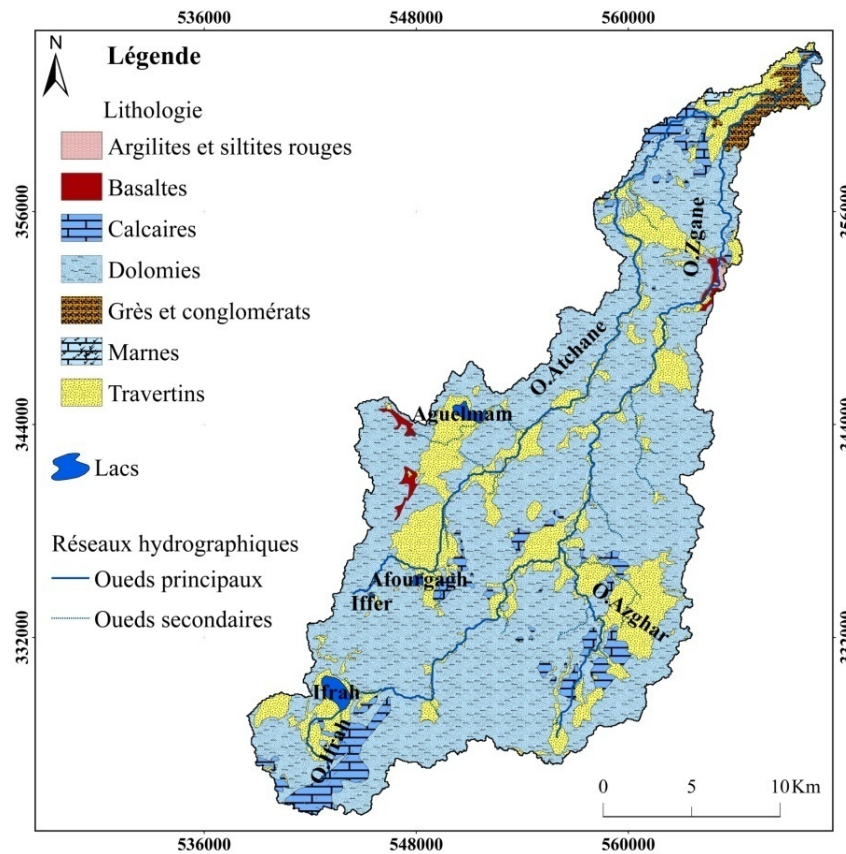


Figure 4: Carte des lithofaciès du bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 4: Lithofacies Maps of Oued Zgane watershed.

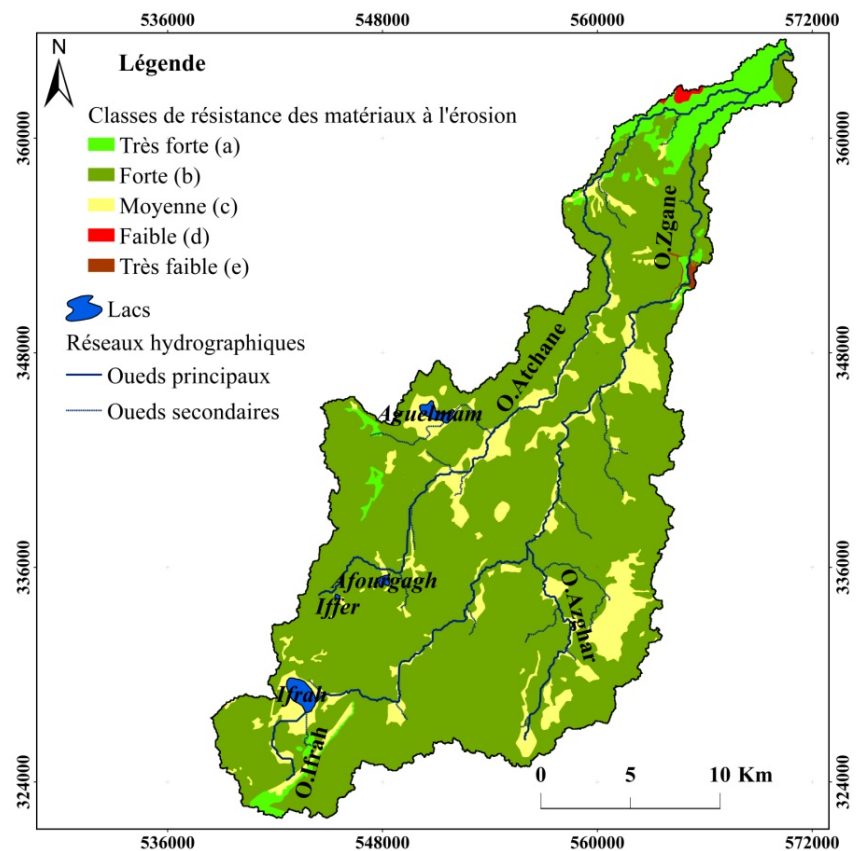


Figure 5. Carte de résistance des matériaux à l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 5. Material friability map of Oued Zgane watershed.

type de couvert végétal (matorral clair ou dense, forêt, reboisement, etc.) ou de culture (arboriculture, culture sèche, culture intensive maraîchage, etc.). La seconde a pour objectif de corriger la carte d'occupation des sols. L'objectif de cette carte est d'hierarchiser le bassin versant étudié selon le degré de protection que peut conférer le couvert végétal. L'utilité de cette étape s'avère nécessaire dans la mesure où elle permet de détecter les zones à faible ou à forte protection et par conséquent les zones noires qui nécessitent des interventions urgentes et rapides par le reboisement pour fixer et stabiliser le sol (Faleh *et al.* 2014). Ces paramètres sont classés selon leur degré de risque d'érosion (Tab.1). En effet, l'inclinaison de la pente est répartie en 5 classes du très faible (0–3%) à extrême (> 35%), pour tenir compte du fait que les pentes fortes favorisent la dynamique des eaux. La résistance mécanique à l'altération varie en fonction des lithofaciès ; ainsi les calcaires sont les plus résistants et les basaltes altérés et les argilites sont les moins résistants. Le degré de protection des sols dépend d'une part du type d'occupation en question (Matorral, Forêt ou culture) classé en fonction du degré de protection et d'autre part de la densité du couvert végétal répartie en quatre classes du moins dense (<25%) au plus dense (>75%). La carte des états érosifs est réalisée à partir de la superposition de la carte d'érodibilité et de celle de la protection des sols. Les polygones résultant sont classés selon la matrice degré de protection des sols - degrés d'érodibilité (Tab. 3).

L'approche descriptive donne une image réelle sur les différentes formes d'érosion existantes sur la zone d'étude ainsi que leurs degrés d'exposition à la dégradation. Elle est réalisée à partir d'images satellitaires Google Earth, téléchargées le 28/10/2016, rectifiées par les observations du terrain.

L'approche d'intégration est la superposition de la carte des états érosifs obtenue par la cartographie thématique et la carte des formes d'érosion obtenue par la cartographie descriptive directe des formes d'érosion sur le terrain ou par les images satellites (Fig. 3).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Approche prédictive

Carte des Lithofaciès

La carte des lithofaciès montre que le bassin versant de l'Oued Zgane est dominé par une lithologie dolomitique du Lias inférieur et moyen qui représente 70% de la surface totale suivie par des travertins quaternaires (19%) répartis au Nord du lac Afourgagh et au Nord-Est du secteur d'étude, et puis par de petites fenêtres de calcaires (5%) dispersées autour du lac Afourgagh au Sud-Est du lac Ifrah et au niveau de la partie Sud-Est du bassin versant étudié (Fig. 4).

Carte de friabilité

En se basant sur la vulnérabilité des substrats à l'érodibilité, les différents types de matériaux affleurant sur la carte des lithofaciès ont été répartis en 5 classes de friabilité (résistance des matériaux à l'érosion) (Fig. 5, Tab. 1). Ainsi, la classe (b) formée de roches cohésives fracturées ou modérément altérées (calcaires massifs à oncholites, gastéropodes et foraminifères, localement dolomitisés et faciès dolomitiques) occupe la majeure partie du bassin versant avec 82,47% (453 km²) de superficie. La classe de faible sensibilité à l'érosion (a), correspondant aux calcaires massifs liasiques ainsi qu'aux grès et conglomérats chenalisés, faciès fluvio-deltaïque du Miocène supérieur, représente 5,53% de la surface totale (30,38 km²). La classe de moyenne sensibilité à l'érosion (c), englobe des roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (calcaires marneux et travertins) occupe 11,66% de la zone d'étude (64 km²). La classe de forte sensibilité à l'érosion (d) regroupe les formations peu résistantes ou fortement/profondément altérées (marnes du Miocène supérieur), et s'étend sur 0,17%, soit de 0,93 km² de la surface totale du bassin versant (2 km²). La classe de très faible sensibilité à l'érosion (e), sédiments ou sols meubles, non cohésifs et matériels détritiques, englobe les argilites et siltites rouges du Trias occupe 0,89 km², soit de 0,16% de la surface totale de la zone d'étude (Fig. 5).

Carte des pentes

La pente est un facteur principal pour l'évaluation de la sensibilité des terres à l'érosion. Le degré de pentes est généralement faible au Nord et dans la partie médiane du bassin versant de l'Oued Zgane et devient de plus en plus élevé vers l'Est et l'Ouest de la zone d'étude (Fig. 6). Ainsi, la classe des pentes modérée (3-12%) prédomine avec 40,63% du territoire soit une superficie de 223 km². La classe abrupte (12-20%) occupe 135,19 km² soit 24,63% de la superficie totale du bassin versant. Les classes de pentes élevées (20-35%) et très élevées (>35%) représentent respectivement 21,90% et 9,34% soit respectivement 120,23 km² et 51,24 km². Ces deux dernières classes occupent 31,24% des terres avec des pentes supérieures à 20%. En effet, cette forte inclinaison rend le bassin versant très sensible à l'action érosive des précipitations et à l'activité plus forte des eaux d'écoulement, entraînant des ravinements considérables, ce qui nécessite des traitements adéquats pour assurer la protection et la conservation des sols.

Carte d'érodibilité

La carte d'érodibilité est le résultat de la superposition de la carte des pentes et de la carte de résistance des matériaux à l'érosion (Tab. 4). Les polygones résultant du produit croisé des deux tables

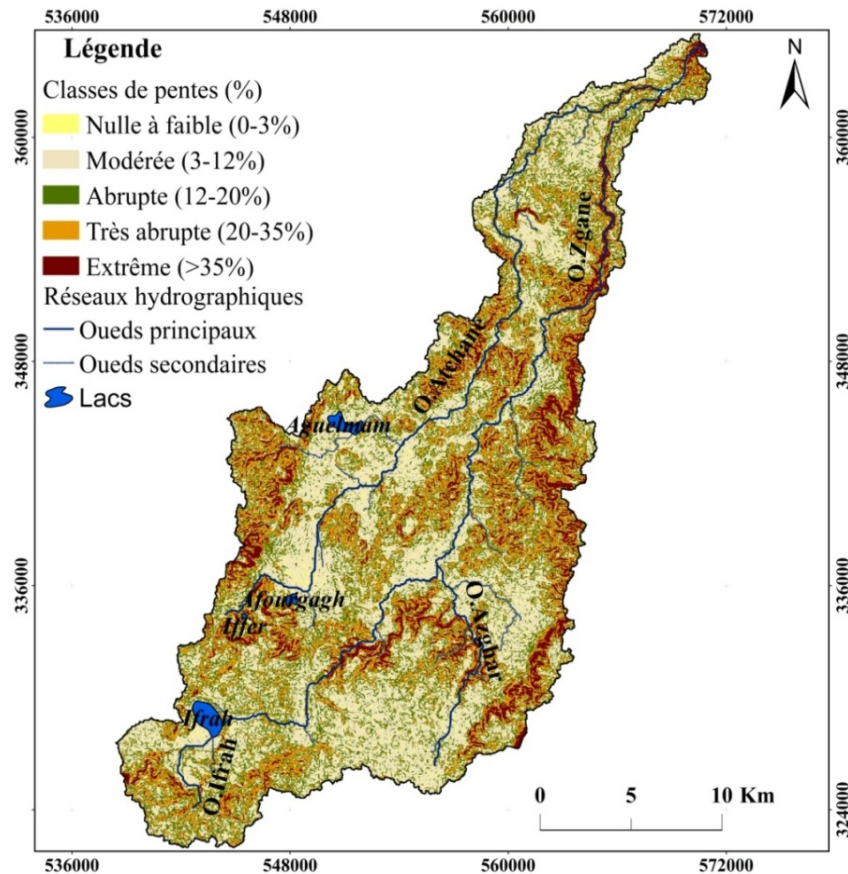


Figure 6. Carte des pentes du bassin versant de l'Oued de Zgane.

Figure 6. Slop map of Oued Zgane watershed.

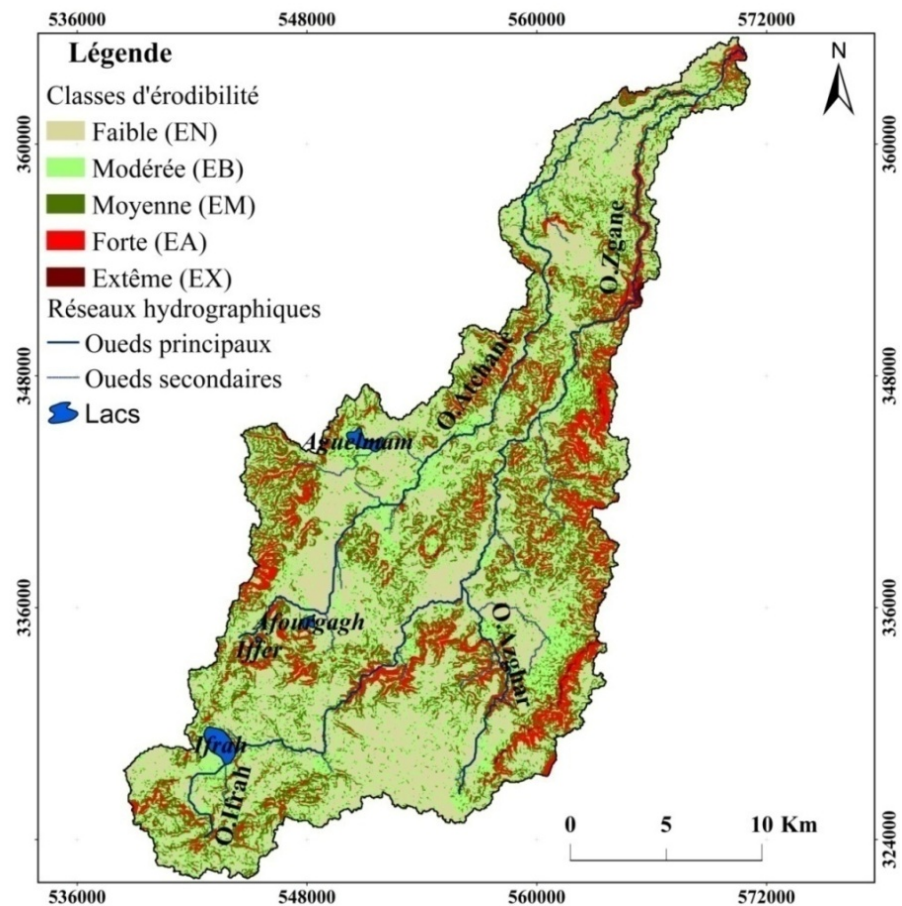


Figure 7. Carte d'érodibilité du bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 7. Erodibility map of Oued Zgane watershed.

Figure 8. Carte d'occupation des sols du bassin versant de l'Oued Zgane (extraite de l'image Landsat 8 du 18/05/2017).

Figure 8. Land use map of Oued Zgane watershed (from Landsat 8 of 18/05/2017).

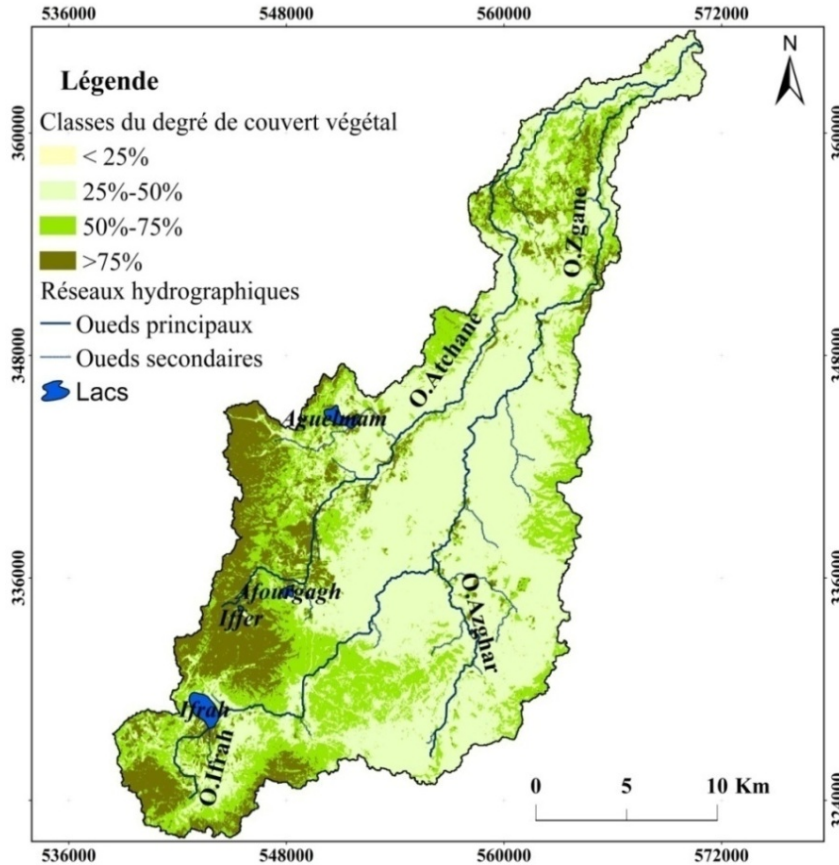
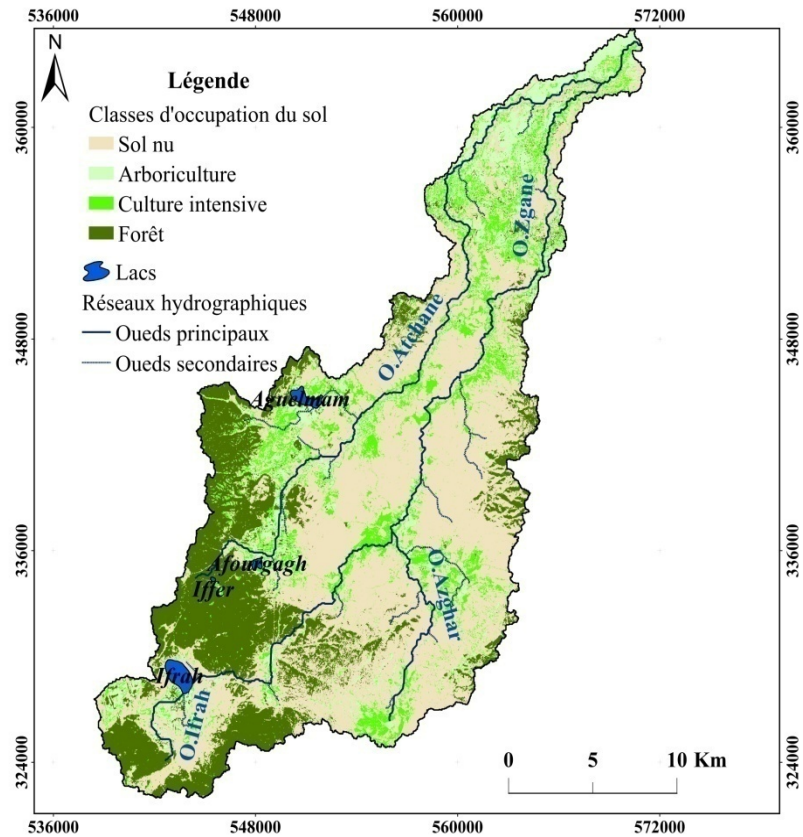


Figure 9. Carte du couvert végétal du bassin versant de l'Oued Zgane (extraite de l'image Landsat 8 du 18/05/2017).

Figure 9. Land cover map of Oued Zgane watershed (from Landsat 8 of 18/05/2017).

sont classés selon une matrice pour hiérarchiser le terrain en fonction du degré d'érodibilité (Fig. 7).

L'érodibilité est toujours extrême lorsque la pente est forte et/ou le terrain est de faible résistance. La répartition spatiale des différentes classes d'érodibilité montre que presque 89% du bassin versant est d'érodibilité modérée (EN) à moyenne (EM). Cependant, les classes d'érodibilité forte (EA) et extrême (EX) ne couvrent que 10% du bassin versant. L'abondance des terrains à érodibilité modérée à moyenne peut être expliquée par la présence des sols sédimentaires cohésifs fracturés ou modérément altérés et des sols peu évolués (80% de la superficie du bassin versant). La topographie irrégulière de la zone d'étude favorise l'instabilité des sols et par conséquent la perte de la matière organique et des éléments nutritifs ainsi que la détérioration de la structure des sols.

Carte d'occupation des sols

L'occupation des sols est dominée par la classe des terrains nus qui occupe la quasi-totalité du bassin versant étudié (Fig. 8). Elle s'étend sur 279,68 km², soit environ 50,92% de la superficie totale de la région d'étude. Elle se rencontre généralement sur des terres à pente assez élevées. Elle est éparpillée dans le secteur d'étude, essentiellement au centre et à la périphérie du bassin versant. La classe des arboricultures et cultures en ligne (oliviers et arbres fruitiers) occupe 54,82 km², soit 9,98%. Elle se trouve essentiellement au Nord et au Nord-Ouest de la zone d'étude. La classe des cultures intensives avec irrigation est étalée sur une surface de 92,77 km², soit 16,89% de la superficie totale. Elle se rencontre généralement sur les bordures des Oueds Azghar, Atchane et Zgane et aussi à proximité des lacs Afourgagh et Aguelmam. Cependant, la classe des forêts représente 121,97 km² de la surface de secteur d'étude, soit 22,21%. Elle se situe au Sud et au Sud-Ouest et à l'Est du bassin versant sous forme de petites parcelles. Ainsi, la prédominance des sols nus (terrains dépourvus de couvert végétal) sur la totalité de la zone d'étude rend les sols encore fragiles vis-à-vis du phénomène d'érosion.

Carte du couvert végétal

Le couvert végétal dépend de la croissance et du développement de la végétation en relation avec la variation de l'érosivité du climat. Ce facteur joue un rôle clé dans le maintien de la résistance des sols, car quelque soit le sol, la pente et le climat, un couvert végétal complet permet une meilleure conservation du sol et de l'eau. L'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) du bassin versant de l'Oued Zgane a été calculé à partir de l'image satellitaire Landsat 8 prise le 18/05/2017. Il montre quatre classes de valeurs de NDVI. En effet,

les valeurs les plus élevées qui tendent vers 1 (0,247-0,571) correspondent aux zones de forêt où la végétation est très dense. Les valeurs élevées (0,175-0,247) représentent la végétation dense, la végétation de densité moyenne est représentée par des valeurs comprises entre (0,058- 0,175) et les faibles valeurs (-0,103- 0,058) correspondent aux zones de végétation éparse et des terrains de culture (Fig. 9).

Le bassin versant de l'Oued Zgane (Fig. 9) se caractérise par une végétation moins abondante de la classe de densité (25%-50%) dans sa partie médiane avec un couvert arboré souvent dégradé ou absent. La classe de densité (50%-75%) (végétation dense) couvre 26,38 % du bassin avec une surface de 144,89 Km², alors que la classe de végétation très dense (>75%) représente 15,10% et s'étend sur une superficie de 82,95 Km². La classe de densité (<25%), où la végétation est éparse, est la moins représentée avec une surface de 1,15 km² soit seulement 0,21% de la superficie du bassin versant. La partie Sud et Sud-Ouest de la zone d'étude présente des caractéristiques nettement différentes, avec une installation d'une forêt à végétation abondante (dense) dominée par le chêne vert et le cèdre.

Carte de protection des sols

La végétation protège les sols de l'ablation par réduction de l'énergie des agents érosifs en réduisant l'énergie de l'érosion pluviale par interception des gouttes de pluie, grâce aux parties aériennes des plantes (Rey *et al.* 2004). Au sol, la végétation permet de lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau. Mais l'effet de la végétation peut être différent selon les formations végétales. En effet, il peut dépendre du type de végétation ou de l'utilisation du sol. Pour cela, la carte de protection des sols s'avère indispensable dans la mesure où elle permet d'apercevoir les zones à faible ou à forte protection et par conséquent les zones affectées qui nécessitent des interventions urgentes et rapides pour fixer et stabiliser le sol. La carte de protection des sols a permis de visualiser différentes zones divisées en cinq classes: très faible (MB), faible (B), moyenne (M), élevée (A) et très élevée (MA) (Fig.10). La classe de très faible protection (MB) se trouve partout dans le bassin versant, en amont mais aussi en aval, au niveau des zones qui abritent un lithofaciès dolomitiques et à travertins et une pente faible (<12°). Elle couvre la grande partie du bassin essentiellement dans la partie centrale avec 275,93 Km², soit 50,25% de la superficie totale. La faible protection du secteur d'étude s'explique par une couverture végétale très dégradée à cause des besoins importants en terres de culture et du surpâturage. La classe de protections moyennes (M) s'étale sur une superficie de 18,21 Km² (3,32%) au Nord du lac Afourgagh, au niveau

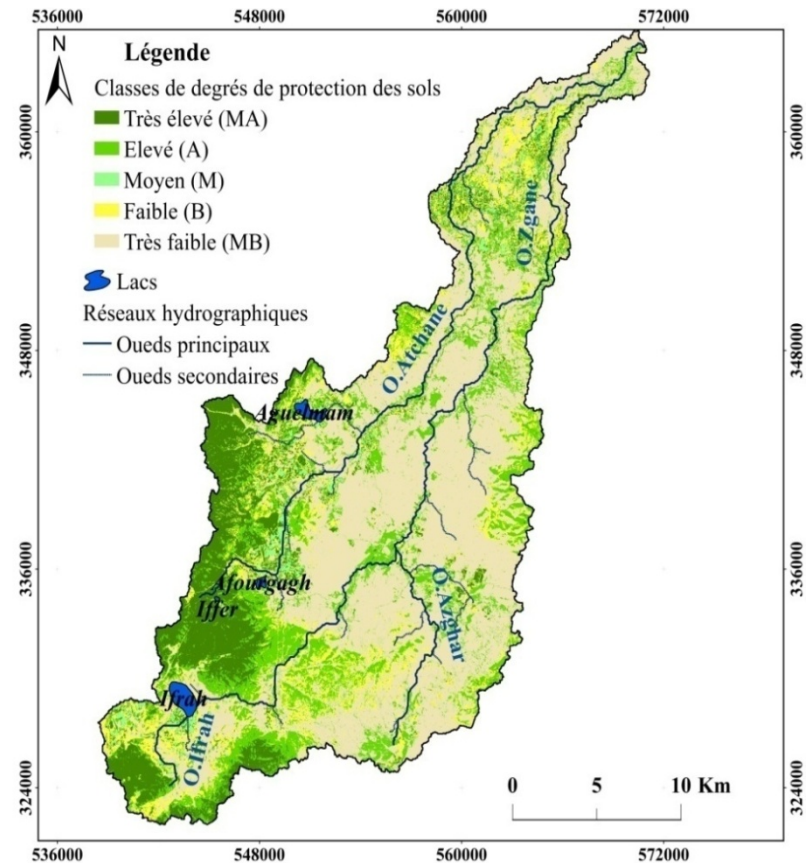


Figure 10. Carte de protection des sols du bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 10. Soil protection map of Oued Zgane watershed.

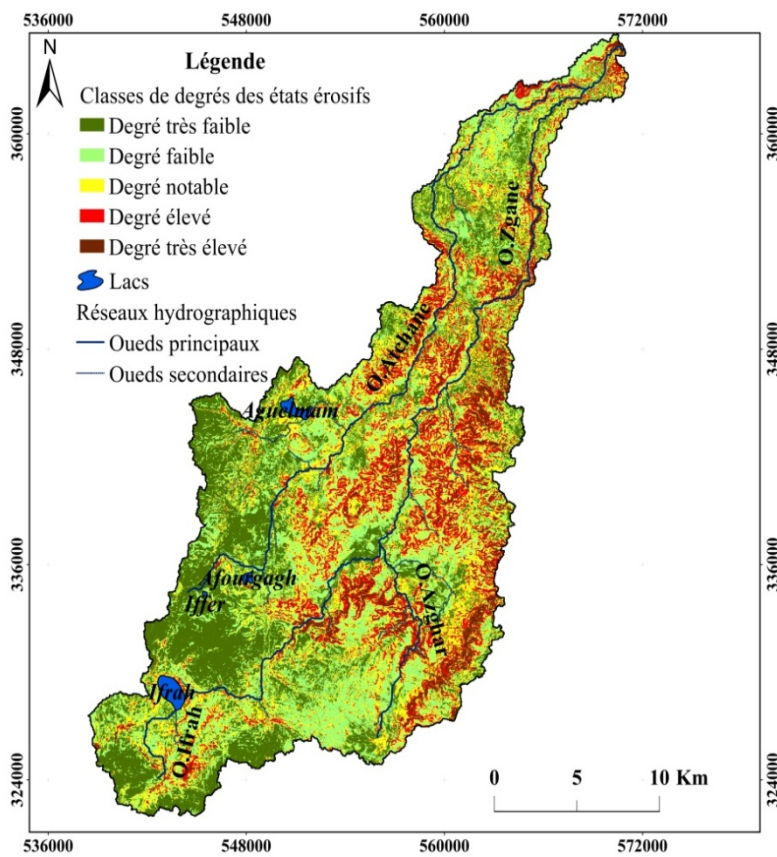


Figure 11. Carte des états érosifs du bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 11. Degree of erosion map of Oued Zgane watershed.

du lac Aguelmam et au Nord de la zone d'étude. Les classes de protection élevée et très élevée (A) et (MA) couvrent 184,75 Km², soit 33,64% de la superficie totale et se rencontrent sur les bordures des trois principaux Oueds Azghar, Atchane et Zgane ainsi que sur le versant Sud-Ouest de la partie Sud du bassin versant. Les zones à érosion forte et élevée correspondent aux zones à forte activité anthropique où vivent des populations humaines relativement importantes.

Carte des états érosifs

La carte des états érosifs laisse apparaître cinq classes représentatives des degrés d'érosion. Il s'agit des classes de degré très faible, faible, notable, élevé et très élevé. La répartition des superficies sur la carte des états érosifs montre que les classes à risque d'érosion très faible et faible occupent la majorité du territoire (57,27% soit une surface de 315,7 km²), essentiellement vers le Sud, le Sud-Ouest du bassin versant et aussi vers sa partie Nord-Ouest. Ces zones sont moins accidentées caractérisées par des pentes faibles à modérées, un couvert végétal plus ou moins abondant et à érodibilité modérée à moyenne. Les classes à risque d'érosion élevé et très élevé occupent de faibles superficies (19,48%). Elles se trouvent globalement dans la bordure Est et dans le centre du bassin versant. Dans le détail, elles sont dispersées et localisées le long de l'Oued Zgane et sur la rive gauche de l'Oued Atchane. Elles se concentrent également vers l'aval au point de confluence des Oueds Azghare et Zgane (Fig.11).

Approche descriptive des formes d'érosion

La répartition des formes d'érosion dans la zone d'étude montre que les rigoles et ravinements superficiels (D2) et l'érosion en nappe (L23) sont les plus apparents avec une surface couvrant respectivement 73,31% et 11,39% de la superficie totale du bassin versant étudié. La présence de ces deux formes d'érosion surtout près des cours d'eau, peut être expliquée par la vulnérabilité du terrain, l'action des cours d'eau et par l'action anthropique. Ces mêmes formes d'érosion et leurs causes ont été identifiées dans le bassin versant de l'Oued Aoudour dans le Rif central (Boukrim *et al.* 2016). Par ailleurs, les ravins moyennement profonds et profonds (C3 et C4) touchent 15,30% de la superficie du secteur d'étude et sont situés surtout dans la partie Est du bassin versant (Fig. 12).

Approche d'intégration : Réalisation de la carte consolidée d'érosion PAP/CAR

La carte consolidée d'érosion PAP/CAR est une carte qualitative obtenue par la combinaison des deux étapes précédentes. Il s'agit de compléter les résultats obtenus lors de la phase prédictive par les données

descriptives des processus d'érosion cartographiés et réalisés au cours de la deuxième phase. La superposition de la table de la carte d'états érosifs et de celle de la carte des formes d'érosion fournit un produit cartographique très précis qui reflète la réalité de l'état de dégradation du sol et la tendance de l'évolution future de l'érosion (Fig. 13). Elle aboutit au produit cartographique final identifiant et évaluant, à la fois l'érosion potentielle (prédictive) et l'érosion actuelle sous ses différentes formes, intensités et tendances évolutives. Les zones à risque d'érosion faible et modéré correspondent aux formes d'érosion de type rigoles et ravinements superficiels et l'érosion en nappe. Tandis que les formes d'érosion en ravins moyennement profonds, profonds coïncident avec des zones à risque d'érosion élevé et très élevé. La présence de ces ravins profonds pourrait être liée à la pente forte. On peut, en général, dire que les zones les plus menacées par le risque d'érosion se situent essentiellement dans la partie Est du bassin versant et le long des Oueds Zgane, Atchane et Azghar où se trouvent les ravins profonds. La présence de ces formes peut être liée à la pente forte, à l'agressivité des pluies et au faible degré du couvert végétal (Fig. 13). L'absence d'érosion visible sur un site protégé par un couvert végétal assez dense coïncide avec des zones où le degré d'érodibilité est faible et le degré de protection est élevé. La superposition des états prédictifs et descriptifs confirme que la vulnérabilité du bassin versant de l'Oued Zgane à l'érosion élevé à très élevé se situent essentiellement dans les parties médiane et ouest de la zone d'étude. Comme dans d'autres régions au Maroc, les sols du bassin versant de l'Oued Zgane subissent l'effet de plusieurs facteurs influençant le phénomène d'érosion. Ainsi, la nature lithologique des terrains est constituée par des matériaux sensibles à l'érosion (calcaires marneux et travertins), avec 12% de la superficie totale du secteur d'étude. L'importance des pentes surtout à l'Est et à l'Ouest du bassin versant (55,87% présente des pentes élevées >12%) aggrave le phénomène d'érosion. L'érodibilité des sols met en évidence la présence d'une érodibilité modérée à moyenne au niveau de l'ensemble du bassin versant étudié avec une superficie de 89%. Le couvert végétal est souvent réduit à cause des conditions climatiques et des actions anthropiques qui sont très notables dans les parties centrale et Est du bassin versant où la végétation est moins abondante et éparse, ce qui réduit la protection des sols dans ces zones.

Comparaison de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Zgane par rapport à quelques bassins versants marocains

La méthode PAP/CAR a déjà été utilisée dans le cadre d'études visant à établir des cartes d'érodibilité

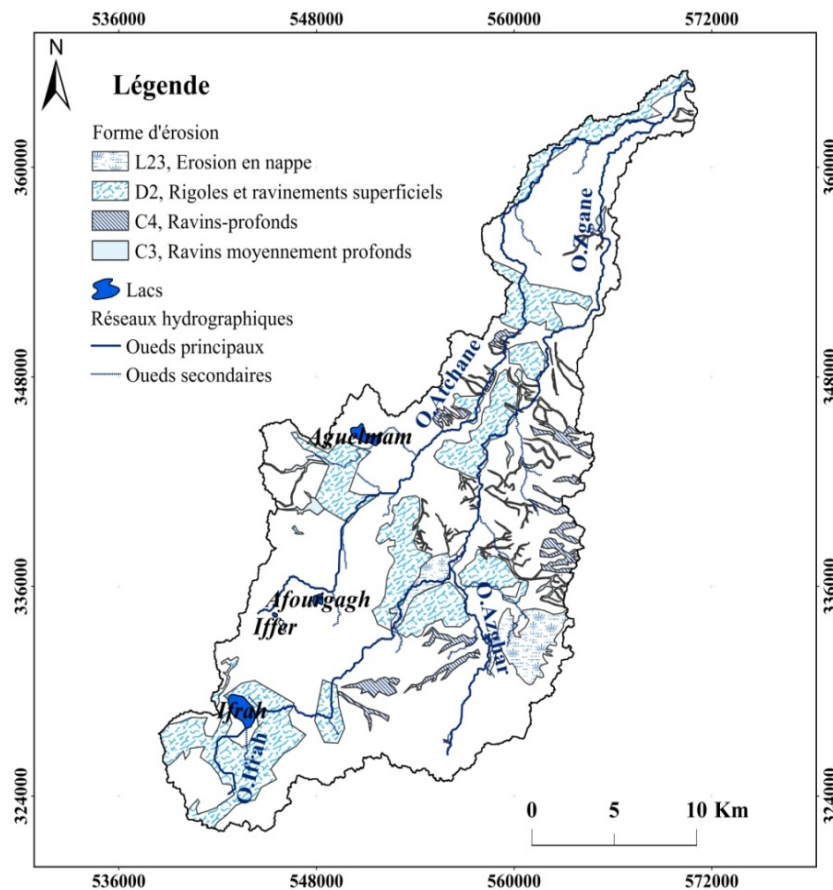


Figure 12. Carte des formes d'érosion du bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 12. Map of erosion forms of Oued Zgane watershed.

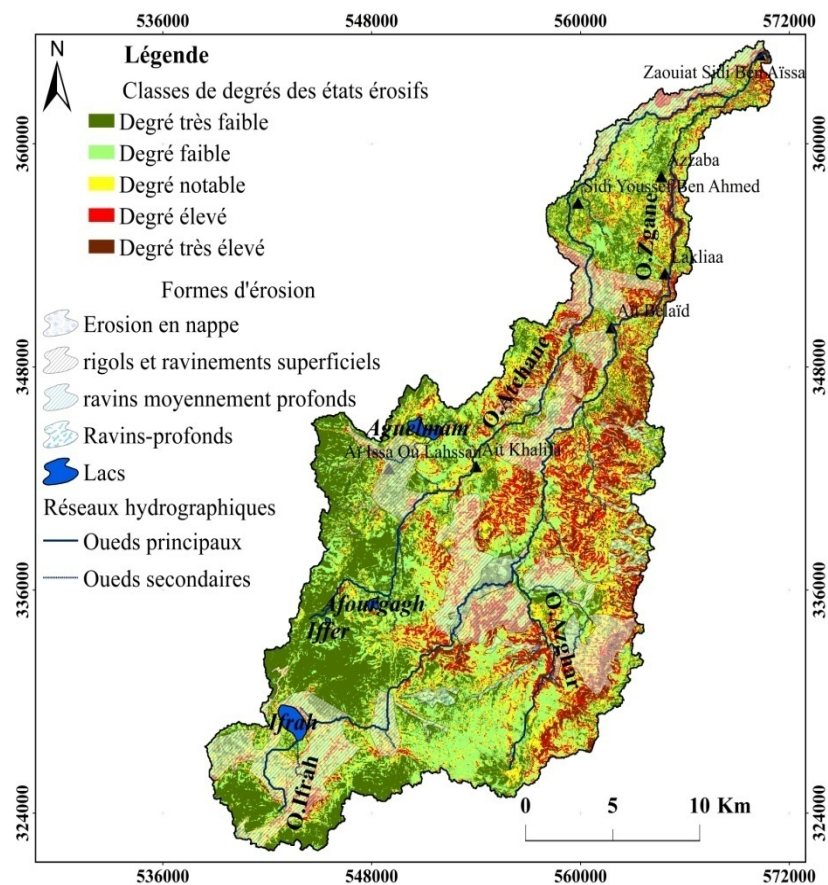


Figure 13. Carte consolidée d'érosion PAP/CAR du bassin versant de l'Oued Zgane.

Figure 13. Consolidated map PAP/RAC of Oued Zgane watershed.

des sols (Tab. 5) et s'avère très satisfaisante. Nous citons à titre d'exemples quelques travaux de recherche pertinents (Faleh *et al.* 2014, Sadiki *et al.* 2012, Mesrar *et al.* 2012 ; Boukrim *et al.* 2016, Ouallali *et al.* 2016, Lakhili *et al.* 2017) qui montrent l'efficacité de cette approche pour l'estimation de l'érosion hydrique. Ils montrent presque toujours la prédominance de l'érosion en nappe et par décapage qui atteint jusqu'à 75% de la superficie des bassins versants, suivie de l'érosion en rigoles et ravinements superficiels, de l'érosion en ravins moyennement profonds et en fin les formes en bad-land (Tab. 5). L'érosion faible dans notre bassin versant de l'Oued Zgane dans le Moyen Atlas est presque équivalente à celle du bassin versant du barrage Allal El Fassi dans le Moyen Atlas oriental (Faleh & Maktite 2014), du bassin versant du barrage Sahla dans le Rif central (Mesrar *et al.* 2012) et du bassin versant de l'Oued Aoudour dans le Rif central (Boukrim *et al.* 2016), mais beaucoup plus importante que celle des bassins versants de l'Oued Larbaa Ayacha dans le Rif occidental (Ouallali *et al.* 2016) et de l'Oued Larbaa dans le Rif oriental (Sadiki *et al.* 2012). Cependant l'érosion extrême reste négligeable dans les bassins versants du Moyen Atlas et du Rif central, mais relativement importante et mérite beaucoup d'attention au niveau des bassins versants du Rif oriental et occidental (Tab. 5).

CONCLUSION

L'étude qualitative de l'érosion potentielle par la méthode PAP/CAR, basée sur les facteurs naturels (pente, lithologie, couvert végétal et occupation des sols) a permis d'analyser et de comprendre la problématique de la zone d'étude sur le plan risque érosif. Elle a montré son importance comme un outil efficace pour réaliser, d'une manière simple et rapide, un diagnostic général du risque potentiel d'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant de l'Oued Zgane. Ce travail a permis, de constituer une base de données multi-sources sur la région d'étude et de montrer l'importance et l'apport du système d'information géographique et de la télédétection à la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique. La phase prédictive a fourni des informations sur l'état actuel de la dégradation des sols en se basant sur le degré d'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique. Elle montre que 80,52% du bassin versant étudié présente une érodibilité faible à moyenne et 19,48% seulement une érodibilité élevée et très élevée.

L'approche descriptive a montré que la dégradation et la perte des sols se manifestent par différentes formes d'érosion hydrique avec prédominance des rigoles et des ravinements superficiels et de l'érosion en nappe.

La superposition des phases prédictive et descriptive a mis en évidence les tendances globales de l'évolution superficielle des sols du bassin versant.

Ainsi, certains états très dégradés coïncident avec des formes d'érosion spectaculaires et d'autres états plus stables avec des formes d'érosion mineurs ou carrément des zones stables.

Devant les menaces de dégradation qui pèsent sur les ressources naturelles (forêts, eau, sols et biodiversité) et sur l'infrastructure du bassin versant et par conséquent sur la qualité de vie des habitants de point de vue économique et social, il s'avère urgent d'intervenir pour lutter contre l'érosion selon une approche globale et novatrice qui permettra de concilier entre les besoins importants d'une population, qui ne cesse de s'accroître et les potentialités limitées des ressources naturelles qui s'appauvrissent de plus en plus du fait de leur surexploitation et de l'impact du changement climatique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les évaluateurs anonymes pour leurs remarques et suggestions.

REFERENCES

- Akalai N., Hlila R., El Imrani M. *et al.* 2014. Risk of water erosion in coastal watersheds north of Tetuan (Internal Rif, northern Morocco): Evidences from GIS-based spatial approach. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 8, 4, 1735-1751.
- Bachaoui B., Bachaoui E.M., El Harti A. *et al.* 2007. Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique : exemple du Haut Atlas marocain. *Revue Télédétection*, 7, 1, 393-404.
- Bachaoui M., Bachaoui B., Lhissou R. *et al.* 2014. Modeling and mapping water erosion risks in the High Atlas of Morocco: the Atlas of Beni Mellal as a case in point. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 2(1), ISSN: 2052-5583, 40-47.
- Bayramin I., Dengiz O., Başkan O. *et al.* 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model; case study: Beypazarı area. *Turkish. Journal of Agriculture and Forestry*, 27, 2, 105-116.
- Boggs G., Devonport C., Evans K. *et al.* 2001. GIS-based rapid assessment of erosion risk in a small catchment in the wet/dry tropics of Australia. *Land Degradation & Development*, 12, 5, 417-434.
- Bou Kheir R., Girard M C., Shaban A. *et al.* 2001. Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, 2, 2, 79-90.
- Boukrim S., Lahrach A., Midaoui A. *et al.* 2016. Cartographie De L'érosion Qualitative Des Sols Du Bassin Versant De L'aoudour (Rif-Maroc). *European Scientific Journal*, 12, 11, 1857-7431.
- Charrière A. 1990. *Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc)*. Thèse Doctorat Sciences Naturelles, Université de Toulouse III, 589p.
- Colo G. 1961. Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. *Notes et Mémoires du Service Géologique*, Maroc, 139, 226.
- Demmak A. 1984. Recherche d'une relation empirique entre les apports solides spécifiques et les paramètres

- physico-climatiques des bassins : cas algérien. In. *AISH Public*, 144, 403-414.
- El Aroussi O., El Garouani A. & Jabrane R. 2013. Modelling and mapping of soil erosion on the Oued El Malleh catchment using remote sensing and GIS. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7, 02, 302-307.
- Elbouqdaoui K., Ezzine H., Zahraoui M. *et al.* 2006. Évaluation du risque potentiel d'érosion dans le bassin-versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 17, 3, 425-431.
- Etebaai I. 2009. *L'environnement actuel et le fonctionnement hydroclimatique de quelques systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh*. Thèse de Doctorat National, Université Abdelmalek Essaadi, Faculté Des Sciences Et Techniques, Tanger, 344p.
- Faleh A. & Maktite A. 2014. Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode PAP/CAR et SIG en amont du barrage Allal El Fassi, Moyen Atlas (Maroc). *Papeles de Geographia*, 59-60, 71-82.
- Fedan B., Laville E. & El Mezgueldi A. 1989. Le bassin jurassique du Moyen Atlas (Maroc); exemple de bassin sur relais de décrochements. *Bulletin de la Société géologique de France*, 6, 1123-1136.
- Hili A., EL Khalki Y. & Gartet J. 2016. Application of directives PAP/RAC and GIS for mapping forms of erosion and land movements in the watershed of Oued Sahb Laghrik (Northwest Taza, Morocco). Mapping approach. *Arabian Journal of Earth Sciences*, 3, 2, 17-25.
- Hinaje L. & Ait Brahim L. 2002. Les Bassins Lacustres du Moyen Atlas (Maroc) : Un exemple d'Activité Tectonique Polyphasée Associée à des Structures d'Effondrement. *Comunicações Do Instituto Geológico e Mineiro*, 89, 283-294.
- Iaaich H., Moussadek R., Baghdad B. *et al.* 2016. Soil erodibility mapping using three approaches in the Tangiers province-Northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 4, 03, 159-167.
- Lahloui H., Rhinane H., Hilali A. *et al.* 2015. Potential erosion risk calculation using Remote Sensing and GIS in Oued El Maleh Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 7, 02, 128-139.
- Lakhili F., Benabdelhadi M., Chaouni A. *et al.* 2017. Cartographie de l'érosion qualitative des sols du bassin versant de Beht (Maroc). *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. ISSN 2429-5396. 174-185.
- Lee S. 2004. Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information system: a case study at Boun, Korea. *Environmental Geology*, 45, 4, 457-465.
- Martin J. 1981. Le Moyen-Atlas Central: étude géomorphologique. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 258 bis, 445p.
- Mesrar H., Sadiki A., Faleh A. *et al.* 2012. Automatisation de la procédure de modélisation des directives PAP/CAR, par utilisation de l'utilitaire « PAP/CAR Tools » et du SIG, pour l'évaluation des tendances et des facteurs causaux de l'érosion hydrique, cas du bassin versant de l'Oued Sahla. *International Conference of GIS-Users*, 421-424.
- Mesrar H., Sadiki A., Navas A. *et al.* 2015. Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'Oued Sahla, Rif Central, Maroc. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 59, 4, 495-514.
- Ouallali A., Moukhchane M., Aassoumi H. *et al.* 2016. The Mapping of the Soils' Degradation State by Adaptation the PAP/RAC Guidelines in the Watershed of Wadi Arbaa Ayacha, Western Rif, Morocco. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4, 07, 77-88.
- Ousmana H., El Hmadi A., EL Abassi M. *et al.* 2014. Estimation de l'érosion potentielle par la méthode PAP/CAR du bassin versant des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh au Nord du Moyen Atlas central marocain. *2nd International conference of GIS Users*. Faculté des Sciences, Meknès, 757-761.
- PAP/CAR 1998. Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1. Split, *Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE)*, en collaboration avec la FAO, p: XII+72.
- Pradhan B., Chaudhari A., Adinarayana J. *et al.* 2012. Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environmental monitoring and assessment*, 184, 2, 715-727.
- Raissouni A., Khali Issa L., El Arrim A. *et al.* 2012. GIS-based model to assess erosion sensitivity in Northern Morocco. Laou watershed case study. *International Journal of Geosciences* 3, 610-626. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.33061>
- Rey F., Ballais J. L., Marre A. *et al.* 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes rendus géoscience*, 336, 11, 991-998.
- Sadiki A., Mesrar H., Faleh A. *et al.* 2012. Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique: cas du bassin versant de l'Oued Larbaa, Maroc. *Papeles de Geografia*, 55-56, 179-188.
- Terfous A., Megnounif A. & Bouanani A. 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 14, 2, 173-185.
- Terra spacecraft 2009. NASA. Goddard Space Flight Center. <http://terra.nasa.gov/About/>

Manuscrit reçu le 27/01/2017

Version révisée acceptée le 29/12/2017

Version finale reçue le 30/12/2017

Mise en ligne le 31/12/2017