

Cartographie de l'érosion hydrique par l'approche PAP/CAR: Cas du bassin versant d'Oued Bouhamdane (Nord-est de l'Algérie)

[Mapping of water erosion using the PAP / RAC approach: Case of the Oued Bouhamdane watershed (North-East Algeria)]

Boubaker Khallef¹, Nabil Mouchara², and Khaled Brahamia³

¹Docteur en Aménagement des territoires et environnement, Laboratoire de recherche Ressources Naturelles et Aménagement, Département d'aménagement du territoire, Faculté des sciences de la terre, Université de Badji Mokhtar, BP 12 Annaba, Algeria

²Maitre assistant A, Faculté des Sciences de la nature et de la vie, Département des sciences de la nature et de la vie Université Ibn Khaldoun, Tiaret, Algeria

³Professeur, Laboratoire de recherche Ressources Naturelles et Aménagement, Département d'aménagement du territoire, Faculté des sciences de la terre, Université de Badji Mokhtar, BP 12 Annaba, Algeria

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The present study aims to map areas vulnerable to water erosion by the PAP / RAC method using remote sensing and geographic information systems at the level of the Oued Bouhamdane watershed. The qualitative estimate of water erosion by the PAP / RAC method in this watershed provides a synthetic map of the distribution of erosive states, with 54, 73 % of the total area of the watershed subject to a degree of high and very high erosion. This result shows the value of using remote sensing technology and GIS in the assessment of vulnerability to erosion in watersheds.

KEYWORDS: PAP / RAC method, remote sensing and GIS, watershed, Oued Bouhamdane, Algeria.

RESUME: La présente étude vise de cartographier les zones vulnérables à l'érosion hydrique par la méthode PAP/CAR à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique au niveau du bassin versant de l'Oued Bouhamdane l'estimation qualitative de l'érosion hydrique par la méthode PAP/CAR au niveau de ce bassin versant fournit une carte synthétique de la répartition des états érosifs, avec 54, 73% de la surface totale du bassin versant soumis à un degré d'érosion élevé et très élevé. Ce résultat montre l'intérêt de l'utilisation de la technologie de la télédétection et des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion dans les bassins versants.

MOTS-CLEFS: Méthode PAP/CAR, télédétection et SIG, Bassin versant, Oued Bouhamdane, Algérie.

1 INTRODUCTION

Le phénomène de l'érosion hydrique est la forme de dégradation physique des sols qui touche les zones côtières méditerranéennes tout en entraînant des pertes considérables du sol, particulièrement les zones caractérisées par des pentes moyennes à fortes [1], [2], [3]. L'érosion résulte des interactions entre les facteurs bioclimatiques représentées par la nature torrentielle des pluies, la vulnérabilité des terrains, et l'impact des interventions humaines [4]. Dans les zones agricoles, les

eaux de ruissellement associées aux fortes précipitations entraînent l'érosion du sol, ils emportent les éléments fertiles du sol et creusent des profondes ravines, ce qui provoque une diminution de la productivité des terrains agricoles [5]. Les particules transportées par l'érosion hydrique peuvent causer des problèmes tels que le colmatage et l'envasement des cours d'eau et des barrages [6] et la réduction de la qualité des eaux de surface.

D'un point de vue écologique, nous assistons à la dégradation des milieux, qui se reflète par la faible biodiversité et la diminution de la productivité des forêts [7]. De nos jours, La résolution du problème de l'érosion nécessite une méthodologie convenable pour son étude et une gestion durable des ressources naturelles. Plusieurs outils de cartographie tels que la télédétection et les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) ont été développés et sont devenus très utiles pour le traitement, la gestion et la manipulation des données géographiques, et donc l'étude des phénomènes de surface ainsi que la prise de décisions.

Les conditions climatiques, et socio-économique du bassin versant de l'oued Bouhamdane, qui fait l'objet de notre travail, sont favorables pour provoquer une dégradation du sol, d'où la nécessité d'évaluer cette érosion pour réduire ces effets négatifs. Le choix d'appliquer le modèle PAP/CAR pour évaluer l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Bouhamdane est basé sur les avantages de ce modèle dont sa faible exigence en données de mesures. Les différents travaux d'application du modèle PAP/CAR au Maroc [7] et en Tunisie [8] encouragent l'utilisation du modèle PAP/CAR). La deuxième raison est le fait que l'érosion hydrique dans ce bassin a été étudiée en appliquant d'autres modèles [9], mais le modèle le PAP/CAR n'a pas été utilisé pour ce bassin versant.

L'objectif de cette étude, est d'identifier les terrains potentiellement exposés aux problèmes d'érosion dans le bassin de l'oued Bouhamdane en se basant sur la cartographie qualitative à l'aide de la télédétection et du SIG, et en adoptant le modèle PAP/CAR qui porte sur la superposition et l'analyse des facteurs causaux dans l'érosion hydrique, tels que la pente, la nature des matériaux et le couvert végétal (Ousmana et al, 2014). Le produit final de cette cartographie est la mise en évidence de l'état érosif du bassin de l'oued Bouhamdane. Une autre étape peut être mise en œuvre à savoir déterminer les zones qui nécessitent une intervention et proposer des moyens pour lutter contre le phénomène de l'érosion.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 LE PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'Oued Bouhamdane est un affluent important de la Seybouse. Il prend naissance dans les Hautes Plaines semi-arides, sur le revers méridional de l'Atlas Tellien, et résulte de la jonction de deux cours d'eaux importants ; l'Oued Sabath et l'Oued Zenati. Il est situé au Nord-est de l'Algérie et occupe la partie Ouest de la wilaya de Guelma, il fait partie du bassin versant de la Seybouse. Il est limité au Nord par le bassin des Côtiers Constantinois, au Sud et Sud-est par le bassin de l'Oued Cherf, à l'Est par le bassin moyen de la Seybouse et à l'Ouest par le bassin du Kebir Rhumel (Fig.1).

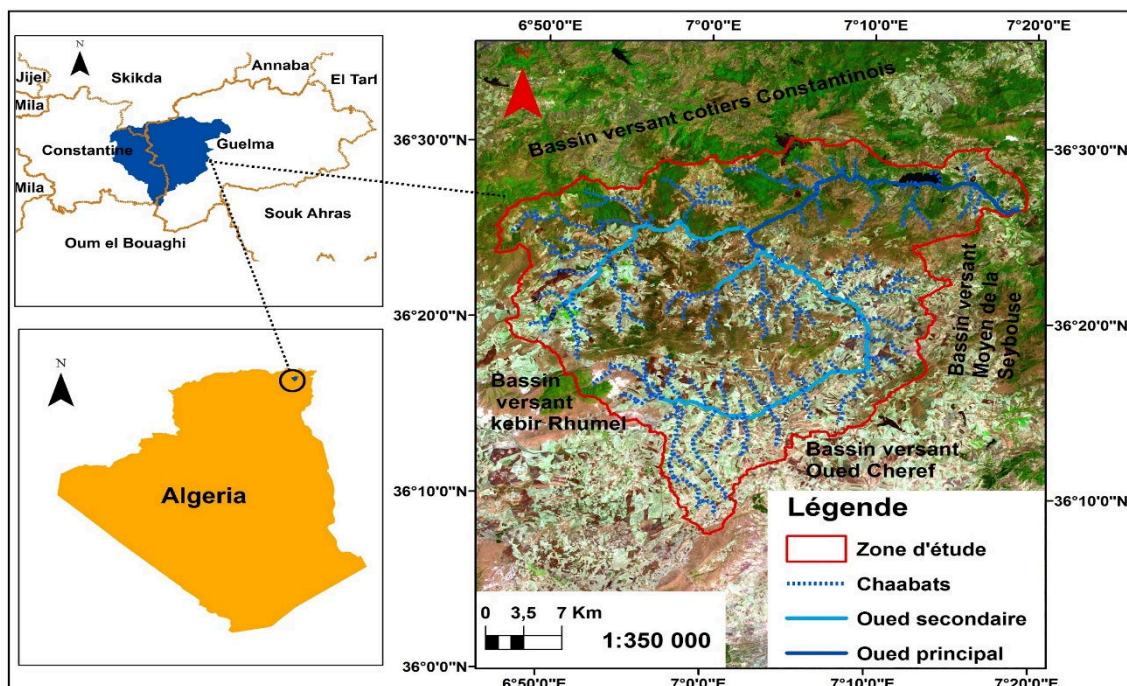


Fig. 1. Situation géographique du bassin versant d'Oued Bouhamdane

Il présente une forme allongée et occupe une superficie de 1105 Km². Son indice de compacité de Gravelius Kc est égal à 1,72. Il est drainé par l'Oued de Bouhamdane et ses affluents. La topographie du périmètre d'étude est caractérisée par une variation altitudinale importante, allant de 997 m à 1237m à djebel Oum Settas.

Du point de vue lithologique, le bassin versant de l'Oued Bouhamdane englobe une multitude de formations lithologiques composée principalement par; les grès numidiens, les argiles, les marnes, les calcaires, les marno-calcaires, les schistes, les conglomérats et les formations superficielles (Fig.2). Ces faciès allant du quaternaire au Trias, présentent des variations de résistance de faciès allant des roches les plus dures représentées par les roches de calcaires et gréseuses, aux roches les plus tendres argileuses [9].

Le climat de la zone d'étude est de type méditerranéen caractérisé par un hiver froid pluvieux et un été sec et chaud. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 644 mm à 932 mm. Les mois les plus pluvieux sont Janvier, Février et Mars, totalise 237, 63 mm, avec un maximum pluviométrique qui atteint la valeur de 81, 92 mm enregistrée pendant le mois de février pour la période 2009-2017. La température moyenne est de 18 °C, la température moyenne minimale est de 4, 68 °C en Février, tandis que la moyenne maximale égale à 36, 81 °C pour le mois de Juillet. L'occupation des sols est représentée essentiellement par une végétation naturelle sous forme des forêts et maquis, parcours, terres agricoles, sol nu et urbain.

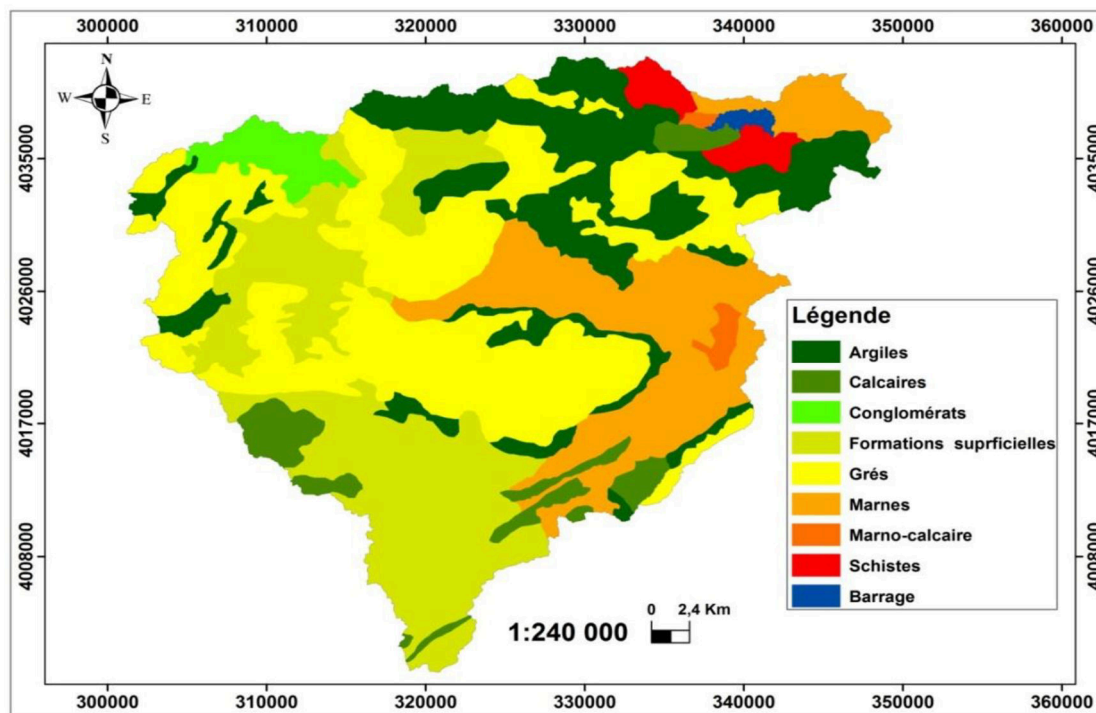


Fig. 2. Carte des formations lithologiques du bassin versant de l'Oued Bouhamdane

2.2 MATÉRIELS ET DONNÉES UTILISÉS

L'application du modèle PAP/CAR pour cartographier la sensibilité à l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant d'Oued Bouhamdane, nécessite des données relatives à la topographie, à la géologie, au couvert végétal et aux observations effectuées sur le terrain.

Aussi, on a eu recours à:

- Une image Aster GDEM de résolution de 30 m du 17/11/2011
- Une image Sentinel 2 du 11 juillet 2018 de résolution de 10 m (Bande spectrales utilisées 2, 3, 4 et 8).
- Une image du support Google Earth de l'année 2019 visualisée directement à l'écran.
- Une carte géologique au 1/50.000^e établie par l'institut national de cartographie et de télédétection.

Le prétraitement et le traitement des images ont été effectués sous logiciel ENVI 5.1, alors que l'analyse, la combinaison de toutes les données et l'application du modèle ont été effectuées avec le logiciel arcgis 10.2.2. La résolution de travail est de 30 m et le système de projection appliqué à toutes nos données est Transverse Mercator zone 32N.

2.3 PRÉSENTATION DU MODELE PAP/CAR

La méthode PAP/CAR (Programme d'Activité Prioritaire/ Centre d'Activités Régionales) est un ensemble de directives pour la formulation d'un programme de lutte antiérosive. Dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM), de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [8].

La Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique par les directives PAP/CAR est présentée selon l'organigramme suivant.

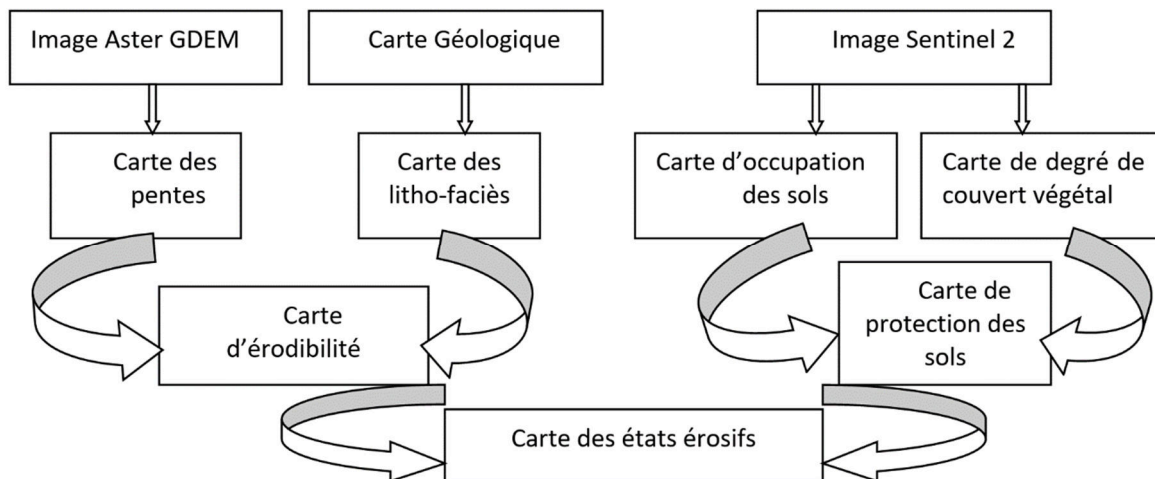


Fig. 3. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique par les directives PAP/CAR

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'application du modèle PAP / CAR, pour l'estimation qualitative de l'érosion de l'érosion hydrique, nécessite à la réalisation des cartes suivantes:

3.1 LA CARTE DES PENTES

La pente est l'un des facteurs clés utilisés pour l'évaluation de la sensibilité des terres à l'érosion. Elle donne aux eaux de ruissellement l'énergie nécessaire pour l'arrachement des particules, le creusement des rigoles et des ravins, surtout lorsque le sol n'est pas totalement couvert [8]. Pour toutes ces raisons, il est primordial de bien connaître, et cartographier les différentes classes des pentes de la zone d'étude. La carte des pentes du bassin versant de l'Oued Bouhamdane (Fig.4) a été générée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Cette carte a été classifiée selon les directives du PAP/CAR.

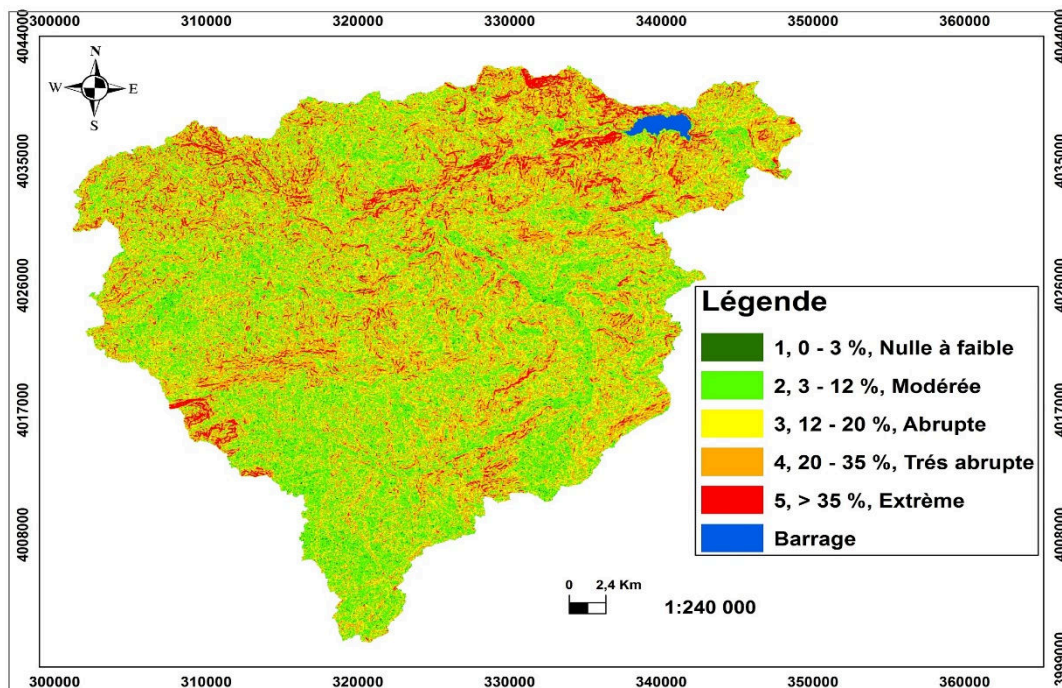


Fig. 4. Carte des pentes

Le tableau 1 montre que le bassin versant de l'Oued Bouhamdane est caractérisé par une prédominance des pentes modérées (345, 21 km²) et abruptes (340, 83 km²) qui représentent respectivement 31, 24 % et 30, 84 % de la superficie globale du bassin, avec une localisation équilibrée sur la totalité de la surface du bassin versant. La classe des pentes très abruptes (20 %-35 %) est également importante avec 315, 5 km² soit 28, 55 % de la superficie totale. La classe des pentes extrêmes (>35 %) s'étale sur une superficie de 75, 10 km² soit 6, 80 % de la zone d'étude, et les 2, 57 % restant représentent les zones à pente nulle à faible (0-3 %) qui occupent une superficie de 28, 36 km².

Tableau 1. Superficies par classe de pentes

Strates	Classes	Code	Superficies (km ²)	Pourcentage (%)
Nulle à faible	(0-3%)	1	28, 36	2, 57
Modérée	(3%-12%)	2	345, 21	31, 24
Abrupte	(12% 20%)	3	340, 83	30, 84
Très abrupte	(20%-35%)	4	315, 5	28, 55
Extrême	(>35%)	5	75, 10	6, 80
Total			1105	100

3.2 LA CARTE DES LITHO-FACIÈS

La carte des litho-faciès identifie les différents types de roches ou de sédiments/sols de surface en fonction de leur degré de résistance mécanique et classés selon le degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion [8]. La démarche est basée sur le géoréférencement de la carte des litho-faciès établie par l'institut national de cartographie et de télédétection suivie par la digitalisation des différents types de litho-faciès qui couvrent la zone d'étude.

La carte établie (Fig.5) montre les différents types de roches ou de sédiments/sols de surface, et renseigne sur le degré d'érodibilité des formations géologiques classées selon leur degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion du sol:

- Les roches très résistantes sont représentées par un faciès lithologique composé de calcaires et de conglomérats.
- Les roches résistantes sont constituées d'un faciès composé de grès.
- Les roches moyennement résistantes sont constituées de schistes et de marno-calcaires.
- Les roches faiblement résistantes sont constituées essentiellement de marnes.
- Les roches très faiblement résistantes sont représentées par un faciès lithologique composé d'argile et de formations superficielles.

La figure 5 montre la répartition des terrains, codée en fonction de leur degré de friabilité et de leur résistance mécanique répartis en 5 classes selon le modèle PAP/CAR.

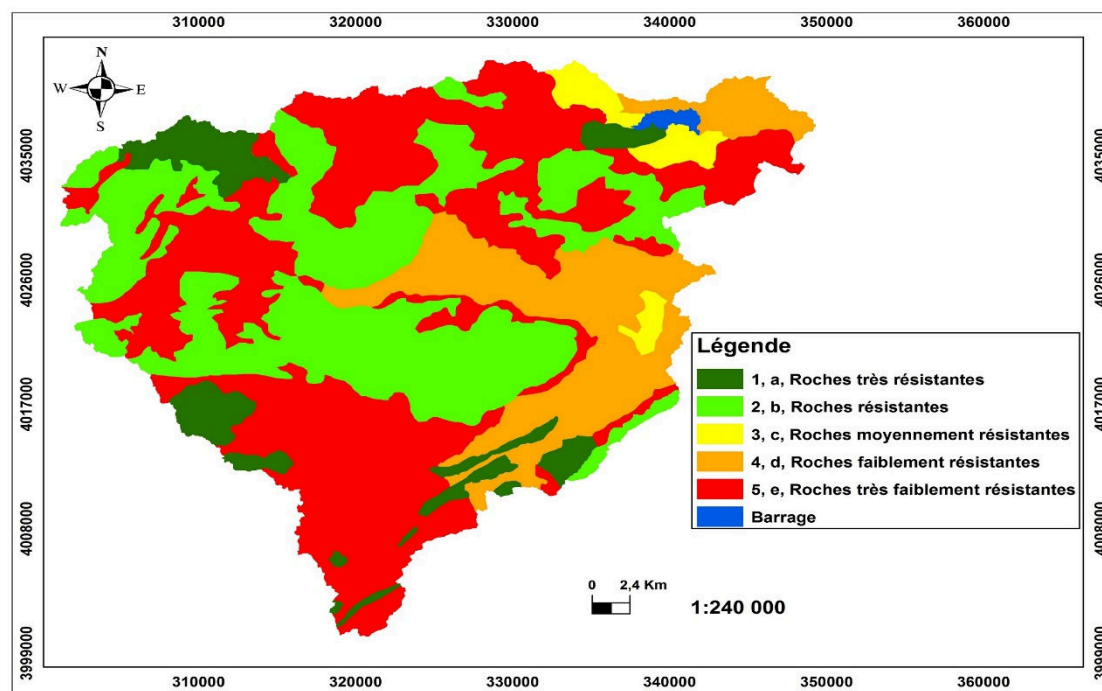


Fig. 5. Carte lithos-faciés

La répartition spatiale représentée par la figure 5, ressort que les roches à très faible résistance (e) occupent presque la moitié du bassin-versant, s'étendent sur une superficie de 452, 49 km² représentant 40, 95 % de la superficie totale, et se localisent beaucoup plus au Nord et au Sud du bassin versant. Les roches résistantes (b) occupent 357, 07 km² soit 32, 31 % de la superficie totale du bassin et se localisent dans le centre. Ensuite, les roches faiblement résistantes (d) occupent une superficie de 181, 7km² représentant 16, 44 % de la superficie totale. Les roches très résistantes (a) n'occupent que 7, 45 % de la superficie totale. Une surface beaucoup moins importante est occupée par les roches moyennement résistantes (c) qui s'étalent sur une superficie de 31, 39 km², représentant 2, 84 % de la superficie totale du bassin versant de l'Oued Bouhamdane et sont localisées dans la partie Nord-ouest.

Tableau 2. Superficies par classe de résistance à l'érosion des sols

Strates	Code	Superficies (km ²)	Pourcentage (%)
Roches très résistantes (a)	1	82, 35	7, 45
Roches résistantes (b)	2	357, 07	32, 31
Roches moyennement résistante (c)	3	31, 39	2, 84
Roches à faible résistance (d)	4	181, 7	16, 44
Roches à très faible résistance (e)	5	452, 49	40, 95
Total		1105	100

3.3 LA CARTE D'ÉRODIBILITÉ

L'érodibilité d'un sol exprime la sensibilité du sol à l'érosion hydrique en fonction de sa composition, sa structure et sa texture. L'érodibilité est également définie à partir de la carte des litho-faciés en fonction de la nature des roches et de leur résistance à l'érosion. La carte d'érodibilité est réalisée à partir de la superposition de la carte des pentes et de celle des litho-faciés (Fig.6) selon la matrice d'érodibilité des sols du modèle PAP/CAR [7].

Tableau 3. Matrice d'érodibilité des sols selon le model PAP/CAR

Classe des pentes	Classe de litho-faciès				
	1 (a)	2 (b)	3 (c)	4 (d)	5 (e)
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	3	3
3	2	2	3	4	4
4	3	3	4	5	5
5	4	4	5	5	5

Les polygones résultant du produit croisé des deux tables (classe des pentes et celle des litho-faciès) sont classés selon les directives du modèle PAP/CAR pour hiérarchiser le terrain en fonction du degré d'érodibilité selon le tableau suivant:

Tableau 4. Degrés d'érodibilité selon le modele PAP/CAR

Classe	Degrés d'érodibilité
1	Faible (EN)
2	Modérée (EB)
3	Moyenne (EM)
4	Forte (EA)
5	Extrême (EX)

La Figure 6 permet de visualiser les différentes zones classifiées en cinq classes d'érodibilité selon les directives du PAP/CAR présentées dans le tableau 5.

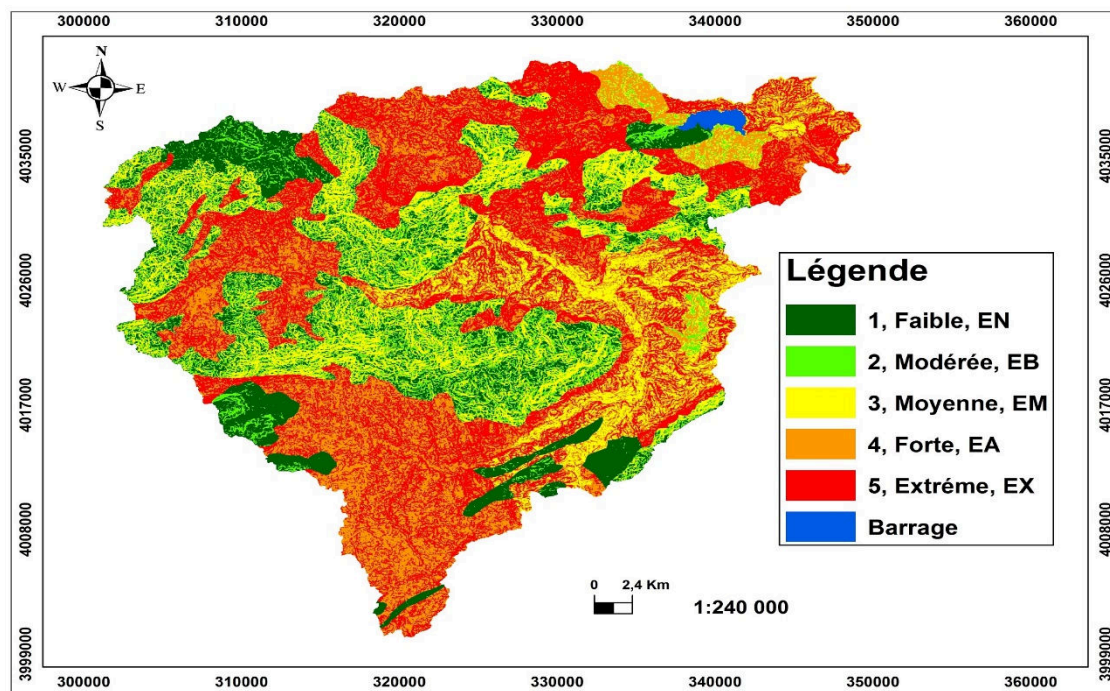


Fig. 6. Carte d'érodibilité

D'après le tableau 5 et la carte d'érodibilité (Fig.6), on constate que 30, 53 % de la superficie du bassin versant de l'Oued Bouhamdane sont caractérisés par une érodibilité extrême (EX) relative à des zones où les matériaux sont très faiblement résistants, suivis par des sols à érodibilité forte (EA) qui occupent 250, 20 km² (22, 64 %) de la superficie totale du bassin

versant. La classe d'érodibilité moyenne s'étend sur une superficie de 214, 55 km² et couvre 19, 42 % de la superficie totale du bassin versant. Les classes d'érodibilité faible (EN) à modérée (EB) s'étendent sur une superficie de 302, 53 km² et affectent 27, 38 % de la superficie totale, ce résultat peut être expliqué par la présence des roches de résistance élevée

Tableau 5. Superficies par classe d'érodibilité

Degrés d'érodibilité	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
Erodibilité faible (EN)	173, 50	15, 70
Erodibilité modérée (EB)	129, 03	11, 68
Erodibilité moyenne (EM)	214, 55	19, 42
Erodibilité forte (EA)	250, 20	22, 64
Erodibilité extrême (EX)	337, 72	30, 56
Total	1105	100

3.4 LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL

L'occupation des sols ou la couverture des sols décrit la couverture biophysique de la surface des terres émergées [10]. Elle distingue plusieurs catégories biophysiques: zones humides, plans d'eau (ruisseaux), sols nus (même si la couverture est insuffisante), zones de végétation (arbres, arbustes, champs, prairies), surfaces dures (rochers, bâtiments) et zones inondables, afin de mieux cibler les zones susceptibles d'être aménagées [11]. La carte d'occupation du sol pour le cas du bassin versant d'Oued Bouhamdane est établie à partir d'une classification supervisée de l'image Sentinel 2 du 11 juillet 2018. Le croisement entre les informations acquises lors des prospections du terrain et les résultats issus de l'interprétation visuelle de l'image satellitaire a permis de réaliser une carte d'occupation du sol classifiée selon les directives du modèle PAP/CAR (Fig.7, Tableau 6).

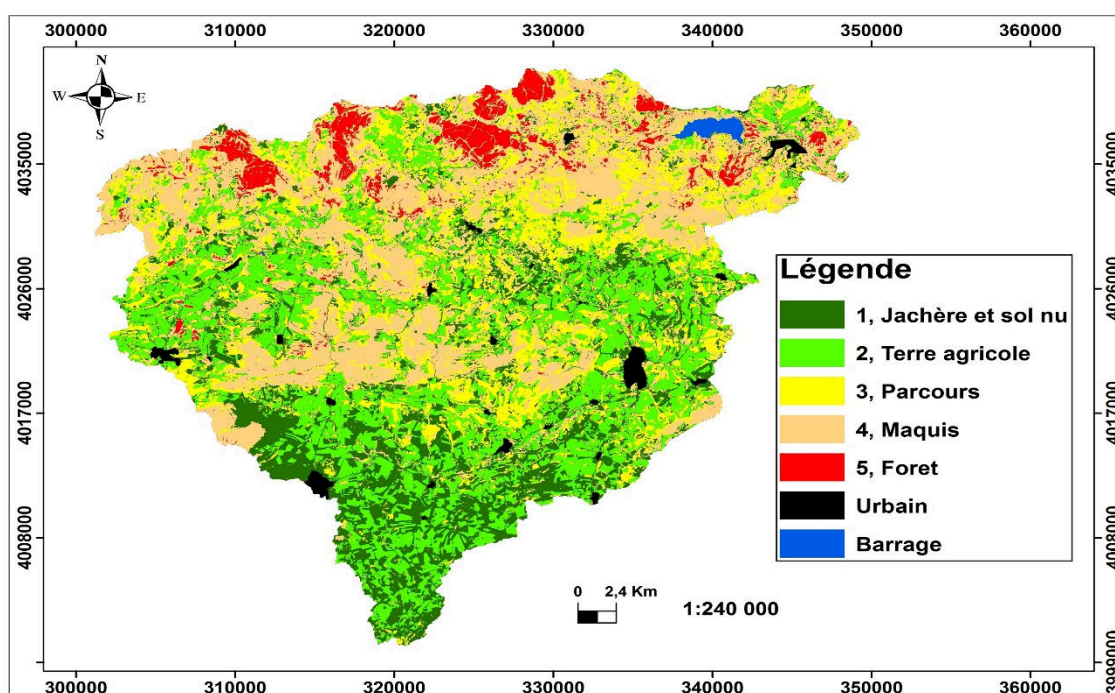


Fig. 7. Carte d'occupation du sol

Selon la carte des unités d'occupation du sol et le tableau 6, les zones protégées qui ont une couverture végétale plus ou moins dense et permanente, sont représentées particulièrement par les forêts de chêne-liège et chêne zeen avec une superficie de 48, 90km², soit 4, 43 % de la surface totale de la zone d'étude, et se localisent généralement au Nord du bassin versant. La majorité de la superficie de la zone d'étude est recouverte par des maquis qui s'étalent sur une superficie de 306,

90 km², soit 27, 77 % de la superficie totale du bassin versant où la pente est assez élevée. Cette classe d'occupation du sol regroupe toutes les terres qui ont des formations végétales de type méditerranéen, ce sont le courtage de chêne liège (Bruyère, Latifolia, Ciste, Epineux...etc). Les zones de parcours totalisent une superficie de 242, 83 km² soit 21, 98 % du bassin versant, elles sont réparties sur des pentes moyennes à fortes, et sont moyennement protectrices contre l'érosion du sol. Les zones de terres agricoles, jachère et sols nus qui se trouvent au Sud, au Nord-ouest et aussi au Sud-est du bassin versant et les plans d'eau sont les plus faiblement protégées contre l'érosion du sol.

Tableau 6. Superficies par classe d'occupation de sol

Type de sol	Code	Superficie (km2)	Pourcentage (%)
Jachère et sol nu	1	208, 50	18, 87
Terre agricole	2	280, 01	25, 34
Parcours	3	242, 83	21, 98
Maquis	4	306, 90	27, 77
Forets	5	48, 90	4, 43
Urbain	Non classé	13, 46	1, 22
Barrage	Non classé	4, 41	0, 40
Total		1105	100

3.5 LA CARTE DE DEGRÉ DE COUVERT VÉGÉTAL

Le couvert végétal joue un rôle important dans le maintien de la résistance des sols, il permet une bonne conservation du sol et de l'eau. La carte de densité de recouvrement du bassin versant d'Oued Bouhamdane a été réalisée à partir de l'image satellitaire sentinel-2 du 11 juillet 2018 avec une résolution de 10 m. Cet indice se calcule par la différence entre la réflectance du rouge (R) et du proche infrarouge (PIR), sa formule est donnée par l'expression suivante: $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$

Les bandes de l'image sentinel-2 utilisées dans le calcul de l'indvi sont le rouge (B4) avec une résolution de 10m, et le proche infrarouge (b8a) avec une résolution de 20m. Ces bandes spectrales (B4 et b8a) sont rééchantillonnées à une résolution de 30 m (résolution du travail) pour éviter toute affection des données raster pendant les opérations des calculs.

La carte de l'indice de végétation (NDVI) du bassin d'Oued Bouhamdane (Fig.8), montre que la grande pauvreté du recouvrement végétal dont souffre ce bassin versant, puisque 53, 44 % des terres ont un recouvrement inférieur à 25%, qui correspond aux zones de jachère, sol nu et des terrains agricoles.

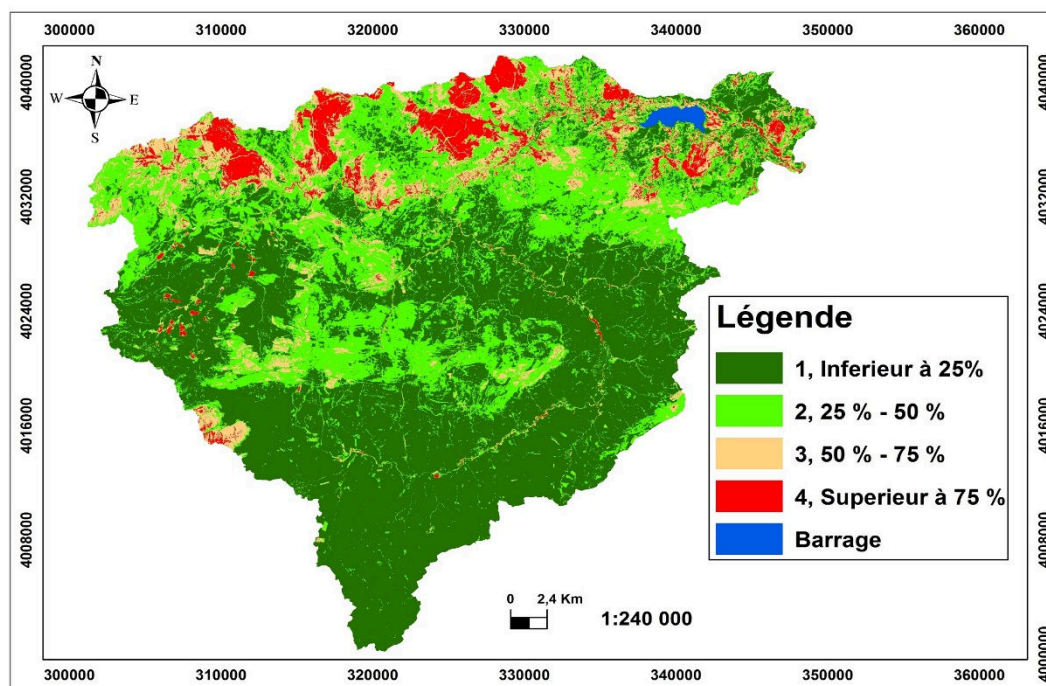


Fig. 8. Carte de degré de couvert végétal

La végétation de densité moyenne occupe 339, 62 km² soit 30, 74 % de la superficie totale, et se localise dans la partie Nord et au centre du bassin versant. La classe de densité (50 %-75 %) occupe 110, 11 km² (9, 96 % de la superficie totale du bassin versant). La surface qui reste concerne la classe de végétation (>75%), s'étend sur une faible superficie de 64, 79 km² (5, 86 %). Cette classe correspond aux zones de forêts où la végétation est très dense.

Tableau 7. Superficie par classes du degré de couvert végétal

Densité de recouvrement	Code	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
< 25 %	1	590, 48	53, 44
25% - 50%	2	339, 62	30, 74
50% - 75%	3	110, 11	9, 96
> 75 %	4	64, 79	5, 86
Total		1105	100

3.6 LA CARTE DE PROTECTION DES SOLS

Les sols sont protégés par la végétation. Cette dernière permet de lutter contre le ruissellement et l'ablation, par la réduction de l'énergie des agents érosifs, tel que l'énergie des gouttes de pluie et le ruissellement, mais l'effet de celle-ci peut être différent selon les formations végétales [12]. Le degré de protection des sols est fonction du type d'occupation de ce sol et de la densité du recouvrement végétal. L'élaboration de la carte de protection des sols se base sur la superposition de la carte de l'occupation du sol et celle de la densité de recouvrement par le couvert végétal selon la matrice de protection des sols du modèle PAP/CAR.

Tableau 8. Matrice de protection des sols selon PAP/CAR

Occupation du sol	Couvert végétal			
	1	2	3	4
1	5	5	4	4
2	5	5	4	4
3	3	2	1	1
4	4	3	2	1
5	5	4	3	2

Les différentes classes de la protection des sols sont présentées dans le tableau suivant selon les directives du modèle PAP/CAR.

Tableau 9. Classes du degré de protection des sols selon le modèle PAP/CAR

Classe	Degrés de protection des sols
1	Très élevé
2	Elevé
3	Moyen
4	Faible
5	Très Faible

La superposition de la carte d'occupation et du sol et a carte de degré de couvert végétal ont permet de détecter les zones selon leur degré de protection (Tableau 10). La figure 9 permet de visualiser les différentes zones divisées en cinq classes de protection.

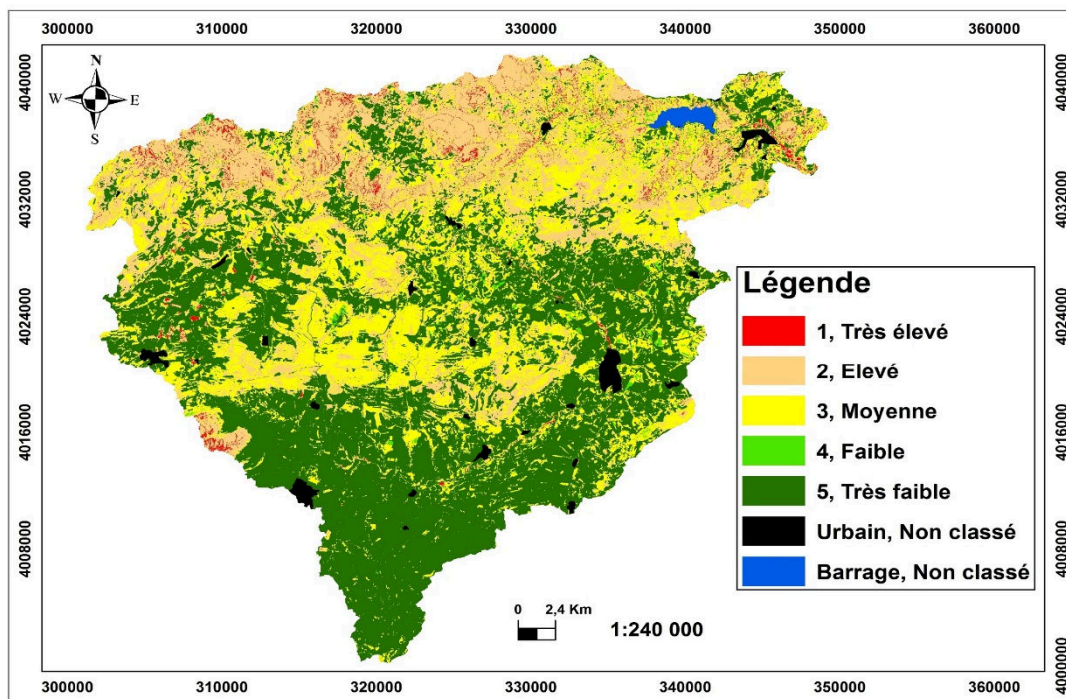


Fig. 9. Carte de protection des sols

La carte des classes de protection du sol (Fig.9) montre que les zones à protection des sols très faible couvrent la plus grande partie du bassin versant soit 44, 85 % de la superficie totale, et se trouvent au Nord-est, au Nord-ouest et en aval du bassin versant, au niveau des zones qui sont occupées par des sols nus, des terres agricoles, de la jachère et une pente faible (<12%). La classe de protection moyenne s'étale sur une superficie de 296, 37 km² (26, 82 %) au Nord et au centre de la zone d'étude. Les zones à protection élevée couvrent 274, 19 km² soit 24, 81 % de la superficie totale, et correspondent aux forêts. La classe de protection très élevée occupe 23, 89 km² soit 2, 16 % de la superficie totale. La partie qui reste concerne la classe de faible protection, occupe 14, 91 km² soit 1, 35 % de la superficie totale du bassin versant. Ceci s'explique par une couverture végétale faible. La moitié du nord correspond aux zones à protection moyennement élevée à élevée (51, 63 %) alors que la moitié du sud correspond aux zones à protection faible et très faible (46, 2 %).

Tableau 10. Superficies par classes de protection des sols

Classe de protection	Superficie (km ²)	Pourcentage (%)
Protection très élevée	23, 89	2, 16
Protection élevée	274, 19	24, 81
Protection moyenne	296, 37	26, 82
Protection faible	14, 91	1, 35
Protection très faible	495, 64	44, 85

3.7 LA CARTE DES ÉTATS ÉROSIFS

La carte des états érosifs (Fig.10) est le produit final de l'approche prédictive du modèle PAP/CAR, et résulte de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte de protection des sols selon la matrice des états érosifs des sols du modèle PAP/CAR (Tableau 11).

Tableau 11. Matrice des états érosifs des sols selon PAP/CAR

Degrés de protection des sols	Degrés d'érodibilité				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	3	4
3	1	2	3	4	4
4	2	3	3	5	5
5	2	3	4	5	5

Les différentes classes des états érosifs des sols sont présentées dans le tableau 12 selon les directives du modèle PAP/CAR.

Tableau 12. Les classes des états érosifs selon le modèle PAP/CAR

Classe	Degrés des états érosifs
1	Très faible
2	Faible
3	Moyen
4	Élevé
5	Très élevé

La carte des états érosifs (Fig.10) fait apparaître cinq classes représentatives des degrés d'érosion. Le traitement statistique de carte a permis de sortir les informations résumées dans le tableau 13.

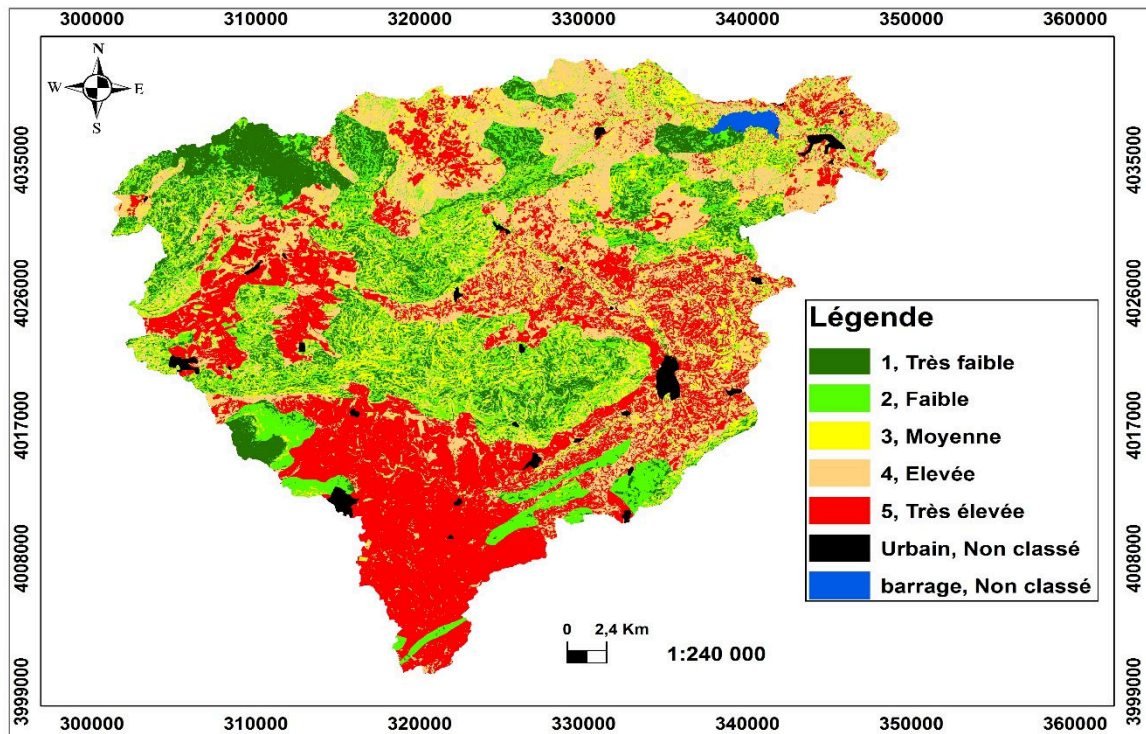


Fig. 10. Carte des états érosifs

À partir du tableau 13 et de la figure 10, il ressort que la classe la plus représentée est celle de l'érosion très élevée avec 321, 89 km² soit 29, 13 % de la superficie totale du bassin versant. Cette zone est caractérisée par des pentes faibles à modérées, un couvert végétal plus ou moins abondant et des terrains à érodibilité extrême (très forte). En ce qui concerne la classe du degré d'érosion élevé, elle occupe 283, 54 km² soit 25, 66 % de la superficie totale du bassin versant, essentiellement vers le nord et aussi vers sa partie Nord-est où le couvert végétal est inférieur à 50 %, et/ou les roches sont caractérisées par une faible résistance. Les classes à risque d'érosion très faible et faible occupent 145, 14 km² et 195, 47 km² respectivement, ce qui fait 30, 38 % de la superficie totale lorsqu'on les regroupe, et se localisent au centre et au Nord-ouest du secteur d'étude. La partie qui reste concerne la classe de l'état érosif de degré moyen et représente 158, 96 km² soit 14, 39 % de la superficie totale du bassin versant d'Oued Bouhamdane.

4 CONCLUSION

L'étude qualitative de l'érosion par la méthode PAP/CAR, basée sur les facteurs naturels (pente, litho-faciès, couvert végétal et occupation des sols) a permis d'analyser et d'identifier les zones à risque d'érosion dans le Bassin versant de l'Oued Bouhamdane. La carte d'érodibilité qui résulte de la superposition de la carte des pentes et celle de litho-faciès montre que 53, 2 % du bassin versant étudié présente une érodibilité forte à extrême. Cependant, la carte de protection montre que 51, 63 % de la superficie totale du bassin présente une protection moyenne à élevée, et que 46, 2 % de la superficie totale est mal protégée (protection faible à très faible). La carte des états érosifs montre que 54, 73% de la superficie totale du bassin versant de l'Oued Bouhamdane présente une érosion élevée à très élevé, et que 32, 08 % de la superficie totale présente une érosion faible à moyenne. Les 13, 14 % restent présentent une érosion faible. Les zones les plus menacées par le risque d'érosion se situent beaucoup plus dans la partie sud du bassin versant de l'Oued Bouhamdane et le long de l'Oued Zenati ce qui confirme le rôle important de la pente, la lithologie, et la couverture végétale dans la protection du sol contre l'érosion hydrique.

REFERENCES

- [1] Tadrict. N, Debauche. O, Remini. B, Xanthoulis. D, Degré. A, " Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne : cas du barrage de Boukourdane (Algérie). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2016 20 (4), 453-467, 2016.
- [2] Pautrot. C, " Érosion et dégradation des sols. Mémoires de l'Académie Nationale de Metz – 2012, France, pp 203-221.2012.
- [3] Armand.R, "Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, France, 205 P. 2009.
- [4] El Aroussi1. O, El Garouani, A, Jabrane.R, "Modelling and mapping of soil erosion on the Oued El Malleh catchment using remote sensing and GIS. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.7, n.2 p. 302-307, 2013.
- [5] Le Bissonnais.Y, "Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion: la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés. *Ingénieries - E A T, IRSTEA.* P. 27 - pp. 36. Hal-00464065.2000.
- [6] Le Gall.M, "Traçage des sources de sédiments à l'amont des hydrosystèmes agricoles: apport de la géochimie élémentaire, du rapport 87Sr/86Sr et des radionucléides. Thèse de doctorat, Université de Paris Saclay, France, 258 P. 2016.
- [7] Ousmana. H, El Hmaidi. A, Essahlaou. A, Bekri. H, El Ouali. A, "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). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2017, n° 39, 103-119.2017.
- [8] Ben Rhouma. A, Hermassi. T, Bouajil. K, "Modélisation de l'érosion hydrique par la méthode qualitative PAP/CAR: Cas du bassin versant de Sbaihia, Zaghuan. *Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology*, 51 (11), 3225-3236.2018.
- [9] Bouguerra. H, " Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risque d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins Bouhamdane et Ressoul (Nord Est Algérien). Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen- Algérie. 140 P.2018.
- [10] Charlotte. P, " Cartographie de l'occupation des sols à partir de séries temporelles d'images satellitaires à hautes résolutions. Thèse de doctorat, l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) pp. 4-261.2017.
- [11] Jarmoni. N, Chahboun. S, "Spatialisation de l'érosion hydrique dans le sous bassin versant m'dez (Partie Sud - Guigou et Maasser) Par application du modèle PAP/CAR, Diplôme de Licence Sciences et Techniques, Université Sidi Mohamed ben Abdellah-Fès - Maroc. Pp. 6-37.2018.
- [12] Hayat. H, "Utilisation du model PAP/CAR et du SIG pour l'évolution et la cartographie de l'érosion hydrique: cas du bassin versant de l'oued Boufekrane. Diplôme de Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, pp. 35-61.2017.