

Table de matière

Introduction générale.....	4
Chapitre I : Revue bibliographique	6
1 Les agents érosifs	7
1.1 La pluie.....	7
1.2 Le ruissellement	8
1.3 La gravité.....	8
2 Effet du climat	9
3 Effet de la végétation.....	9
4 Effet anthropique :.....	9
5 Le facteur sol :.....	10
6 Mécanismes de l'Erosion hydrique	10
7 Types de l'Erosion hydrique	11
7.1 L'érosion hydrique en nappe	11
7.2 L'érosion hydrique linéaire (concentrée) : rigoles, ravines, badlands, tunnels	11
7.3 L'érosion en masse.....	11
Chapitre II : Cadre géographique, socioéconomique, et climatique de la région d'étude.....	12
1 Localisation de la zone d'étude:	13
2 Contexte Socio-Economique	14
2.1 Cadre humain :	14
2.2 Activité économique.....	14
3 Contexte climatique.....	15
3.1 Les précipitations :	15
3.1.1 La variabilité interannuelle des précipitations.....	15
3.1.2 La variabilité saisonnière des précipitations.....	15
3.1.3 La variabilité mensuelle des précipitations	16
3.2 Le régime thermique:	17
3.2.1 La variabilité interannuelle de la température	17
3.2.2 La variabilité mensuelle de la température.....	17
3.3 Les indices climatiques.....	18
3.4 Le diagramme ombrothermique	19
3.5 L'évapotranspiration :	19
3.5.1 L'évapotranspiration potentielle	19
3.5.2 L'évapotranspiration réelle	21

Chapitre III : Géomorphologie, pédologie, géologie et occupation du sol du bassin de l'oued Boufekrane.	22
1 Géomorphologie du bassin de l'oued Boufekrane	23
1.1 Forme du bassin.....	23
1.2 Répartition spatiale des altitudes	24
1.3 Répartition spatiale des pentes	27
2 Pédologie du bassin de l'oued Boufekrane.....	29
3 Géologie du bassin de l'oued Boufekrane	31
4 Occupation du sol du bassin de l'oued Boufekrane	32
Chapitre IV : Application des directives PAP/CAR au niveau du bassin de l'oued Boufekrane.....	35
I. Evaluation de l'érosion hydrique par l'approche PAP/CAR.....	36
1 La phase prédictive :.....	37
1.1 Etape 1 : Élaboration de la carte d'érodibilité par superposition de la carte des pentes et des Litho-faciès.....	37
1.1.1 Carte des pentes.....	37
1.1.2 Carte de Litho-faciès	39
1.1.3 Carte d'érodibilité.....	41
1.2 Etape 2 : Réalisation de la carte de protection des sols par superposition de la carte d'occupation du sol et du degré de recouvrement végétal.	43
1.2.1 La carte d'occupation des sols.....	43
1.2.2 Carte de degré de couvert végétal.....	45
1.2.3 La carte de protection des sols.....	47
1.3 Etape 3 : Etablissement de la Carte des états érosifs par superposition de la carte d'érodibilité et de protection des sols.....	49
2 La phase descriptive, Carte de l'érosion réelle.....	51
3 Phase d'intégration : Carte consolidée d'érosion et carte des tendances.....	53
3.1 Carte consolidée de l'érosion	53
3.2 Carte des tendances de l'érosion hydrique	56
Conclusion Générale	61
Bibliographie	63

Liste des Figures

Figure 1:Etat fragmentaire des sols après travail (a), effet «splash» avec mise en mouvement des particules sous l'action des gouttes de pluie (b), formation d'une croûte sédimentaire de battance (c), ruissellement en nappe et érosion diffuse (d) (Le Gall, 2016).....	8
Figure 2: Carte de situation de la zone d'étude	13
Figure 3:Fluctuation des précipitations annuelles selon la station DRH FES (1984-2014)	15
Figure 4:La variabilité saisonnière des précipitations selon la station DRH FES (1980-2014)	16
Figure 5:Fluctuation des précipitations moyennes mensuelle selon la station DRH FES (1980-2014).....	16
Figure 6:Moyennes des températures annuelles selon la station DRH FES (1983-2013).....	17
Figure 7:Moyennes des températures mensuelles selon la station DRH FES (1983-2013)	18
Figure 8:Diagramme ombrothermique de Gaussen selon la station DRH FES (1983-2013).....	19
Figure 9:Evolution de l'ETP en fonction des mois selon la station DRH FES (1983-2013).....	21
Figure 10:Modèle numérique du terrain de la zone d'étude.	24
Figure 11:Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Boufekrane.	25
Figure 12: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Boufekrane	27
Figure 13:Carte de la distribution spatiale des pentes dans le bassin de Boufekrane	28
Figure 14:Carte pédologique du bassin versant de l'oued Boufekrane	30
Figure 15: Carte géologique du bassin versant de l'oued Boufekrane (carte géologique de sefrou 1/100 000 (1974), carte géotechnique de Fès 1/20 000 (1967)).....	31
Figure 16:Image satellitaire du la zone d'étude (Google Earth(27/4/ 2017)).....	32
Figure 17: Carte de l'occupation du sol du bassin versant de l'oued Boufekrane.....	34
Figure 18:Organigramme des étapes de l'évaluation de l'érosion hydrique par les directives PAP/CAR.....	36
Figure 19:Carte des classes des pentes du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR.....	38
Figure 20:Carte des classes des Litho-faciès du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR.....	40
Figure 21: Carte des classes d'érodibilité des matériaux dans bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR.....	42
Figure 22:Pourcentage de superficie des classes d'érodibilité du bassin l'oued Boufekrane.....	42
Figure 23:Carte des classes d'occupation du sol de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR.....	44
Figure 24:Carte des classes de degré de couvert végétal du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR	46
Figure 25:Carte de protection des sols du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR	48
Figure 26:Pourcentage des degrés de protection dans le bassin de l'oued Boufekrane.....	48
Figure 27:Carte des états érosifs des sols du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR.....	50
Figure 28:Pourcentage des classes du degré des états érosifs dans le bassin de l'oued Boufekrane	50
Figure 29:Cartes des différentes formes d'érosion hydrique dans bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR	52
Figure 30:Pourcentage des formes d'érosion hydrique dans bassin de l'oued Boufekrane	52
Figure 31:Carte consolidée de l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR	55
Figure 32:Pourcentage des formes d'érosion selon leurs degrés d'érosivité.....	55
Figure 33:Carte des tendances de l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR	58
Figure 34:Pourcentages des tendances de l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane.....	59
Figure 35:La carte de la hiérarchisation du bassin de l'oued Boufekrane selon les ordres de priorité.....	60

Liste des tableaux

Tableau 1:Urbanisation de la région Fès-Meknès selon annuaire statistique régionale 2016	14
Tableau 2: Indicateurs de l'agriculture de la région Fès-Meknès 2013-2014 (annuaire statistique régionale 2016).....	14
Tableau 3: Valeurs de l'ETP au niveau de la station DRH FES (1983-2013).....	20
Tableau 4: Répartition des superficies selon les tranches altitudinales.....	26
Tableau 5: Les pourcentages des occupations du sol dans le bassin de l'oued Boufekrane	33
Tableau 6: Distribution des pertes en sol selon l'occupation du sol (Ouazzani, 2008).....	33
Tableau 7:Classes de pentes selon PAP/CAR.....	37
Tableau 8: Classes de Litho-faciès selon PAP/CAR.....	39
Tableau 9:Matrice d'érodibilité des sols	41
Tableau 10: Degrés d'érodibilité selon PAP/CAR.....	41
Tableau 11:Classe d'occupation du sol	43
Tableau 12: Classes du degré de couvert végétal	45
Tableau 13:Matrice de la protection des sols	47
Tableau 14:Classes du degré de protection des sols selon PAP/CAR.....	47
Tableau 15: Matrice des états érosifs des sols selon PAP/CAR.....	49
Tableau 16:Classes des états érosifs selon PAP/CAR.....	49
Tableau 17: Les indications en lettres et en chiffres proposées par PAP/CAR pour désigner les formes et les intensités de l'érosion hydrique	51
Tableau 18:Les différents types d'érosion selon leurs intensités dans le bassin de l'oued Boufekrane	53
Tableau 19:Matrice des tendances à l'érosion selon PAP/CAR.....	56

Liste des abréviations

ABHS : Agence du Bassin Hydraulique du Sebou ;

ASRFM : Annuaire statistique régionale Fès-Meknès ;

AGL : Division de la mise en valeur des terres et des eaux ;

CAR : Centre d'activité régionale ;

CPCS : Commission de Pédologie et de Cartographie des sols ;

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (OAA) ;

INRA : Institut national de la recherche agronomique ;

MHAT : Ministère de l'habitat et de l'aménagement du territoire ;

MNT : Modèle numérique de terrain ;

MGRFM : Monographie générale de la Région de Fès-Meknès ;

PAP : Programme d'action prioritaire ;

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat ;

SCET : La Société Centrale d'équipement du Territoire ;

Introduction générale

L'érosion hydrique est la forme de dégradation physique des sols la plus sérieuse affectant les zones côtières méditerranéennes, ses impacts majeurs sur l'environnement sont le résultat des interactions entre les facteurs bioclimatiques et les interventions humaines écologiquement inadéquates et déstabilisantes (PAP/CAR, 1998).

Dans le contexte agricole, le phénomène d'érosion hydrique provoque une réduction du potentiel de production, par la dégradation mécanique (pertes de terre arable, ravinement des champs) et chimique (lessivage des éléments nutritifs et de la matière organique) des sols (MABIT et al. 2002), de ce fait le Maroc, pays méditerranéen dont l'économie est basée sur l'agriculture, fait face à de nombreuses contraintes qui menacent ces ressources agricoles. En plus de ces pertes en terres engendrées et des dégâts causés aux productions agricoles, les particules transportées par l'érosion hydrique peuvent provoquer d'autres problèmes tels que, la réduction de la qualité de l'eau de surface, le colmatage et l'envasement des cours d'eau et des barrages (Le GALL, 2016).

Le bassin versant de l'oued Boufekrane, objet de cette étude fait partie d'une zone agricole dont les conditions climatiques, et socio-économique sont favorables à provoquer une dégradation du sol, d'où la nécessité d'évaluer cette érosion afin de limiter ces effets négatives. Le choix d'appliquer le modèle PAP/CAR pour qualifier l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane a été basé sur les avantages de ce modèle et sur son adaptation avec les conditions du bassin. La situation de la zone étudiée dans une région méditerranéenne constitue la première preuve qui encourage la validation de l'utilité du PAP/CAR dans ce dernier, la deuxième preuve c'est le fait que l'érosion hydrique dans ce bassin a été traitée par d'autres modèles, jamais traitée avec le PAP/CAR.

L'objectif de ce mémoire est de traiter le problème d'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane, par la cartographie qualitative à l'aide du SIG, en adoptant le modèle PAP/CAR qui portait surtout sur l'intégration des facteurs influençant l'érosion hydrique, tels que la pente, le réseau hydrographique, le type de sol, le matériel lithologique, et le type de couverture végétale. Le produit final de cette cartographie donnera des informations sur l'érosion actuelle sous ses différentes formes, ses intensités et ses tendances évolutives.

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la partie généralité sur l'érosion hydrique ;
- Le second chapitre traite le Cadre géographique, socioéconomique, et climatique de la région d'étude;
- Le troisième traite le cadre Géomorphologique, pédologique, géologique, et occupation du sol du bassin de l'oued Boufekrane;
- Le quatrième détaille les différents résultats de l'Application des directives PAP/CAR dans le bassin de l'oued Boufekrane ;
- Ce travail se termine par une conclusion qui englobe les principaux résultats.

Rapport-Gratuit.com

Chapitre I : Revue bibliographique

I. Aspects théoriques de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique est un phénomène naturel essentiel de l'évolution des paysages et de la modification du relief terrestre. Elle correspond à un déplacement de la matière sous l'action de l'eau. Les flux de matière générés sont transférés sur la surface continentale et conduisent à l'arasement des zones montagneuses et à la formation de riches plaines alluviales. Ce phénomène se déclenche et se développe de différentes manières, selon qu'il affecte des types de cultures ou des espaces géographiques différents. Dans les zones de grandes cultures ou de vignobles, l'érosion ne prendra pas la même forme selon les facteurs : sol, occupation du sol, topographie et climat (LE BISSONNAIS et al., 2002).

1 Les agents érosifs

1.1 La pluie

La pluie est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (LEGUEDOISE, 2003). L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (LE BISSONNAIS, 1988), du détachement des fragments de sol et de leur transfert. Grâce à cette capacité de détachement les particules de sol, l'impact des chutes de pluie forme la première étape du processus d'érosion du sol (QUANSAH, 1981) par un phénomène physique qui s'appelle le «splash», qui se produit lorsqu'une goutte d'eau tombe sur la surface du sol, et forme une couronne avec un bord fin qui, d'abord, développe des ondulations le long de ses bords puis se casse, en provoquant la dégradation mécanique du sol.

La dégradation du sol sous l'action des gouttes de pluie est suivie par un colmatage des pores de la surface. La résultante de ce phénomène est la formation d'un type d'organisation horizontale particulière appelée couramment croûte de battance. La surface du sol a alors un aspect lisse et glacé (LE SOUDER, 1990), ce qui provoque la diminution de sa perméabilité et sa capacité d'infiltration, et participe à la formation du ruissellement.



Figure 1: Etat fragmentaire des sols après travail (a), effet «splash» avec mise en mouvement des particules sous l'action des gouttes de pluie (b), formation d'une croûte sédimentaire de battance (c), ruissellement en nappe et érosion diffuse (d) (LE GALL, 2016).

1.2 Le ruissellement

L'écoulement d'une lame d'eau est un moteur essentiel de l'érosion. Il détache, transporte et exporte des fragments de sol (LE GALL, 2016). Le ruissellement superficiel est généré soit par saturation de la porosité du sol soit par refus à l'infiltration dû à une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol (ruissellement hortonien), (HORTON, 1933).

1.3 La gravité

La gravité est aussi un agent qui participe à la mobilisation et au transfert des particules à la surface du sol, Lorsque la couche de surface est saturée en eau (QUANSAH, 1981). Elle influence aussi l'infiltration de l'eau dans le sol, qui ne dépend pas que de propriétés physico-chimiques du sol, mais aussi de la gravité générée par l'effet de la pente.

2 Effet du climat

Les précipitations influent l'érosion du sol par leur intensité d'une part (intensité traduite par la dissymétrie des précipitations dans l'année), et par leur volume d'autre part, par exemple dans les régions dont l'alimentation pluviale au cours de l'année tend à être répartie uniformément on observe un minimum d'érosion (FOURNIE, 1949). De ce fait la dégradation des sols par érosion hydrique est beaucoup plus intense dans les Climats des régions intertropicales, climats de moussons, climats steppiques et subdésertiques (FOURNIE, 1954).

3 Effet de la végétation

La végétation joue un rôle très important dans la régulation hydrologique des bassins versants, par atténuation des contraintes érosives dues à l'eau (LAVABRE et ANDREASSIAN, 2000), Cette régulation s'effectue par interception des gouttes de pluie, augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol, pompage d'une partie de l'eau contenue dans les sols et restitution dans l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. Elle permet aussi de maintenir les sols grâce aux systèmes racinaire, et par la suite d'améliorer la cohésion des sols et de renforcer leurs propriétés mécaniques ce qui participe à la réduction de l'érosion hydrique de surface.

4 Effet anthropique :

La relation entre l'homme et l'érosion existe depuis des millénaires. Cette relation privilégiée s'est amplifiée lorsque le nomadisme a fait place à la Sédentarisation et à l'exploitation des sols à des fins agricoles (DUCHEMI ,2000).L'activité agricole rend le sol vulnérable à l'action érosive exercée par l'eau et la gravité , parmi les activités qui augmentent la sensibilité des sols à l'érosion hydrique on cite : Le redressement hydraulique en milieu agricole qui brise souvent le Profil d'équilibre des cours d'eau, Les systèmes de canalisation rectilignes qui augmentent la vitesse d'évacuation des eaux de drainage, le type des cultures et leur stade de développement durant l'année (EL HAGE et al. ,2011), La localisation et la forme des champs .

5 Le facteur sol :

La sensibilité du sol à l'érosion hydrique dépend de sa texture, de son profondeur, sa teneur en matière organique, sa perméabilité et sa structure.

Pour évaluer l'érodibilité des sols, il faut tenir compte essentiellement de la texture et de la teneur en matière organique, et sans négliger totalement la profondeur. Les poids attribués aux facteurs retenus sont les suivants (BOU KHEIR, 2001) :

- 40 % pour la texture (texture argileuse, texture argilo-limoneuse; texture limono-argileuse, texture sablo-argileuse, texture sableuse,);
- 40 % pour la teneur en matière organique ;
- 20 % pour la profondeur ;

Selon ces critères, les sols peu épais, pauvres en matière organique et à texture fine, apparaissent fortement érodibles en favorisant le ruissellement et la dégradation du sol (ROOSE et al, 1993).

6 Mécanismes de l'Erosion hydrique

La désagrégation du sol par l'eau résulte de différents mécanismes physiques et physico-chimiques qui peuvent affecter différents niveaux de la structure des sols depuis les interactions entre les particules d'argiles jusqu'aux mottes de terre (LE BISSONNAIS, 2000).

Les différents mécanismes pouvant entraîner la division des agrégats sont (LE BISSONNAIS, 1988):

- diminution de l'effet des forces de liaison entre les polymères par modification du contexte physico-chimique (pH, Température, saturation en sodium ...), et par le gonflement lié à l'hydratation du sol.
- application d'une force de rupture soit, par l'éclatement lié à la pression exercée par l'air piégé au sein de l'agrégat lors de la réhumectation brutale qui provoque une compression des volumes d'air contenus dans le sol, ou bien par une rupture mécanique au choc des gouttes de pluie qui libère l'énergie accumulée durant sa chute en cisillant les agrégats.

7 Types de l'Erosion hydrique

7.1 L'érosion hydrique en nappe

La présence d'une lame d'eau ruisselante répartie sur l'ensemble d'une surface, traduit une dégradation du sol appelée érosion diffuse, érosion en nappe ou encore (Sheeterosion) (LEGUEDOISE, 2003), Il s'agit d'un décapage uniforme de la couche superficielle de terre, qui est le résultat de la dégradation des propriétés physiques de la surface des sols par l'effet splash, en provoquant la formation d'une pellicule de battance, le colmatage des pores, et la diminution de et l'infiltration.

7.2 L'érosion hydrique linéaire (concentrée) : rigoles, ravines, badlands, tunnels

L'érosion linéaire désigne tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.) qui sont des dépressions relativement petites dont l'importance dépend de l'énergie du ruissellement et de la nature du sol. En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise en creusant des formes de plus en plus profondes (ROOSE, 1985).

7.3 L'érosion en masse

L'humectation excessive de couvertures pédologiques sur des versants en équilibre instable et la lubrification d'un plan de glissement, peuvent provoquer deux types de mouvements de masse (ROOSE, 1985):

- Les glissements qui sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement.
- Les Coulées boueuses qui sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante.

Chapitre II : Cadre géographique, socioéconomique, et climatique de la région d'étude

1 Localisation de la zone d'étude:

La présente étude (Fig. 2) s'intéresse à la partie la plus orientale du bassin de Saïs, située dans la région de Fès / Meknès et faisant partie du bassin de Sebou. Le bassin de l'oued Boufekrane fait partie de la plaine de Saïs et correspond sa limite orientale. Il prend son origine près de la ville de Bhalil selon une direction d'écoulement NW-SE et rejoint l'oued Fès en aval à l'entrée de la médina. il est limité au Nord par l'oued Fès, au Sud par les causses moyennes atlasiques tabulaires, à l'Est par la vallée de l'Oued Sebou, et à l'Ouest par Oued El Mehraz (REYNARD et al., 2001).

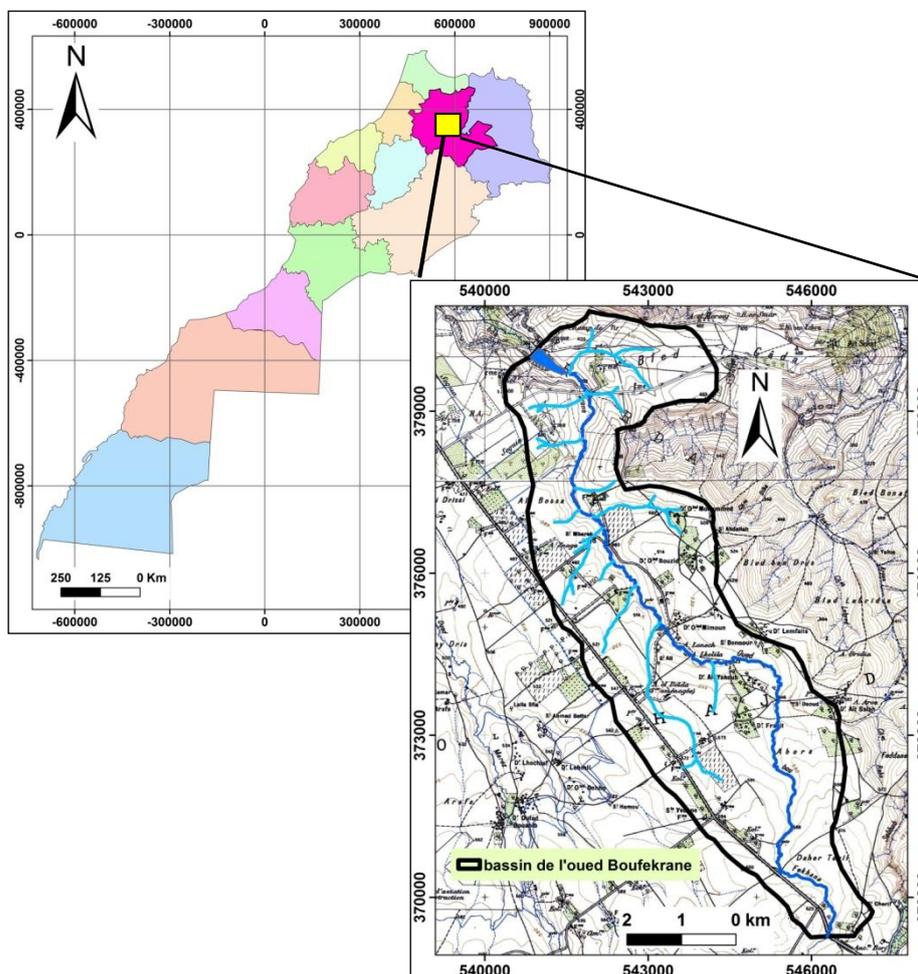


Figure 2: Carte de situation de la zone d'étude

2 Contexte Socio-Economique

2.1 Cadre humain :

La zone d'étude se situe dans la région Fès-Meknès qui s'étend sur une superficie de 40.075 Km², représentant 5,7% de la superficie du Royaume. Selon le RGPH de 2014, de cette région compte 4.236.892 habitants (*contre 3.873.214 en 2004*), soit l'équivalent d'environ 13% de la population totale du pays. La population urbaine de la région est de l'ordre de 2.564.220, représentant 60,5% de sa population totale. La densité est de 105,7 habitants au km² contre environ 47,6 au niveau national (ASRFM, 2016).

Tableau 1:Urbanisation de la région Fès-Meknès selon annuaire statistique régionale 2016

Taux d'urbanisation	60,52 %
Superficie	40 423 Km ²
Densité	105,7 habitant/Km ²

De manière générale, la région est très peuplée puisqu'elle présente une densité de 105,7 habitants au km², ce qui représente plus de deux fois la densité enregistrée au niveau national (47,6hab/ km²) ceci implique une forte pression sur les ressources naturelles de la région.

2.2 Activité économique

Le caractère rural de la région Fès-Meknès et l'importance de la population active qu'elle occupe, rendent l'agriculture le principal secteur de l'économie locale. Il s'agit d'une agriculture axée sur les céréales en alternance avec les légumineuses, et associées à l'arboriculture (amandier, olivier, Figuier...) (ASRFM, 2016). En effet, la superficie agricole utile au niveau de la région Fès-Meknès est estimée à 1.335.639 hectares, soit 15% de la superficie agricole utile nationale. A l'instar de l'agriculture, Fès-Meknès recèle un potentiel de production animale englobant toutes les espèces du Maroc (bovin, ovin, caprin, camelin, équidés) et une longue tradition d'élevage (MGRFM, 2015).

Tableau 2: Indicateurs de l'agriculture de la région Fès-Meknès 2013-2014 (annuaire statistique régionale 2016)

Evolution du Rendement des céréales (Q/ha)	20,29
Evolution du Rendement des Légumineuses (Q/ha)	8,36

La région de Fès-Meknès compte une des zones d'activités industrielles les plus importantes du Maroc. Elle bénéficie de plusieurs atouts susceptibles d'encourager la promotion du secteur (MGRFM, 2015).

3 Contexte climatique

3.1 Les précipitations :

Les précipitations constituent l'un des facteurs majeurs responsables des phénomènes érosifs. Pour cette étude on dispose des données de la station DRH FES N°3817 (X=53540, Y=38480, Z=415) qui nous ont été fournis par l'ABHS.

3.1.1 La variabilité interannuelle des précipitations

Au niveau de la station de FES, les précipitations moyennes annuelles, pendant une série (30 ans) est de 414,3 mm.

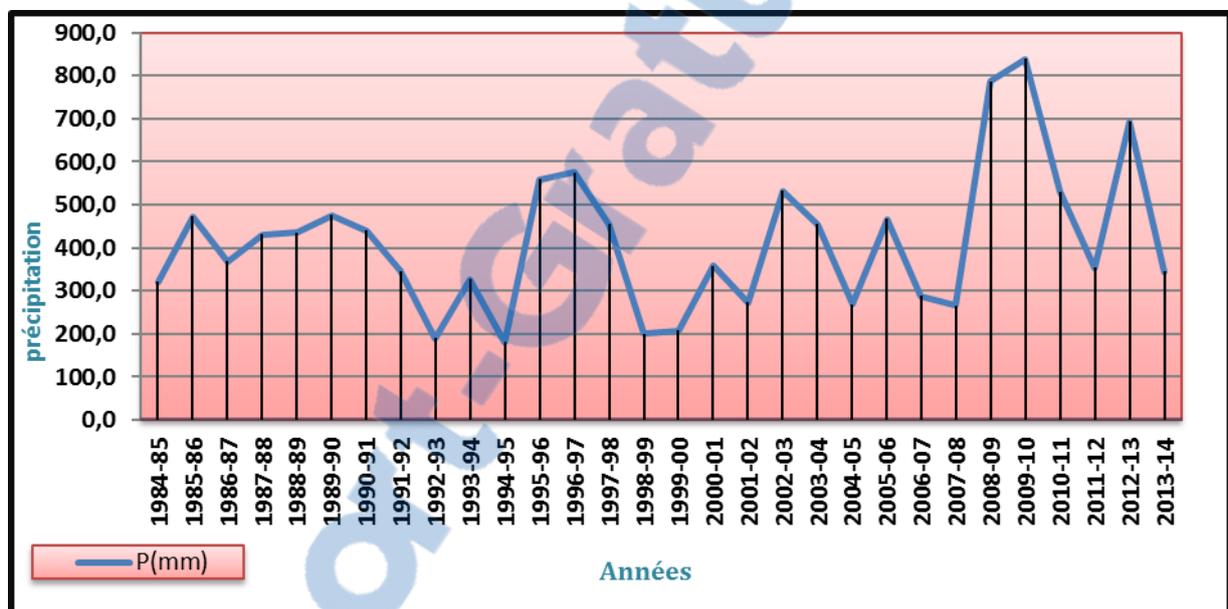


Figure 3: Fluctuation des précipitations annuelles selon la station DRH FES (1984-2014)

Les quantités des précipitations dans la période entre 1984 et 2014 sont très variables. La pluviosité maximale (838 mm) est enregistrée dans l'année (2009-2010), tandis que la valeur minimale (181 mm) de pluviosité est enregistrée dans l'année (1992-1993) (Fig.3).

3.1.2 La variabilité saisonnière des précipitations

Les données de précipitation de la station DRH FES (1980-2014) montrent que le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons dans l'année : un été chaud et sec succède une saison relativement pluvieuse et fraîche.

La saison la plus pluvieuse est l'Hiver avec une valeur de 40,7% de la quantité totale précipitée, alors que la saison d'Été est la plus sèche avec seulement 2,3%. Les saisons du

Printemps et d'Automne présentent respectivement 29,5% et 27,5%, Ce qui donne un régime saisonnier de précipitations de type: H, P, A, E. (Hiver, Printemps, Automne, Eté) (Fig. 4).

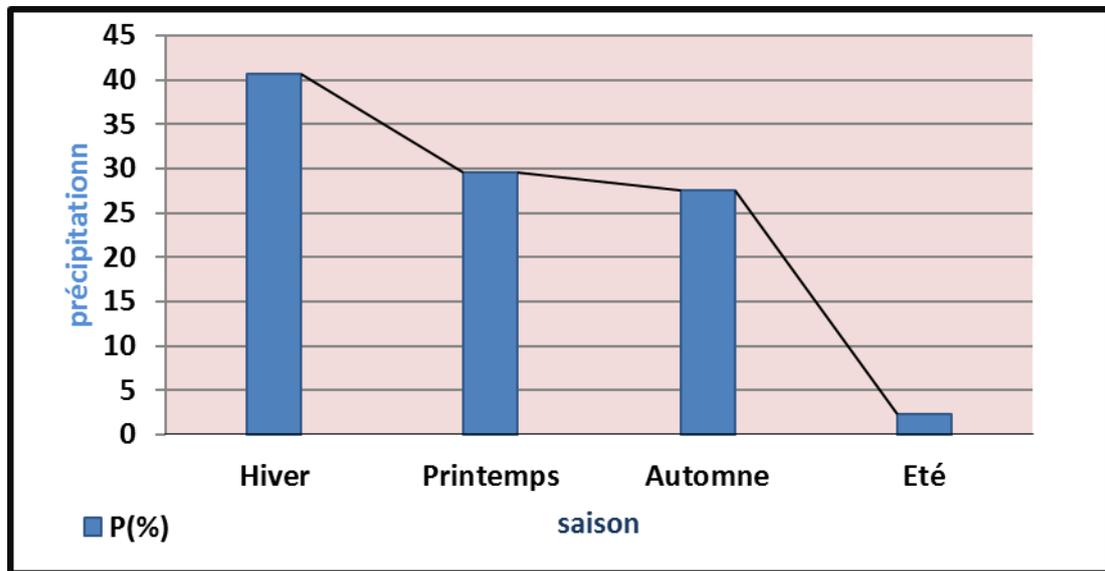


Figure 4:La variabilité saisonnière des précipitations selon la station DRH FES (1980-2014)

3.1.3 La variabilité mensuelle des précipitations

La station de Fès DRH FES sur une période de 34 ans montre que le régime des précipitations est méditerranéen avec une succession des mois humides et d'autres presque sec. À l'échelle de cette station, les mois les plus pluvieux sont: novembre, décembre, janvier, février et avril alors que les mois de juin, juillet et août enregistrent les faibles valeurs des précipitations(Fig.5).

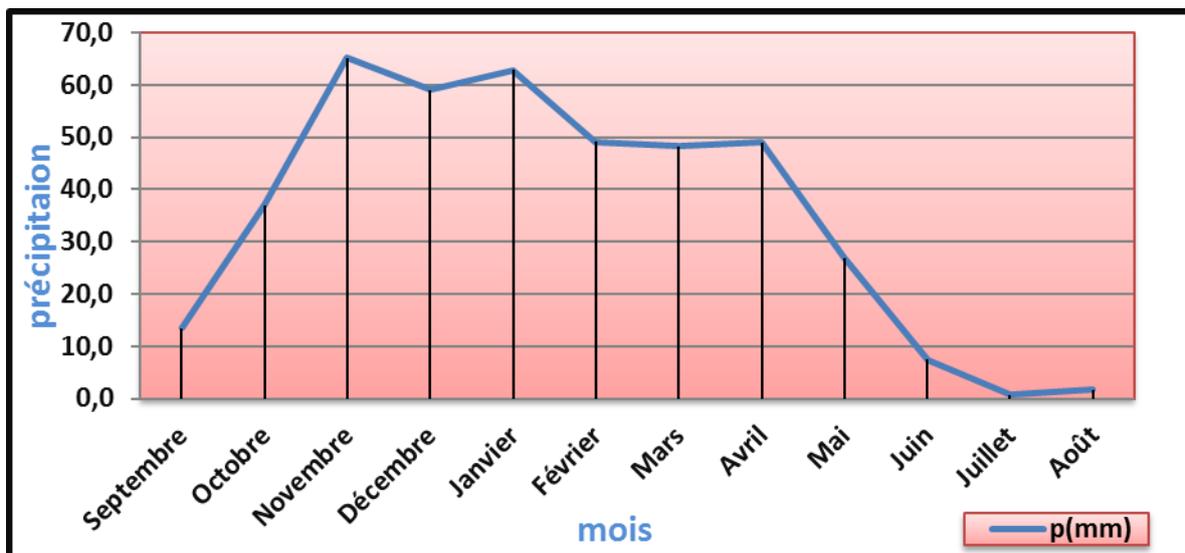


Figure 5:Fluctuation des précipitations moyennes mensuelle selon la station DRH FES (1980-2014)

3.2 Le régime thermique:

3.2.1 La variabilité interannuelle de la température

Au niveau de la station de FES, la température moyenne annuelle, pendant une série (30 ans) est de 17,5°C, avec des légères variations interannuelles, ces fluctuations thermiques sont peu importantes et relativement stables (Fig. 6).

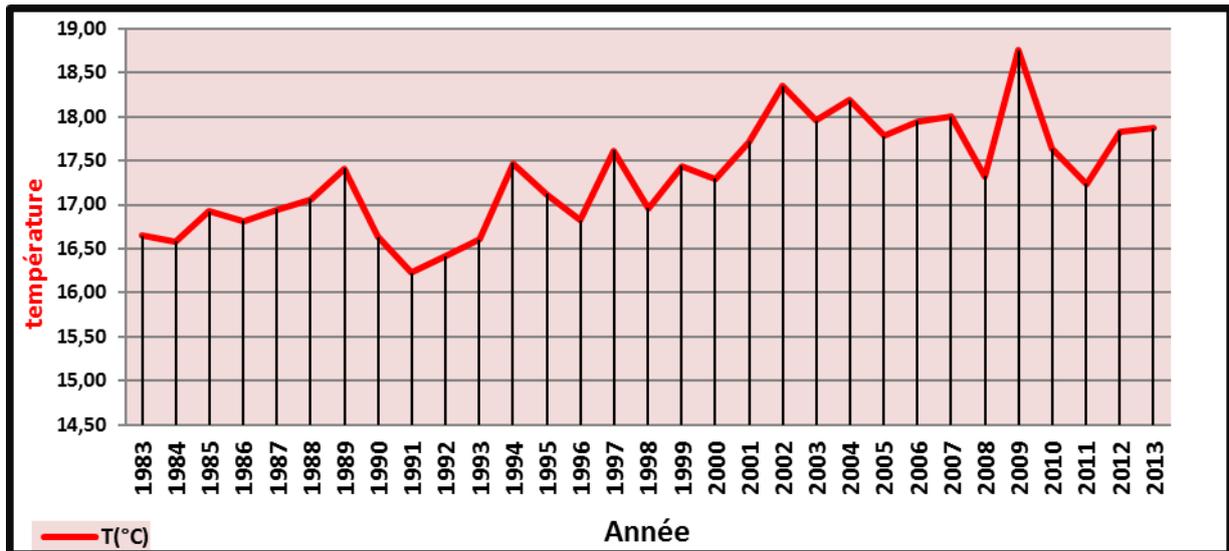


Figure 6: Moyennes des températures annuelles selon la station DRH FES (1983-2013)

Sur cette période (1983-2013) La température maximale (18,75°C) est enregistrée dans L'année 2009, tandis que la température minimale (16,23°C) est enregistrée dans L'année 1991. En fonction des valeurs de la température moyenne annuelle (17,5°C) cette station est classée dans le thermo-climat de type chaud et de sous-type Tempéré-chaud. (Selon les types thermiques de RIVAS –MARTINEZ(2004)).

3.2.2 La variabilité mensuelle de la température

Les données de température de la station DRH Fès pour la période (1983-2013) résume les caractéristiques thermiques au niveau de cette station (Fig. 7) .Le mois de janvier est le plus froid (9,6°C en moyenne), alors que le mois d'Août enregistre les valeurs de températures les plus élevées (26,3°C en moyenne).



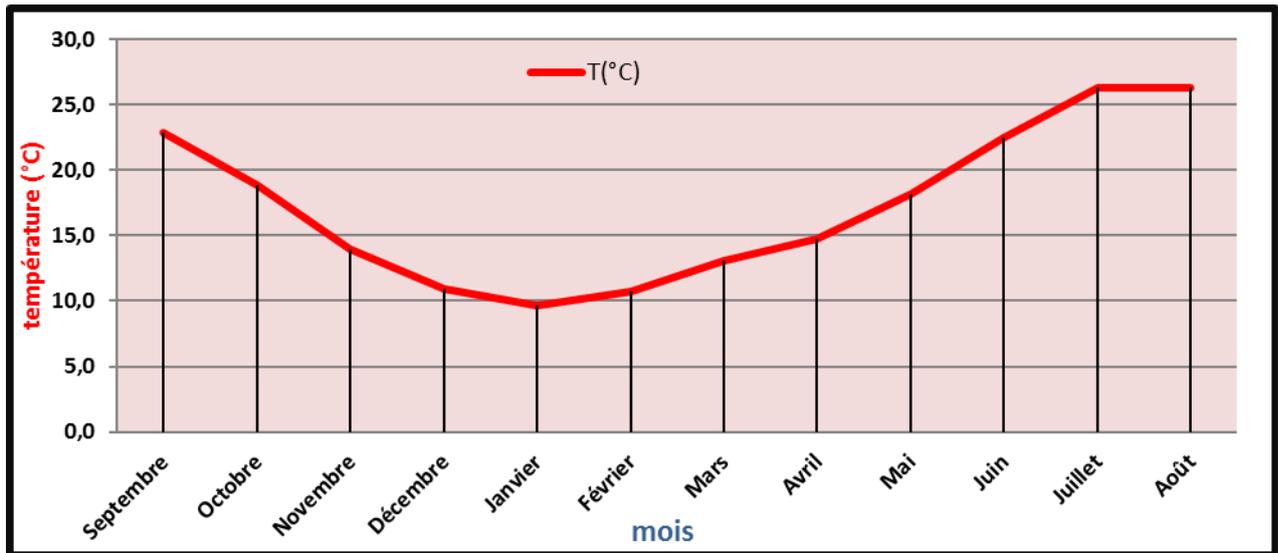


Figure 7: Moyennes des températures mensuelles selon la station DRH FES (1983-2013)

3.3 Les indices climatiques

L'aridité d'une région donnée, est peut être identifiée par des indices d'aridité qui est un indicateur quantitatif du degré du manque d'eau.

Indice d'aridité de Martonne, est parmi les indices les plus utilisés, ce dernier est en fonction à la fois de la hauteur annuelle des précipitations (mm) et de la température moyenne annuelle.

La formule de cet indice est la suivante : $I = P/(T+10)$

- I : Indice de Martonne,
- P : Hauteur annuelle des précipitations en mm,
- T : Température moyenne annuelle en degrés centigrades.

A partir de cet indice, les différents climats se classent comme suit :

- climat hyper aride ou désertique : $I < 5$;
- climat aride ou steppique : $5 < I < 10$;
- climat semi-aride : $10 < I < 20$;
- climat sub-humide à humide : $I > 20$.

Dans cette étude L'indice a été calculé à l'aide des données climatiques de la station DRH FES sur une période de 30 ans (1883-2013), telles que la précipitation annuelle et la température moyenne annuelle.

$$T = 18,0^{\circ}\text{C} / P = 421,7\text{mm} \longrightarrow I = 15,07.$$

Avec un indice égal à 15,07 la station de FES correspond à un climat semi-aride.

3.4 Le diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique de GAUSSEN et BAGNOULS est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèche et humide de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T), avec $P=2T$.

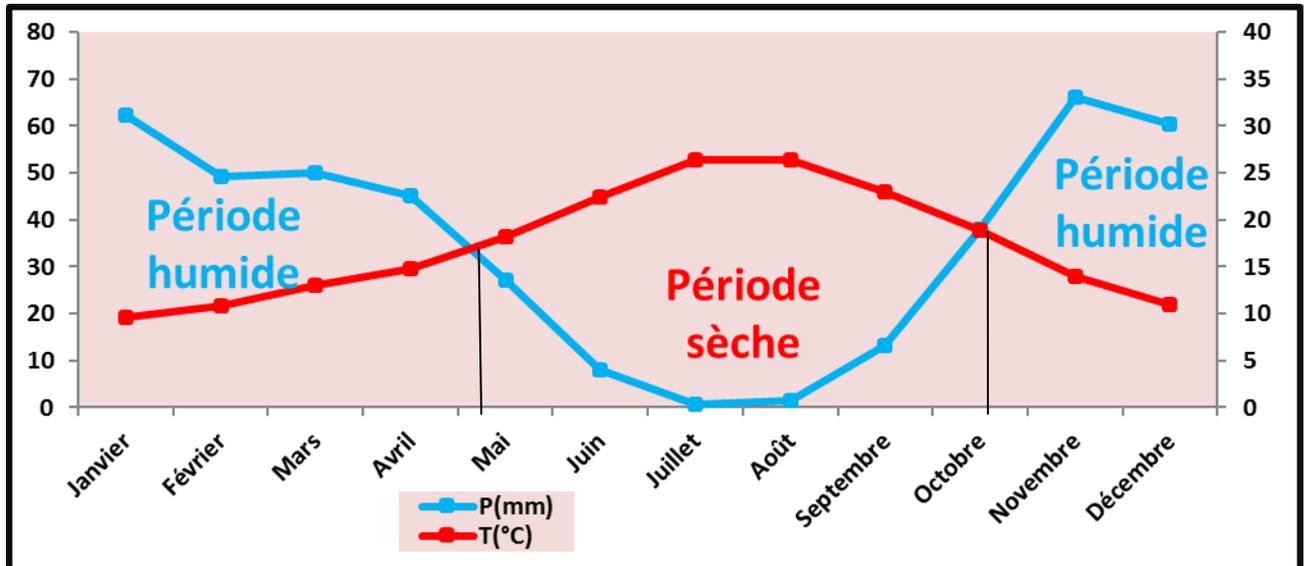


Figure 8: Diagramme ombrothermique de Gaussen selon la station DRH FES (1983-2013)

Le diagramme ombrothermique de la station DRH FES (Fig.8) montre que le climat au niveau de cette région est caractérisé par deux saisons très marquées; une saison sèche qui dure presque 4 mois s'étalant entre mai et septembre, et une saison humide qui dure 8 mois et s'étend du mois d'octobre jusqu'au mois Mai.

3.5 L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration (ET) est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. On distingue deux types : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

3.5.1 L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) ou potentiel d'évaporation d'un sol est la quantité d'évaporation qui pourrait se produire en cas d'approvisionnement en eau suffisant. Elle

traduit la demande climatique et représente la tranche d'eau évapotranspirée dans des conditions d'alimentation excédentaire.

- **Calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle :**

Méthode de Thornthwaite permet de calculer en une station le bilan d'eau mensuel et annuel à partir des valeurs moyennes mensuelles des précipitations. Pour des températures moyennes mensuelles inférieures à 26,5 °C (cas de notre station la température moyenne mensuelle est de 18°C) l'évapotranspiration potentielle mensuelle est calculée par la formule suivante :

$$ETP=16 (10t/I)^a$$

Dans laquelle :

-ETP: l'évapotranspiration potentielle mensuelle en mm;

-T: la température moyenne annuelle en °C;

-I: l'indice thermique annuel qui est la somme de douze indices mensuels (i), avec :

$$i=(t/5)^{1,514}$$

- t :la température de chaque mois.

-Le coefficient (a) est un facteur de correction qui diffère pour chaque mois comme suivant :

$$a=0.94239+ (1.793*10^{-5})*I +I^2 + (675*10^{-9}) *I^3$$

Pour les calculs Serra a simplifié cette formule, en proposant les expressions suivante :

$$a=I (1,6/100)+0,5$$

$$I=0,09*T^{(3/2)}$$

Dans notre cas **T=18**, **a= 0,6** et **I=6,8** ;

Les valeurs de l'ETP calculée à partir de la station de DRH FES sur la période comprise entre 1983-2013, sont récapitulées dans le tableau ci- dessous :

Tableau 3: Valeurs de l'ETP au niveau de la station DRH FES (1983-2013)

mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Août
T (°C)	22.9	18.9	14	10.9	9.6	10.8	13	14.7	18.2	22.4	26.4	26.3
ETP (mm)	136	120.7	100.5	86.6	80.1	85.9	96.4	103.9	118	134.2	147.5	147.9

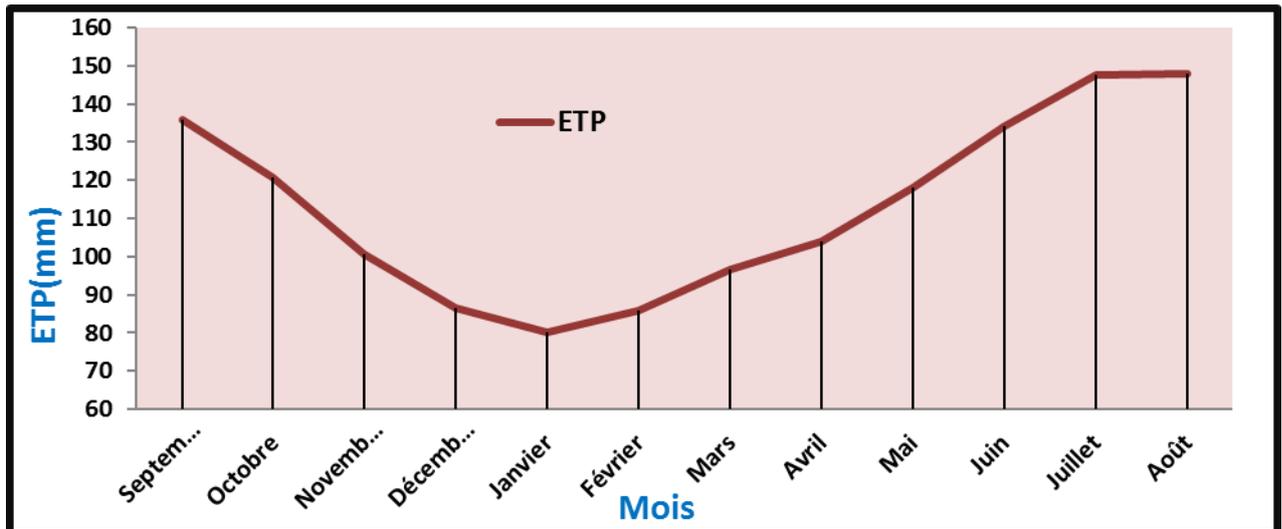


Figure 9: Evolution de l'ETP en fonction des mois selon la station DRH FES (1983-2013)

On constate que L'évapotranspiration potentielle varie proportionnellement avec la température. Le maximum de l'évapotranspiration potentielle obtenue est enregistré au mois d'août avec 147,9 mm, contre un minimum de 80,1 mm au mois de janvier (Fig. 9).

3.5.2 L'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau retirée d'une surface (par le sol et par les plantes) en raison du processus d'évaporation et de transpiration.

- **Calcul de L'évapotranspiration réelle**

La formule les plus utilisé pour le calcul de l'ETR est celle de turc:

$$ETR = P / (0.9 + (P/L)^2)^{1/2}$$

Avec:

-ETR: est l'évapotranspiration réelle en mm/an;

-P: est la hauteur de précipitation moyenne annuelle en (mm);

-T: est la température moyenne annuelle en (° C);-L: est le coefficient de Turc $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$.

Le calcul de l'ETR des données DRH FES (1983-2013), avec une précipitation moyenne annuelle de 421,7 mm, et une température moyenne annuelle de 18°C, montre qu'elle prend la valeur de 408,9 mm/ans c'est-à-dire 96,9% du total de précipitation.

**Chapitre III : Géomorphologique, pédologie,
géologie et occupation du sol du bassin de l'oued
Boufekrane.**

1 Géomorphologie du bassin de l'oued Boufekrane

1.1 Forme du bassin

La notion de *temps de concentration* des pluies dans un bassin versant est influencée par sa forme. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, l'inverse pour les bassins en forme d'éventail. L'importance de cette information est évidente dans le comportement du bassin au point de vue puissance de ruissellement, et dégradation du sol.

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius KG, défini par la formule suivante :

$$KG=0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec : A est la surface du bassin versant [km²] et P est le périmètre du bassin [km].

Le périmètre (P) et la surface (A) du bassin versant de l'Oued Boufekrane sont calculés par le logiciel ArcGIS10.2.2, après la délimitation du bassin versant sur deux Cartes topographiques : Fès Est et Sefrou (Echelle 1/50 000).

Dans le cas de ce bassin: P= 32,82 km, A= 33,02 km², K_G=1,59. La valeur de KG est supérieure à 1 donc Le bassin de l'Oued Boufekrane est de forme allongé caractérisée par des faibles débits de points de crue.

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. Soit L et l la longueur et la largeur du rectangle avec :

$$L = \frac{KG}{1.42} \sqrt{A} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.42}{KG} \right)^2} \right] \quad \text{Et} \quad l = \frac{KG}{1.42} \sqrt{A} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.42}{KG} \right)^2} \right]$$

Dans le cas du bassin de Boufekrane : L= 13,95 Km et l=2,37 km, La densité de drainage est de 0,5 Km/Km².

1.2 Répartition spatiale des altitudes

La répartition spatiale des altitudes de la zone en question, est définie à partir des données altimétriques du modèle numérique de terrain (MNT) (Fig. 10) qui nous a permis de dresser la carte hypsométrique pour l'ensemble du bassin (Fig. 11).

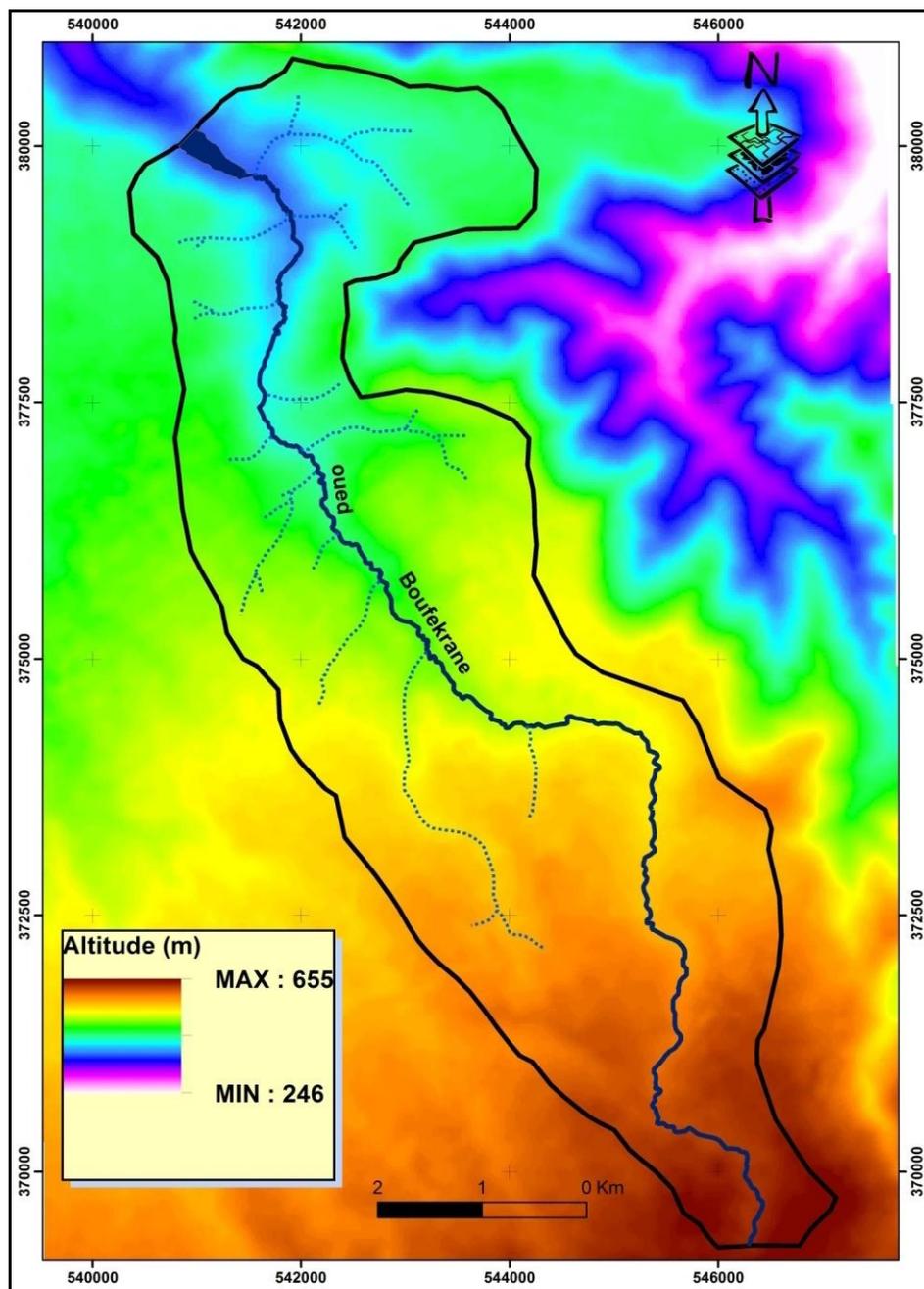


Figure 10:Modèle numérique du terrain de la zone d'étude.

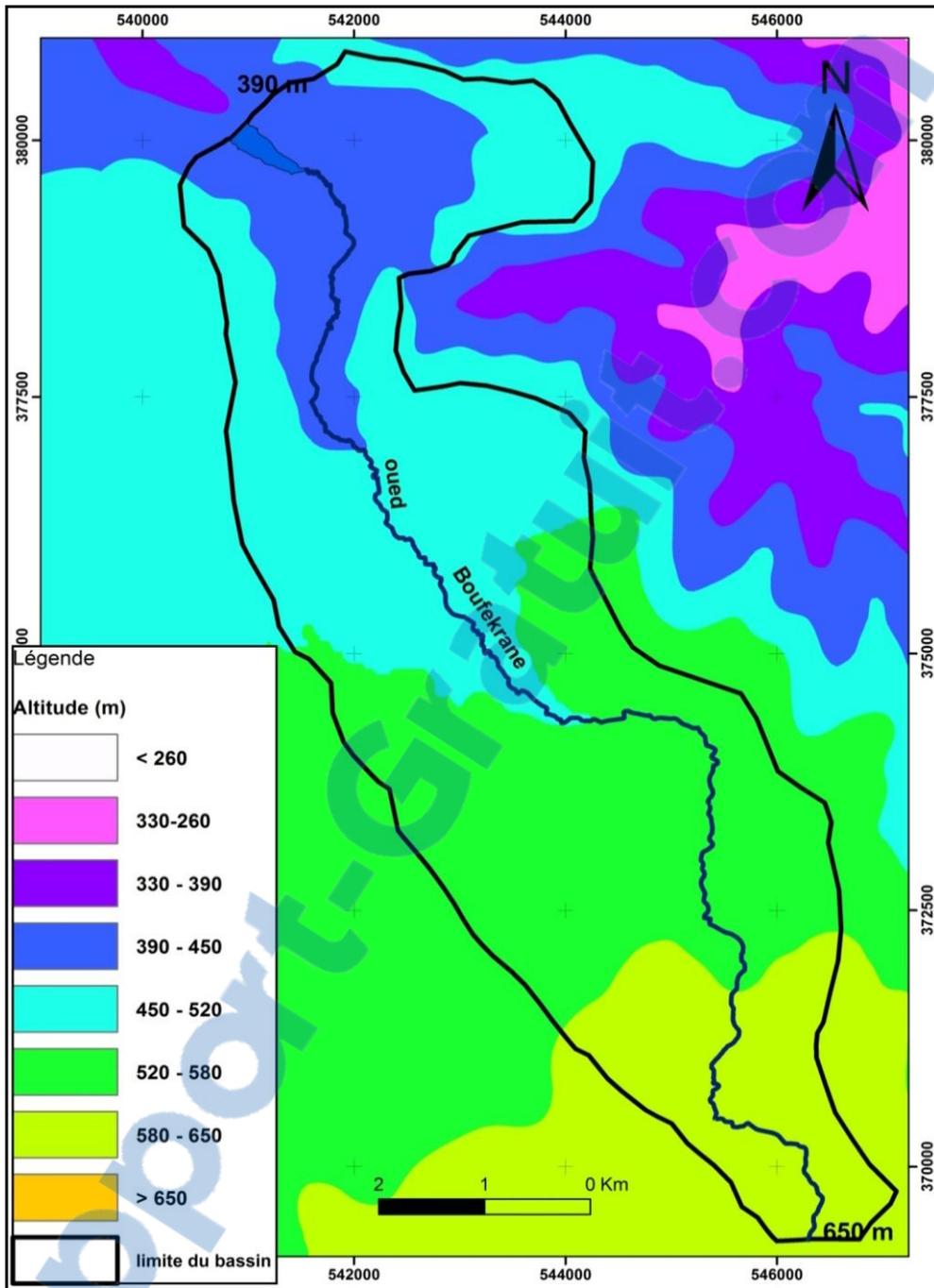


Figure 11: Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Boufekrane.

Les surfaces et les pourcentages des altitudes sont calculés à partir de la carte hypsométrique (Fig. 11), et sont ensuite utilisés pour tracer la courbe hypsométrique caractéristique du bassin versant de l'Oued Boufekrane.

Tableau 4: Répartition des superficies selon les tranches altitudinales

Tranche d'altitude	Surface (Km²)	Surface en pourcentage
<450	5	15.15
450-520	11	33.33
520-580	12	36.36
>580	5	15.15

Le tableau de répartition des superficies des tranches d'altitude (Tab.4) montre que:

-Les altitudes inférieures à 450 m occupent 15,15% de la superficie du bassin versant de l'Oued Boufekrane.

-presque 70% de la superficie du bassin est comprise entre 450 m et 580 m d'altitudes.

-les hautes altitudes (>580 m), n'occupent que 15,15 % de la superficie totale du bassin versant.

-l'altitude moyen est de 515 m.

A partir d la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Boufekrane (Fig. 13) on note que :

- L'altitude caractéristique de 5% de la surface cumulée est de 622 m.
- L'altitude caractéristique de 50 % de la surface cumulée est de 510 m.
- L'altitude caractéristique de 95 % de la surface cumulée est de 406 m.

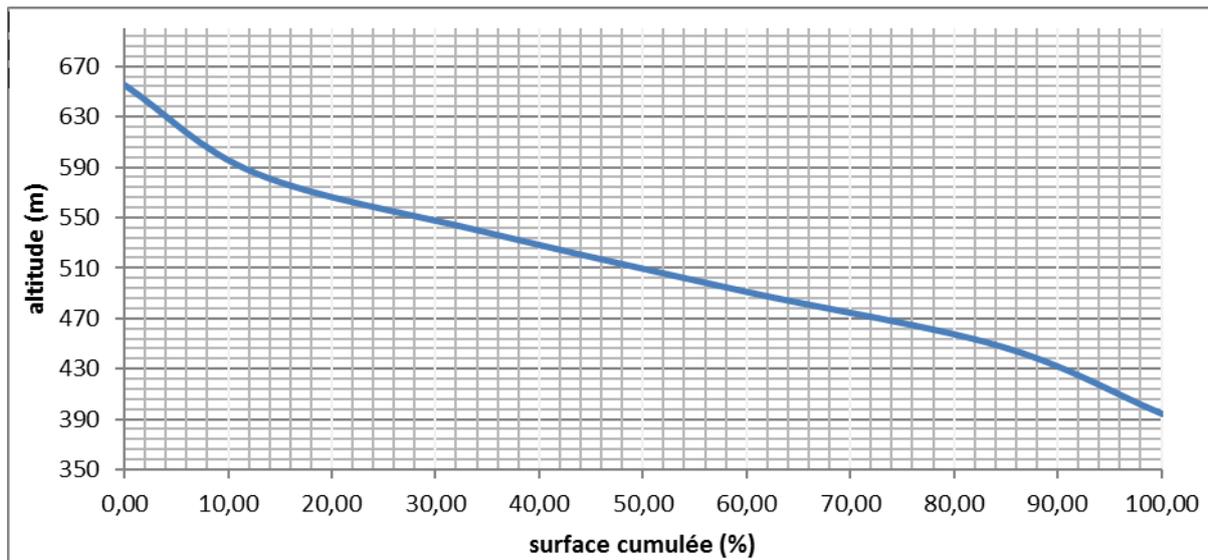


Figure 12: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Boufekrane

Donc ce bassin est marqué par la dominance de la plaine qu'occupe une grande portion (85,15%), alors que les crêtes n'occupent qu'une proportion marginale (15,15%).

1.3 Répartition spatiale des pentes

Les pentes du bassin versant de l'oued Boufekrane sont calculées à partir du modèle numérique du terrain de cette région. Les pourcentages de chaque classe par rapport à la surface totale du bassin sont calculés après la transformation de la carte des pentes, du mode raster vers le mode vecteur.

La carte des pentes (Fig. 13) montre que les pentes sont faibles et ne dépassent pas 13 %, ce qui confirme la situation du bassin de l'oued Boufekrane dans une zone de plaine. Les faibles pentes (0 - 4,4 %) occupent 81,8 % de la surface totale du bassin et se trouvent dispersées sur la totalité du bassin. Les pentes moyennes (4,4 - 13 %) occupent 18,2 %, leur fréquence augmente en allant de l'amont vers l'aval de l'oued Boufekrane.

La pente moyenne (P_m) égale au quotient de la dénivellée (D_t) par la longueur du rectangle équivalent:

$$P_m = D_t / L$$

Pour le bassin de l'oued Boufekrane la pente moyenne est : $\frac{650-390}{13,95} = 19 \text{ m/km} = 1,9 \%$.

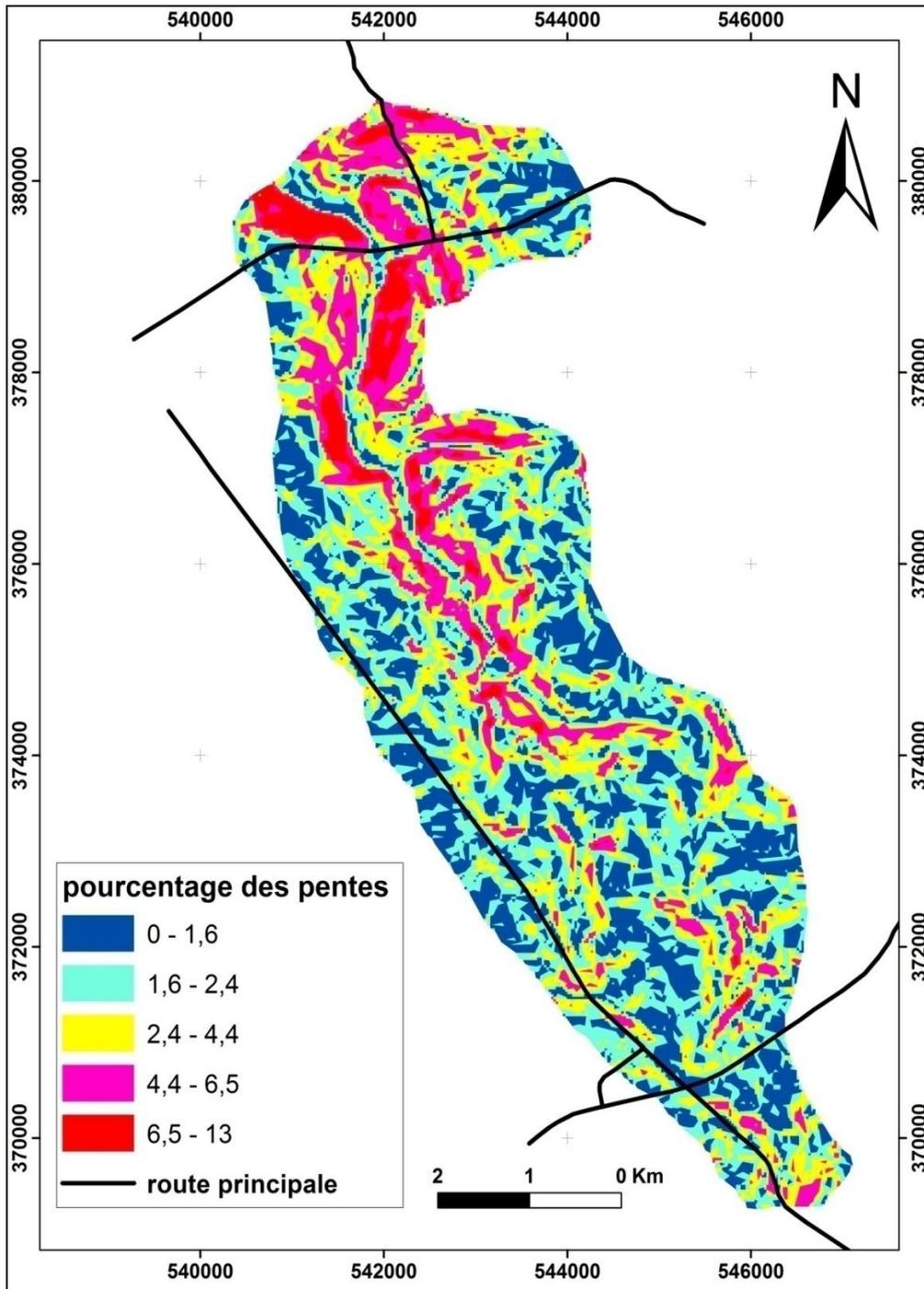


Figure 13: Carte de la distribution spatiale des pentes dans le bassin de Boufekrane

2 Pédologie du bassin de l'oued Boufekrane

Les sols du bassin de l'oued Boufekrane (Fig.14) sont définis à partir de la carte pédologique de la province de Fès (1/100 000), on distingue :

- **Les vertisoles** : sont des sols calcaires (15-30 % de Ca) à textures argileuses (>50 % d'argiles gonflantes), ils occupent 19,21 % de la surface totale du bassin et ils sont développés sur des marnes argileuses (SCET-MAROC, 1988). La formation de ce type de sol est influencée par des conditions climatiques, la nature de matériau (riche en calcium et magnésium) et la topographie. Ils se situent généralement en bas de pente, leurs caractères et plus en plus accentués à mesure qu'on progresse vers les zones de moins en moins drainées, situées en aval.
- **Les sols calcimagnésiques** : sont les plus dominants, ils occupent 66,23 % de la surface totale du bassin. Ils se développent sur des marnes sableuses et sur des formations quaternaires fluviolacustres à pente faible (SCET-MAROC, 1988). La formation de ce type de sol est liée à la topographie.
- **Les sols peu évolués** : ils n'occupent que 2,23% de la surface totale du bassin, et se développent sur les apports des basses terrasses sur des matériaux de textures argileuses ou limoneuses alluviales sur une pente moyenne à faible.
- **Les sols isohumiques** : Ils se développent sur des alluvions fines argileuses des terrasses moyennes du Quaternaire, leur évolution est conditionnée surtout par les facteurs bioclimatiques (climat et végétation) dont l'existence des fortes contrastes saisonniers, l'humidité du pédoclimat et l'abondance du calcium et du magnésium, constituent les bonnes conditions pour la formation de ce type de sol. Les sols isohumiques occupent 10,66 % de la surface totale du bassin.
- **Sols à sesquioxydes** : sont très peu représentés dans le bassin, ils n'occupent que 1,76% de sa surface totale. sont des sols caractéristiques des climats chauds, avec un milieu très riche en oxydes de fer.

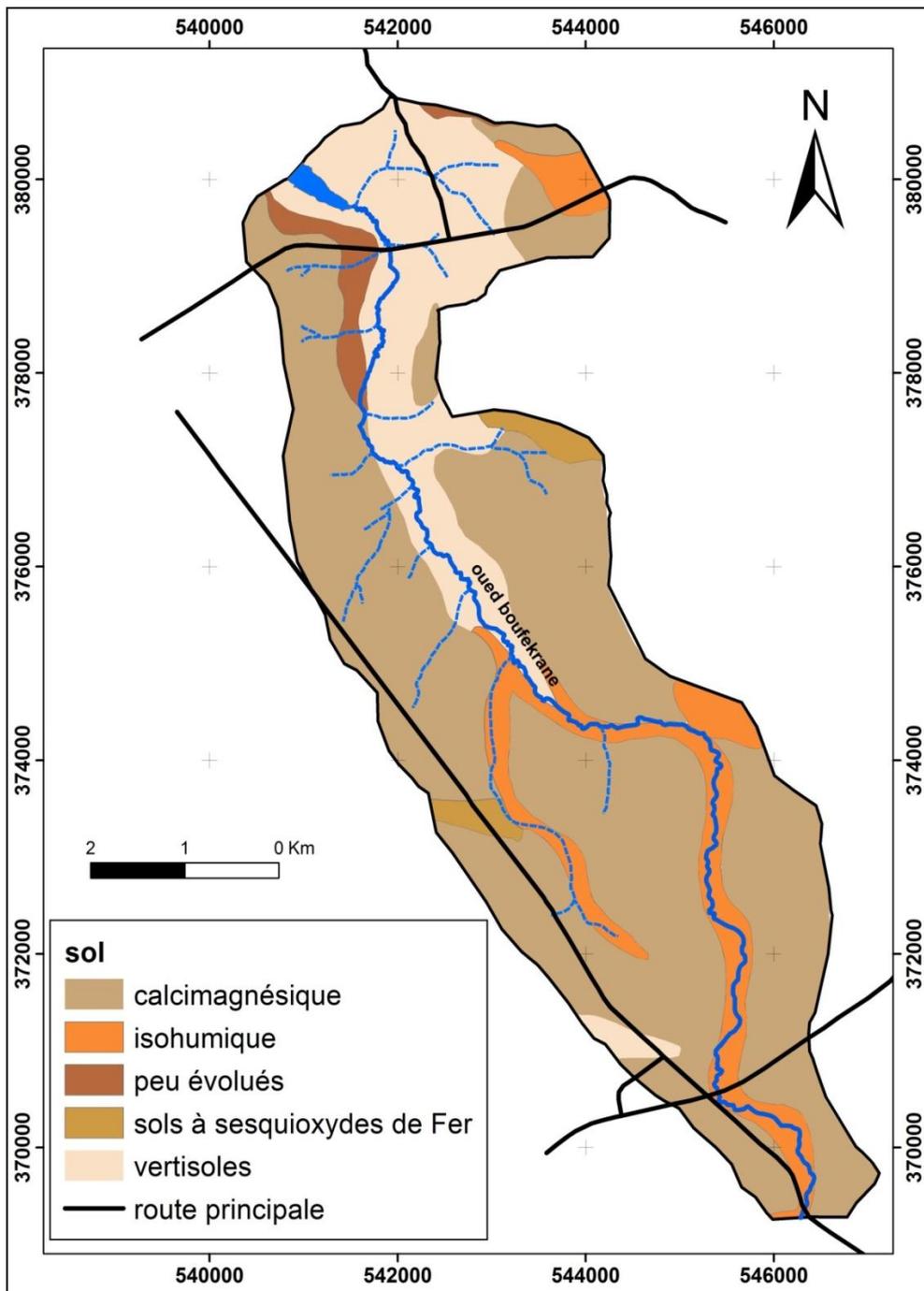


Figure 14: Carte pédologique du bassin versant de l'oued Boufekrane

3 Géologie du bassin de l'oued Boufekrane

La lithologie du bassin de l'oued Boufekrane est caractérisée par la présence de deux formations géologiques : les marnes du miocène et les dépôts fluvio-lacustres du quaternaire (Fig. 15).

Les marnes du miocène qui constituent 12,7 % de la surface du bassin, sont extrêmement instables, plastiques et vulnérables au glissement.

Le quaternaire est la formation la plus dominante dans ce bassin, ils occupent presque 88 % de sa surface. Il est caractérisé par des faciès diversifiée : compacte formées des conglomérats à encroustement calcaire, et plastique formées des argiles et des limons argileux.

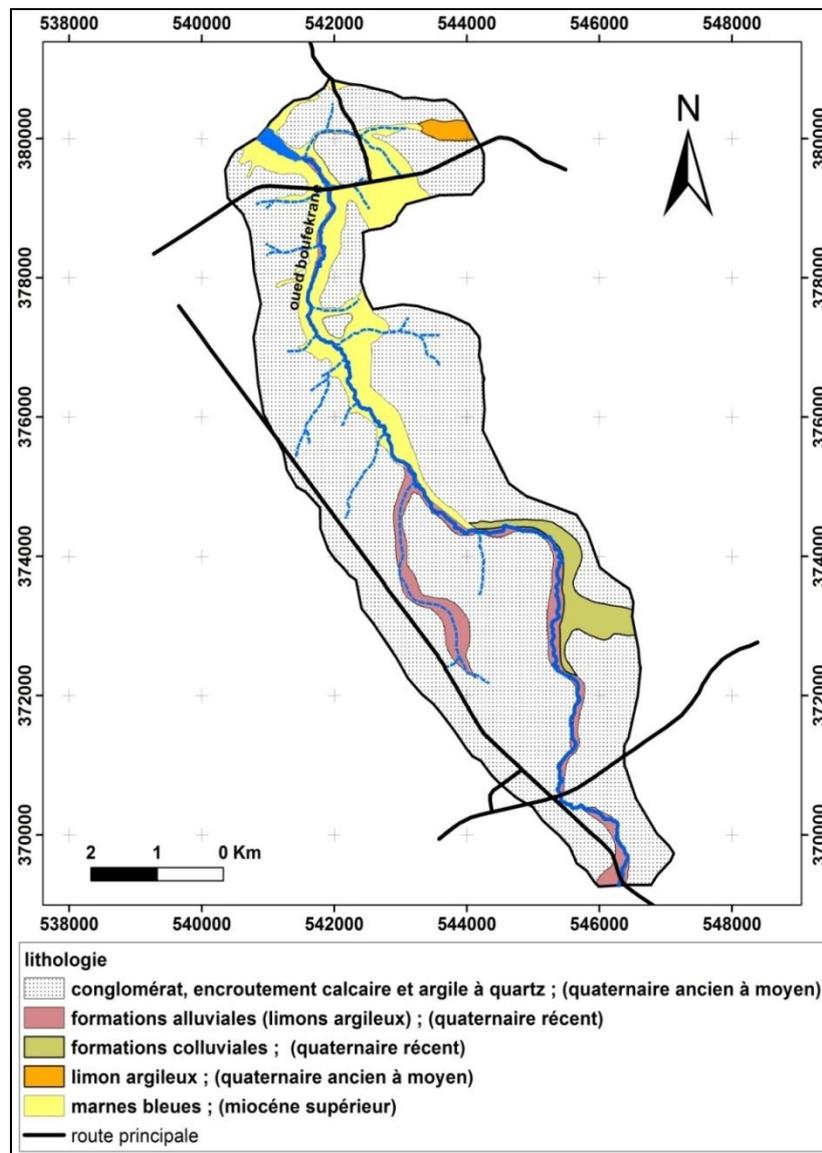


Figure 15: Carte géologique du bassin versant de l'oued Boufekrane (carte géologique de Sefrou 1/100 000 (1974), carte géotechnique de Fès 1/20 000 (1967))

4 Occupation du sol du bassin de l'oued Boufekrane

Les classes de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'oued Boufekrane sont déterminées à partir de l'image satellitaire (Fig. 16) de Google Earth (Téléchargée par le logiciel Terraincognita)

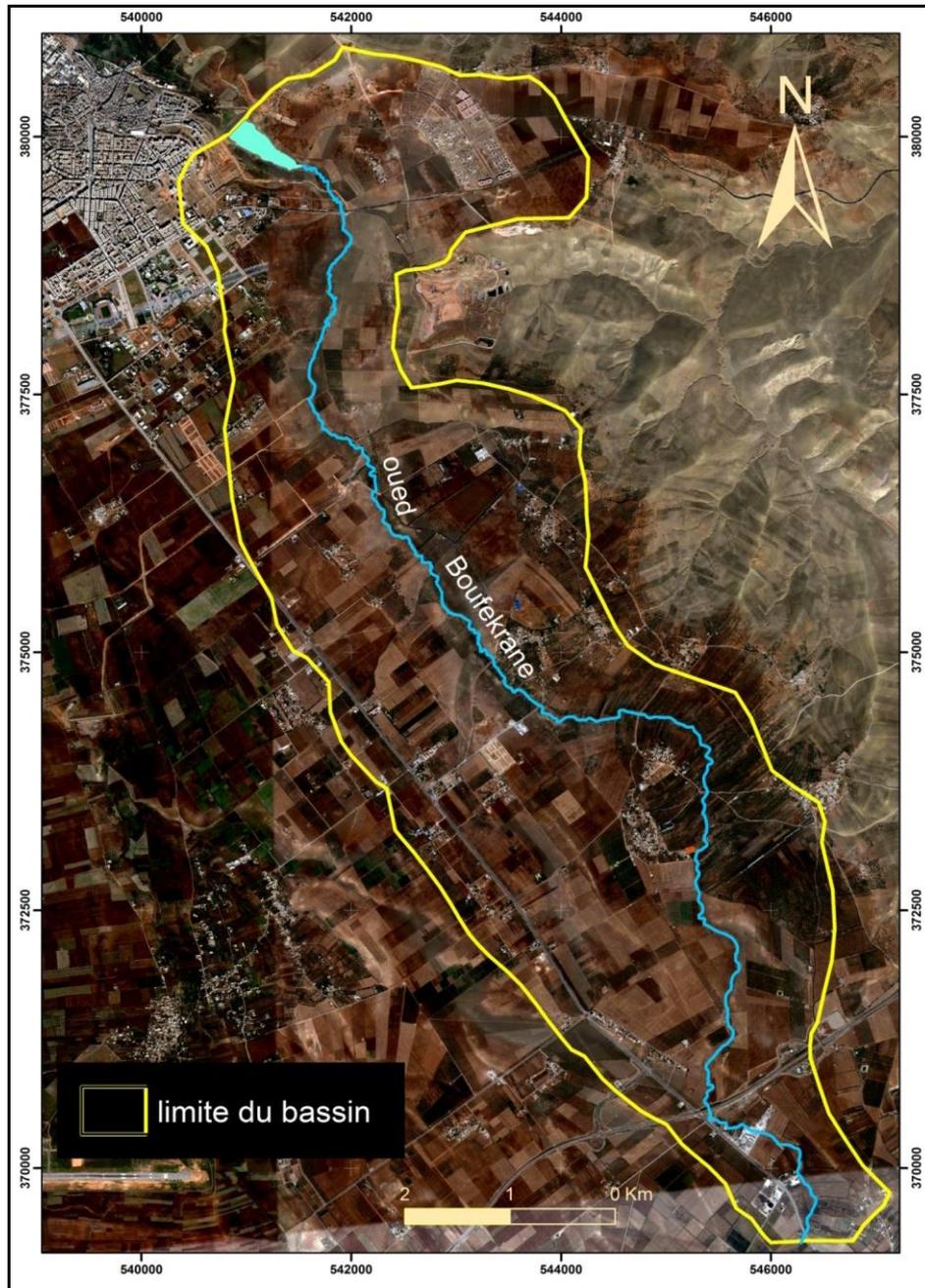


Figure 16:Image satellitaire du la zone d'étude (Google Earth (27/4/ 2017))

Cette classification a permis de distinguer deux types d'occupation du sol (Fig. 17):

- Occupation du sol non concernée par l'érosion hydrique : sont les habitats, et les routes. ces classes occupent 423,7 hectares de la surface totale du bassin.
- Occupation du sol influencée par l'érosion hydriques : sont les terre arables (destinées au Céréalicultures), les oliviers, les terrains incultes (parcours) et les cultures en lignes (Cultures irriguées). Ils occupent 2888 hectares, donc presque de 87% de la superficie totale du bassin de l'Oued Boufekrane.

Tableau 5: Les pourcentages des occupations du sol dans le bassin de l'oued Boufekrane

Occupation du sol		Surface (hectares)	Surface (%)
Les arboricultures	culture en ligne	84,9426	2,3
	Olivier	882,7401	25
Les céréalicultures	terre arable	1703,2973	51
Les terrains incultes	Parcours	216,9948	6,3
barrage El Gaada		12,2897	0,4
habitat/route		425,3718	16

Le caractère agricole du bassin versant de l'oued Boufekrane joue un rôle important dans l'accélération du phénomène d'érosion hydrique, dont son l'intensité est fonction du type des cultures dans la région. En effet les surfaces occupées par les Céréalicultures et les oliviers sont exposées plus au risque d'érosion.

Tableau 6: Distribution des pertes en sol selon l'occupation du sol (Ouazzani, 2008)

Type d'occupation du sol	Pertes en sol moyennes annuelles (t/ha/an)
Cultures irriguées (culture en ligne)	11,56
Olivier	17,07
Céréalicultures	28,79
Terrains incultes	9,21

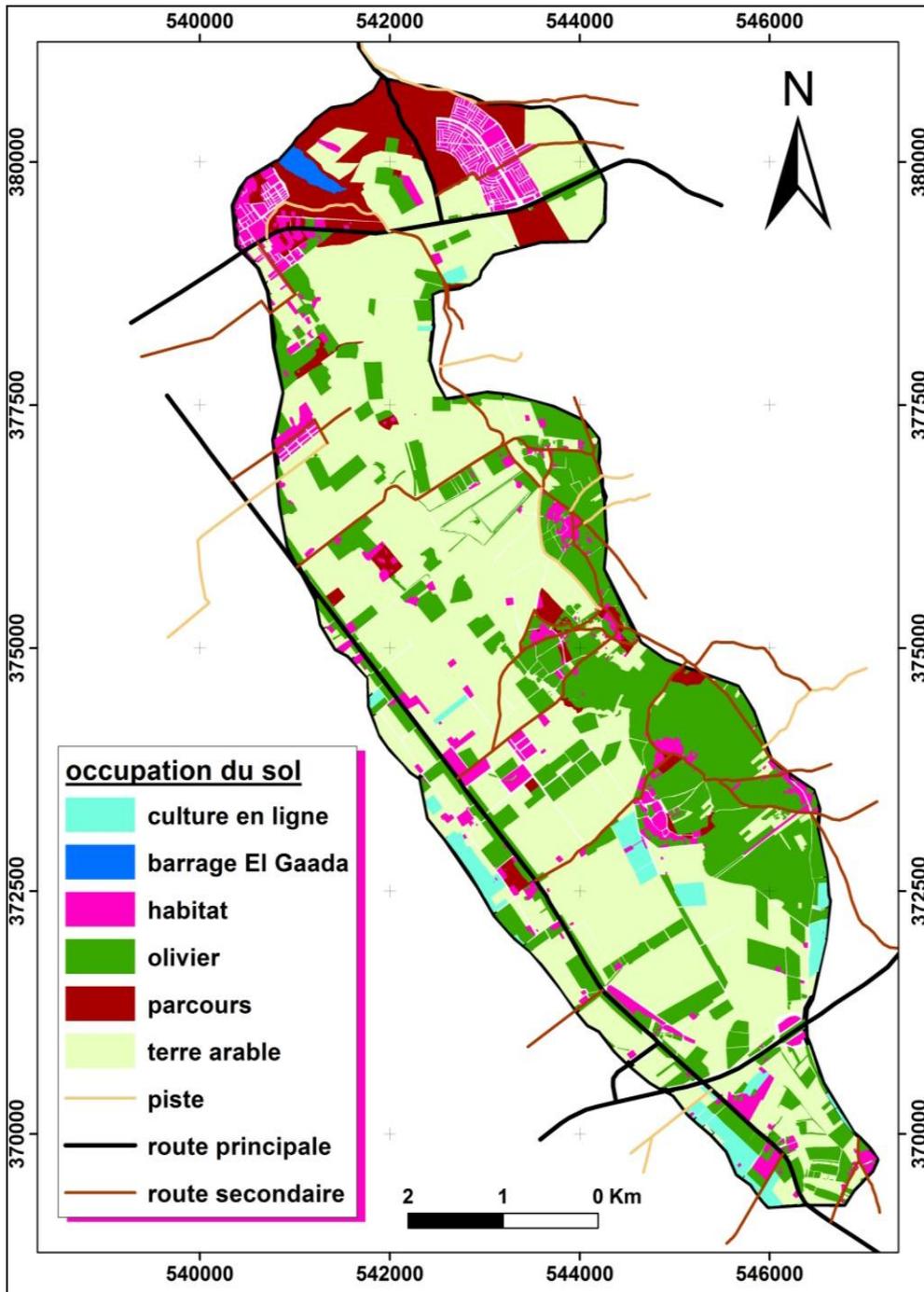


Figure 17: Carte de l'occupation du sol du bassin versant de l'oued Boufekrane

Chapitre IV : Application des directives PAP/CAR
au niveau du bassin de l'oued Boufekrane

Rapport-Gratuit.com

I. Evaluation de l'érosion hydrique par l'approche PAP/CAR

La méthode PAP/CAR est composée de trois phases : une phase prédictive consistant en une cartographie des facteurs de prédisposition tels que la pente, le substrat et/ou les sols et le couvert végétal, une phase descriptive se basant sur la cartographie de l'érosion réelle et une phase d'intégration qui aboutit à l'identification et l'évaluation du risque d'érosion.

Vu le caractère interdépendant des facteurs influençant l'état érosif d'un sol, son application nécessite une démarche de plusieurs opérations de croisements cartographiques et d'analyse de base de données selon l'organigramme suivant :

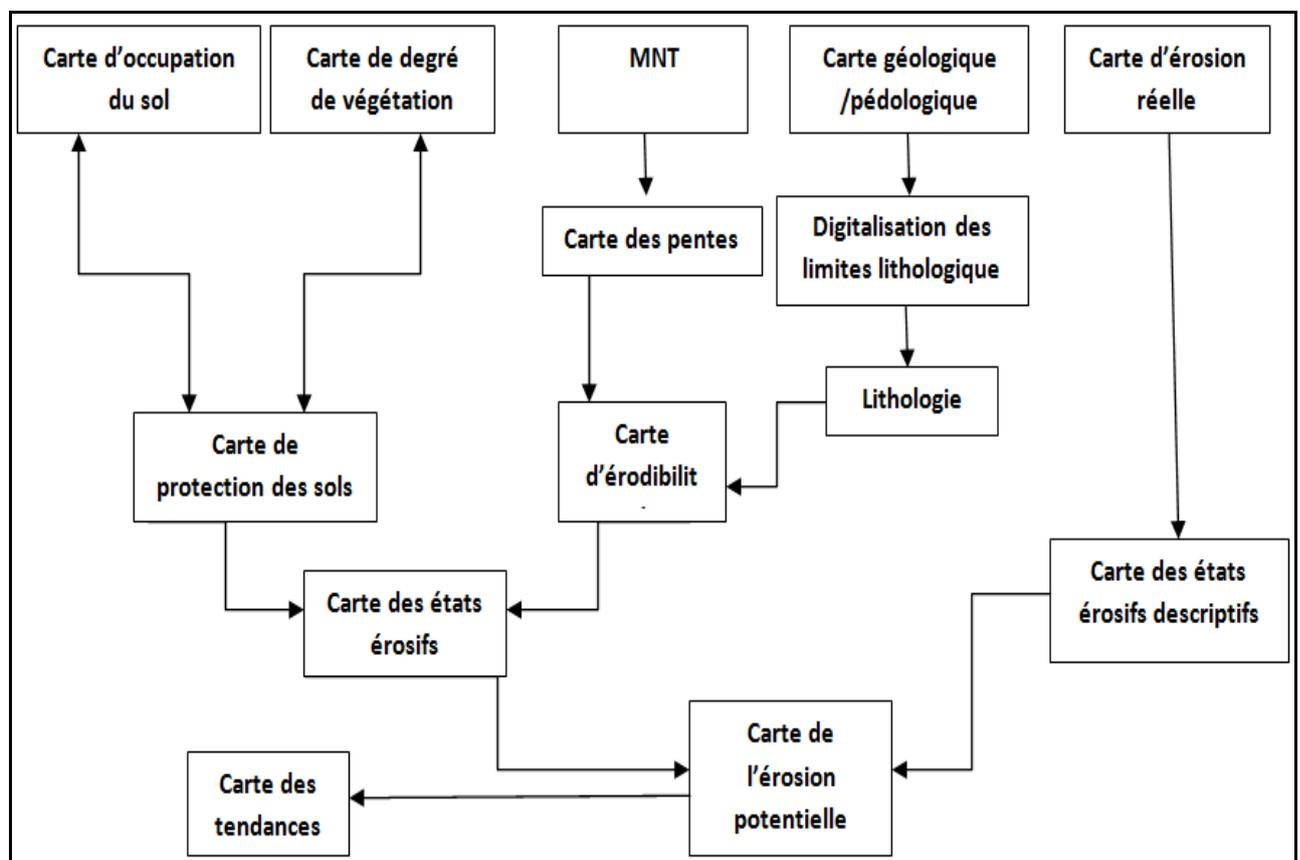


Figure 18: Organigramme des étapes de l'évaluation de l'érosion hydrique par les directives PAP/CAR

1 La phase prédictive :

Le résultat escompté de cette phase est la réalisation de la carte des états érosifs obtenus par la superposition des cartes de plusieurs facteurs. Chaque facteur contribue par un certain degré aux différents états érosifs. L'objectif de cette phase est le traitement des cartes des facteurs d'érosion en trois étapes :

1.1 Etape 1 : Élaboration de la carte d'érodibilité par superposition de la carte des pentes et des Litho-faciès.

L'érodibilité d'un sol exprime le potentiel d'un affleurement rocheux à fournir des éléments à l'érosion. On doit donc tenir compte de la friabilité d'un substrat et du pourcentage de la pente.

1.1.1 Carte des pentes

La carte des pentes est élaborée à partir de l'MNT de cette région, et classifiée par les directives du PAP/CAR selon le tableau suivant :

Tableau 7: Classes de pentes selon PAP/CAR

Code PAP/CAR	type des pentes
1	Nulle à faible (0-3%)
2	Modérée (3%-12%)
3	Abrupte (12%-20%)
4	Très abrupte (20%-35%)
5	Extrême (>35%)

Cette carte (Fig. 19) montre que le bassin de l'oued Boufekrane n'est concerné que par les classes des pentes faibles (classe 1) et modérées (classe 2) vu sa situation dans une zone de plaine.

On remarque la dominance de la classe 0 à 3%, qui s'étendent sur une surface 20 Km² de ce bassin, et donc occupent 60,6% de sa surface totale. Les pentes moyennes (3-12%) s'étendent sur 13 km² et occupent une proportion de 39,4%.

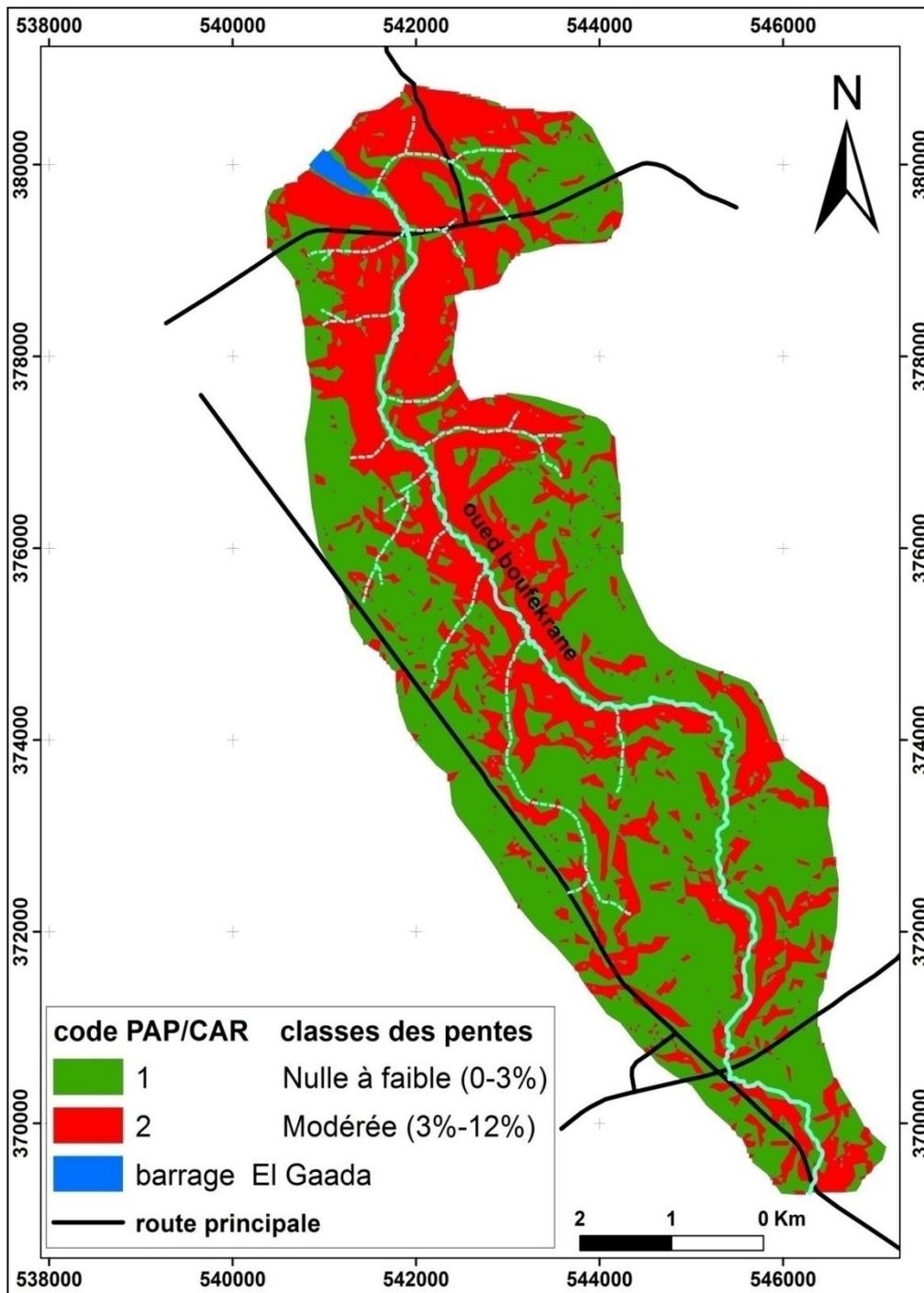


Figure 19: Carte des classes des pentes du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

1.1.2 Carte de Litho-faciès

La carte des Litho-faciès décrit la répartition des affleurements en fonction de leurs degrés de friabilité. Ces derniers sont répartis en 5 classes et affectés par un code qui désigne leurs degrés de friabilité (Tab. 7) :

Tableau 8: Classes de Litho-faciès selon PAP/CAR

Classes de Litho-faciès	Type de matériel
(a)	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, croutes, affleurement de grès ferrugineux (Calcaires massifs, sols fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroutés.
(b)	Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés.
(c)	Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schistes, marne, etc.).
(d)	Roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés (marnes, gypse, ardoise argileuse, etc.)
(e)	Sédiments ou sol meuble, non cohésif et matériel détritique.

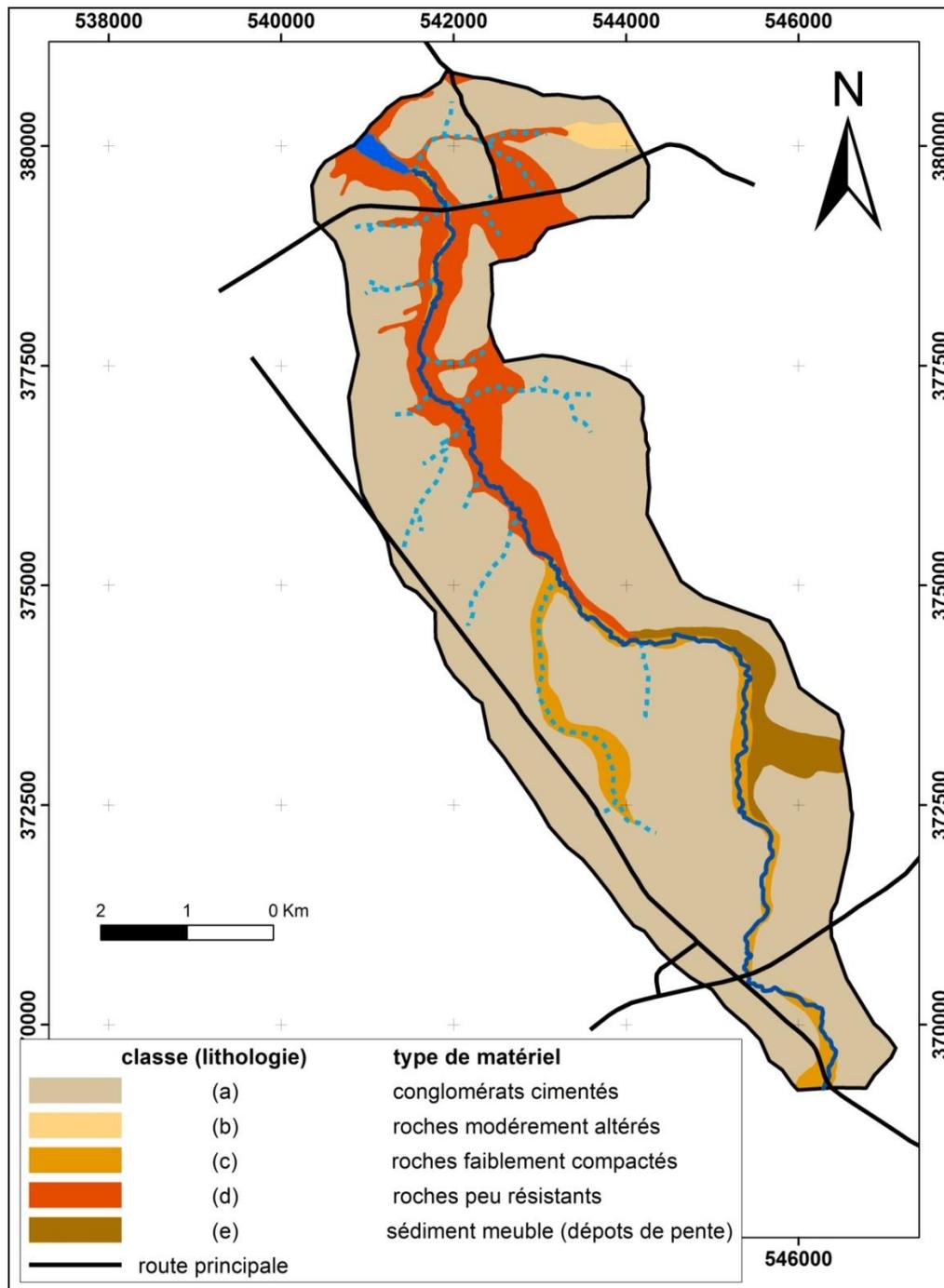


Figure 20: Carte des classes des Litho-faciès du bassin de l’oued Boufekrane selon PAP/CAR

La carte de friabilité (Fig. 20) montre que le bassin de l’oued Boufekrane est caractérisé par des matériaux compacts formés de conglomérat cimenté(a), et des matériaux relativement moins compacte (b, c, d, e) relatives à des marnes et des formations alluviales.

1.1.3 Carte d'érodibilité

La Carte d'érodibilité est le résultat de la superposition de la carte de Litho-faciès et de la carte des pentes, selon la matrice suivante :

Tableau 9:Matrice d'érodibilité des sols

Classe des pentes	Classes 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 classes d'érodibilité obtenus par l'application de cette matrice sont classées par les directives du PAP/CAR selon le tableau suivant :

Tableau 10: Degrés d'érodibilité selon PAP/CAR

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

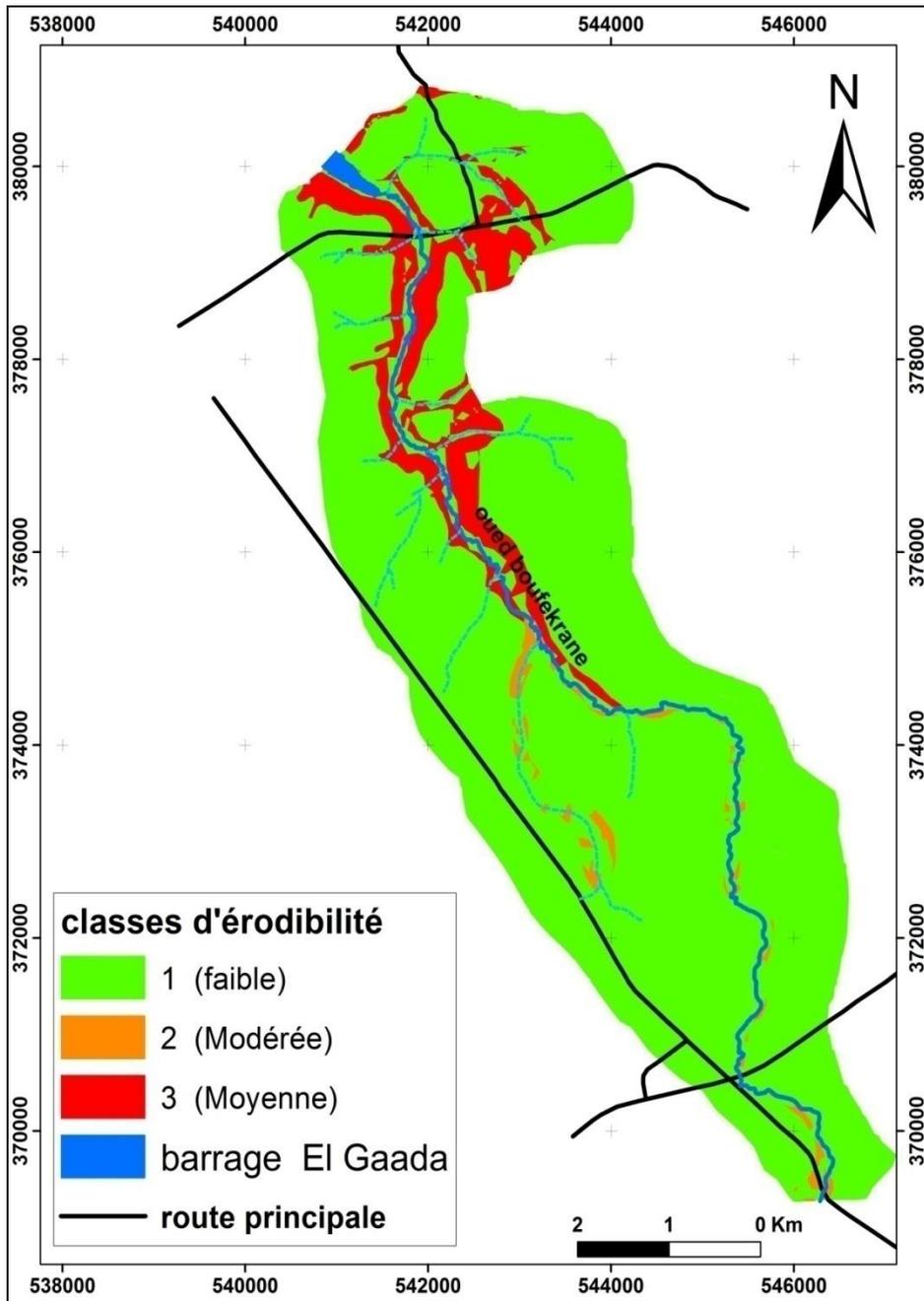


Figure 21: Carte des classes d'érodibilité des matériaux dans bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

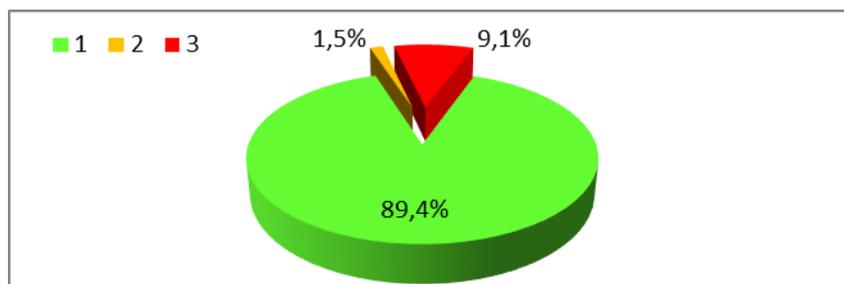


Figure 22: Pourcentage de superficie des classes d'érodibilité du bassin l'oued Boufekrane

La carte d'érodibilité (Fig. 21) montre que presque 90 % de la superficie du bassin de l'oued Boufekrane représente une érodibilité faible relative à des zones de faible pente (0-3%) où les matériaux sont relativement compactes, les 10 % qui restent sont occupés par des degrés d'érodibilité modérées à moyennes situés dans des zones à pente moyenne et à matériaux relativement moins compactes.

Le passage des roches compactées, vers les sédiments meubles montre une augmentation des potentialités érosives du bassin versant influencées par le degré de la pente. De ce fait l'érodibilité est toujours extrême lorsque la pente est relativement forte et/ou le terrain est de faible résistance.

1.2 Etape 2 : Réalisation de la carte de protection des sols par superposition de la carte d'occupation du sol et du degré de recouvrement végétal.

L'élaboration de la carte de protection des sols se base sur la superposition de la carte d'occupation des sols et la carte de densité de recouvrement selon une matrice proposée par PAP/CAR.

1.2.1 La carte d'occupation des sols

Cette carte a été élaborée à partir de l'image satellitaire (Google Earth) de cette région téléchargée par le logiciel (Terra Incognita), digitalisée par Arc-GIS, et classifiée par les directives PAP/CAR on se basant sur Le tableau suivant :

Tableau 11:Classe d'occupation du sol

classes	Occupation du sol
1	Culture sèche (herbacée)
2	Culture en ligne (olivier, amandiers, arbres fruitiers, vignobles)
3	Irrigation
4	Forets
5	Arbustes denses
6	Arbustes clairsemés, pâturages

La carte obtenue (Fig. 23) montre que 80,9% du bassin de l'oued Boufekrane est occupé par des terrains cultivés et des arboricultures. Les Arboricultures (classe 2) fruitières représentent presque 30% de la Superficie Agricole, dont 26,7% est occupée par les oliviers. Les céréalicultures (classe 1) occupent une grande place avec un pourcentage de 51,6 %. Les zones de pâturage (classe 6) sont relativement moins abondants, ils n'occupent que 6,6% de la surface totale du bassin.

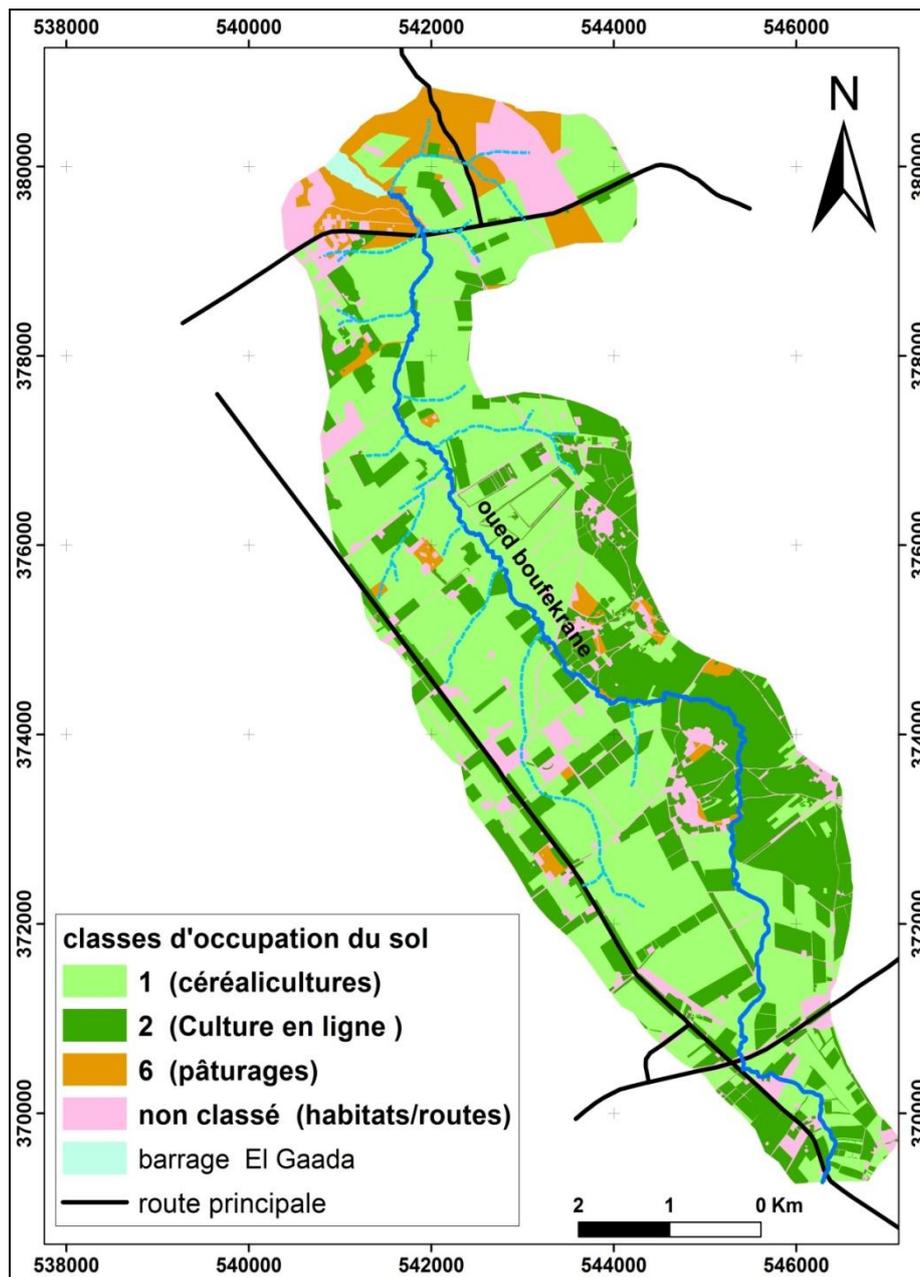


Figure 23: Carte d'occupation du sol de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

1.2.2 Carte de degré de couvert végétal

Pour classifier le degré du couvert végétal Les directives du PAP/CAR proposent Quatre classes, à chaque classe est assignée une valeur entre 1 et 4 selon le tableau suivant :

Tableau 12: Classes du degré de couvert végétal

Classes	Degré de couvert végétal
1	Inférieur à 25 %
2	25%-50%
3	50%-75%
4	Supérieur à 75%

La classification du degré de couvert végétale de l'oued Boufekrane est basée sur l'observation de l'image satellitaire de cette région, dont Les Arboricultures sont considérés comme une classe de densité moyenne (25%-50%), les autres occupations sont considérés comme une classe de faible densité (Inferieur à 25 %).

La carte de degré de couvert végétal du bassin de l'oued Boufekrane (Fig. 24) montre la présence de deux classes (1 et 2), à densité respectivement faible et moyenne. La densité faible est relative à toute surface où la végétation est inférieure à 25%, cette dernière occupe presque 20% de la surface totale du bassin. La densité moyenne du couvert végétale est la plus représentative car elle occupe 80,3% de ce bassin, cette classe est relative aux surfaces où le degré de couvert végétale prend une valeur entre 25% et 50%.

La dominance des terrains cultivés et des arboricultures (81%), et l'absence de la végétation dense (forêts, Arbustes denses) dans le bassin de l'oued Boufekrane, constituent la cause principale de la faible protection de ses sols, ce qui reflète l'importance des pratiques agricoles dans l'augmentation des risques de l'érosion, d'où la nécessité de l'intervention des facteurs socioéconomiques dans l'évaluation de l'érosion hydrique.

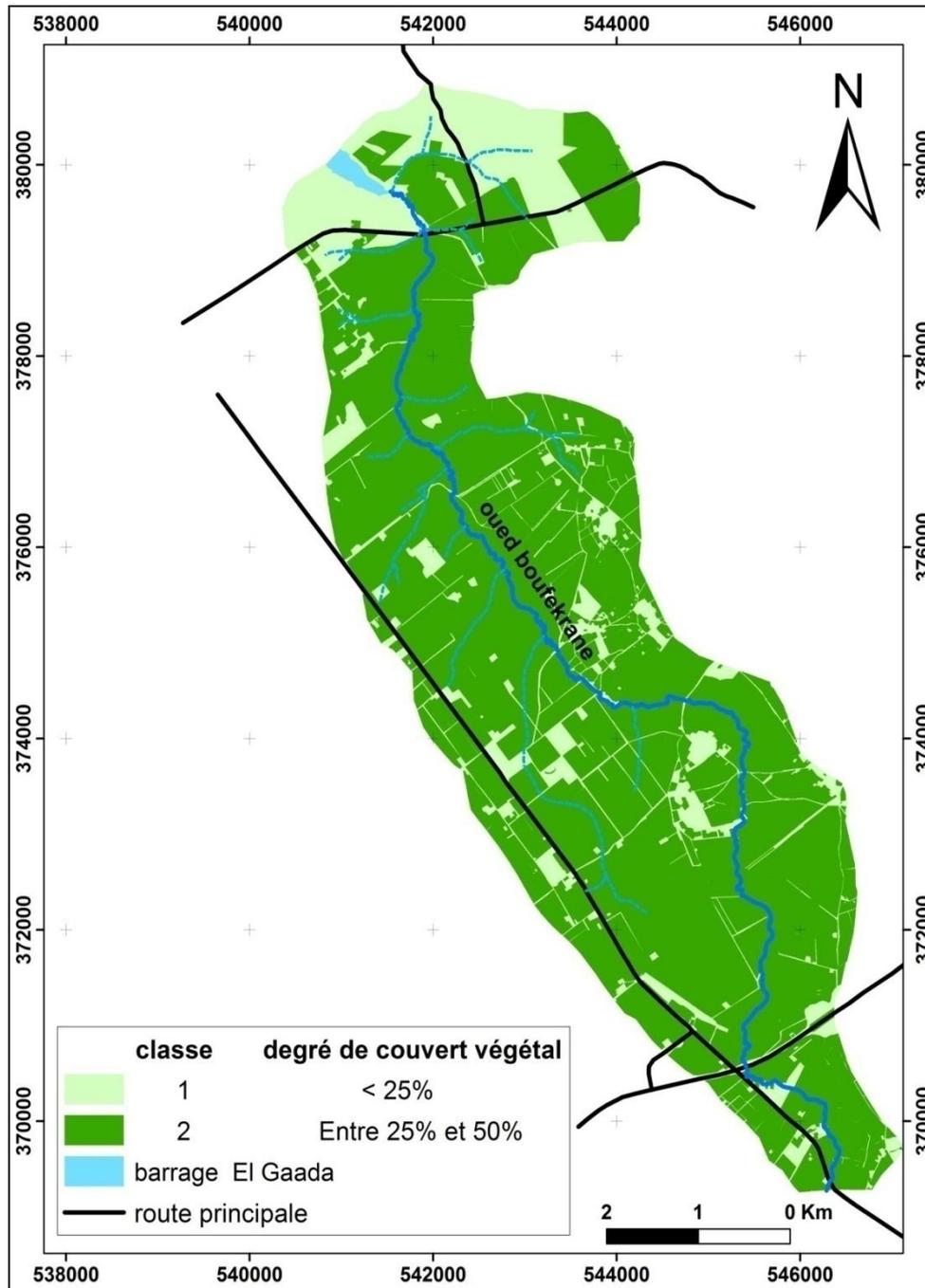


Figure 24: Carte des classes de degré de couvert végétal du bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

1.2.3 La carte de protection des sols

La carte de protection est réalisée par la superposition de La carte de l'occupation du sol et du degré de couvert végétale .Les polygones résultant de la superposition de ces 2 cartes de référence sont classés selon la matrice du tableau 12 :

Tableau 13:Matrice de la protection des sols

Occupation du sol	Couvert végétale			
	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)

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

Tableau 14:Classes du degré de protection des sols selon PAP/CAR

Classes	Degrés de protection des sols
1	Très élevé (MA)
2	Elevé (A)
3	Moyen (M)
4	Faible (B)
5	Très faible (MB)

La carte des classes de protection du sol (Fig. 25) montre que la valeur la plus fréquente est celle de la très faible protection (5 MB) avec un pourcentage de 84% de la superficie total du bassin. Donc le bassin de l'oued Boufekrane de point de vu végétation est généralement mal protégé. On peut dire que plus la région est agricole (dominance du couvert végétale de faible densité) moins le sol est protégé.

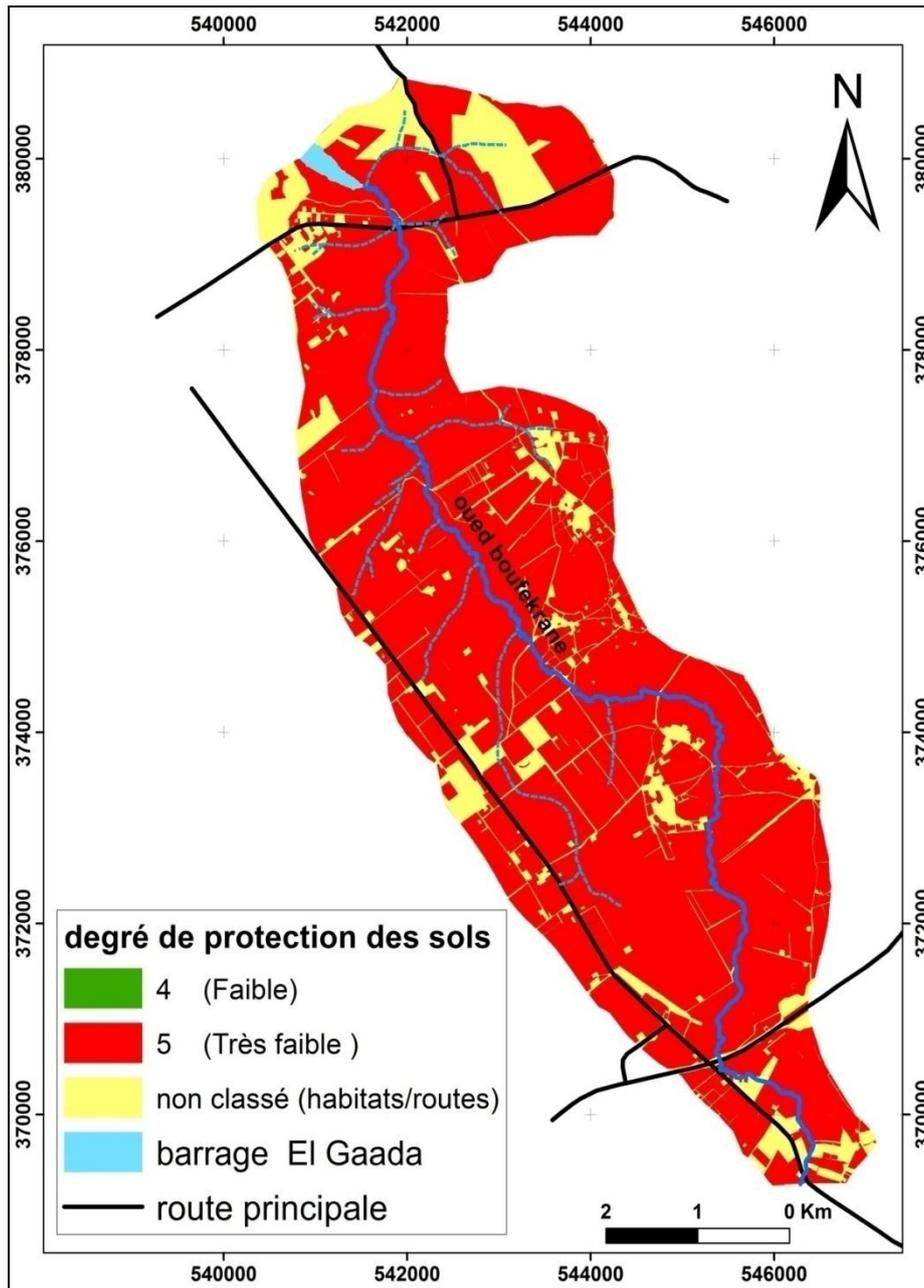


Figure 25: Carte de protection des sols du bassin de l’oued Boufekrane selon PAP/CAR

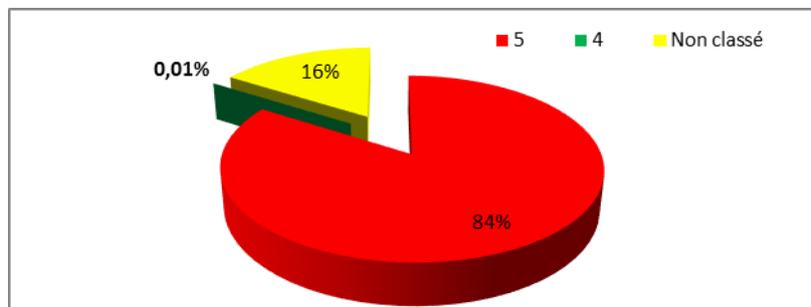


Figure 26: Pourcentage des degrés de protection dans le bassin de l’oued Boufekrane

1.3 Etape 3 : Etablissement de la Carte des états érosifs par superposition de la carte d'érodibilité et de protection des sols.

La carte des états érosifs (Fig.27) est le produit final de la phase prédictive, résulte de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte de degrés de protection des sols. Les polygones résultant sont classés selon la matrice du tableau suivant :

Tableau 15: Matrice des états érosifs des sols selon PAP/CAR

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

Les polygones obtenus sont classifiés par PAP/CAR selon le tableau suivant :

Tableau 16: Classes des états érosifs selon PAP/CAR

Classes	Degrés des états érosifs
1	Très faible
2	Faible
3	Notable
4	Elevé
5	Très élevé

La carte des états érosifs de l'oued Boufekrane, montre la dominance des classes faibles (2), qui se localisent dans les zones où la pente est faible, et/ou la lithologie est de nature compacte. La classe du degré d'érosion élevée (4) et notable (3), occupent des faibles surfaces, car elles représentent respectivement 8,2 % et 1,4% de la surface totale du bassin. La classe des états érosives très faibles (1) et très élevés (5) sont presque absents.

Au bord de l'oued Boufekrane, on remarque la présence des degrés d'érosion élevés et notables, cela dû à la présence des formations géologiques sédimentaires non cohésif, et des formations tendres (alluvions, marnes), déposés sur des pentes modérées (3-12%).

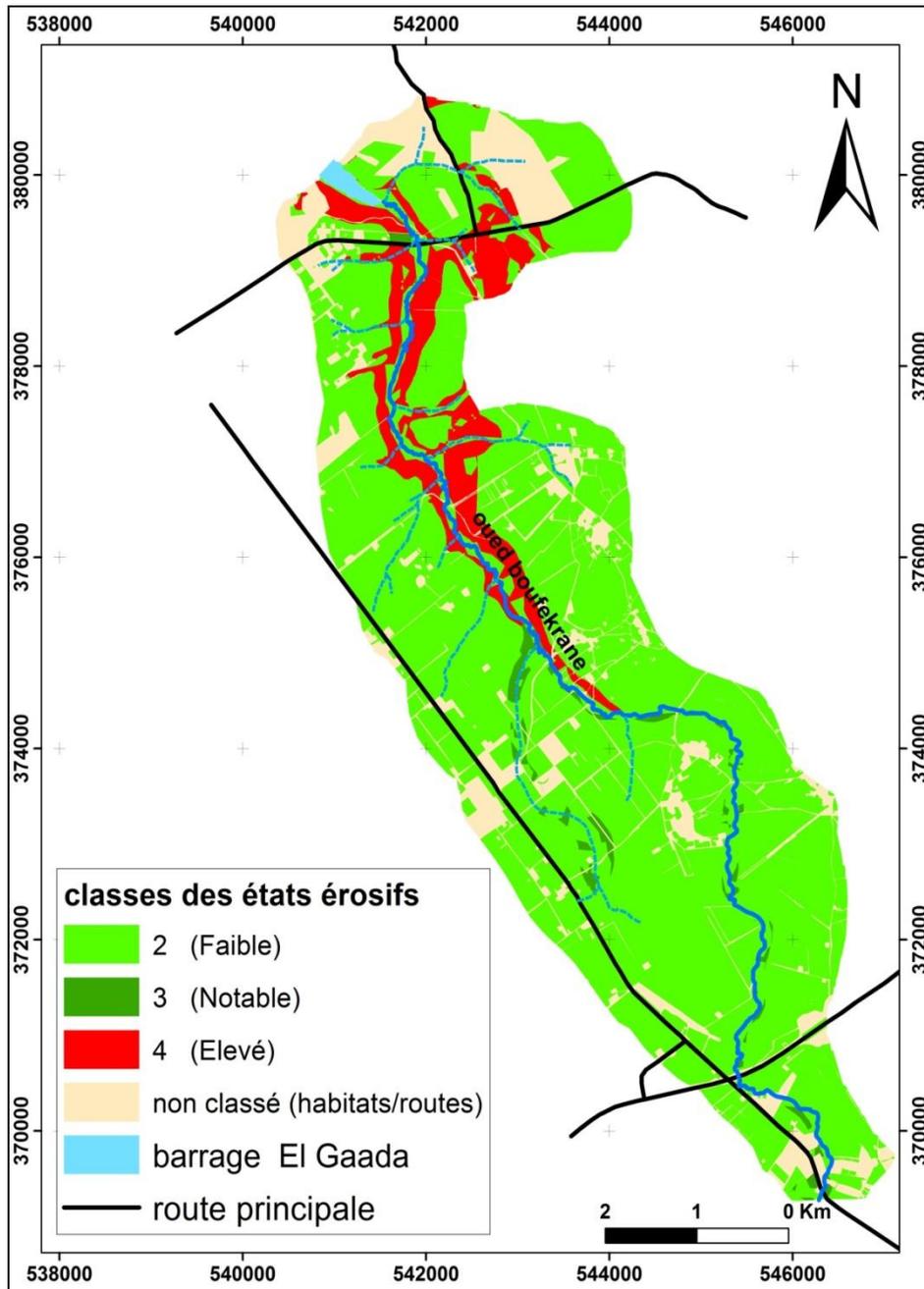


Figure 27: Carte des états érosifs des sols du bassin de l’oued Boufekrane selon PAP/CAR

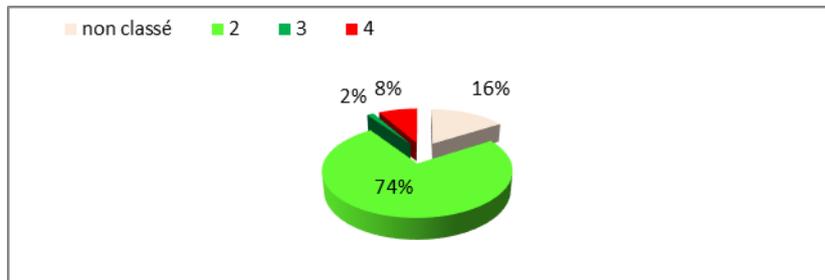


Figure 28: Pourcentage des classes du degré des états érosifs dans le bassin de l’oued Boufekrane

2 La phase descriptive, Carte de l'érosion réelle

Cette phase se base sur la délimitation cartographique des formes d'érosion qui caractérisent le bassin de l'oued Boufekrane selon Les directives du PAP/CAR, qui proposent des indications en lettres pour désigner la forme d'érosion, et des chiffres pour désigner l'intensité du processus selon le tableau suivant :

Tableau 17: Les indications en lettres et en chiffres proposées par PAP/CAR pour désigner les formes et les intensités de l'érosion hydrique

L	érosion en nappes ou diffuse
D	rigoles et ravinement superficiel
C	ravinement profond
M	glissement de terrain e solifluxion
L1, L2, L3..... LX	Erosion en nappe de plus en plus intense
D1, D2, D3,.....DX	érosion en rigoles et ravinement superficiel de plus en plus intense
C1, C2, C3,.....CX	Ravinement profond de plus en plus intense jusqu'au stade de ravinement généralisé CX (Badlands)
M1, M2, M3,.....MX	glissement de terrain e solifluxion de plus en plus intense
SP	Site protégé

Les formes d'érosion dans le bassin de l'oued Boufekrane sont déterminées par cartographie à partir de l'image satellitaire et la carte topographique de la zone d'étude. La carte résultante (Fig. 29) montre que le bassin de l'oued Boufekrane est menacé par deux formes de dégradation des sols :

L'érosion en nappe (le décapage L) : Le bassin de l'oued Boufekrane est une région agricole située dans une zone de plaine caractérisé par des faibles pentes (60, 6%), un couvert végétale de faible densité (ne dépasse pas les 50%), avec l'abondance des céréalicultures (51,6%), ces conditions rendent le sol exposés à l'effet des pluies et par la suit à l'érosion en nappe. Cette forme d'érosion touche 85 % de la surface totale de ce bassin et menace directement la productivité des terres cultivées.

L'érosion en ravins ou concentrée (découpage C) : Dans le bassin de l'oued Boufekrane l'érosion en ravins n'occupent que 2% de la surface totale du bassin, et se localises dans des zones où la pente est modérée (3-12%), et /ou de lithologie qui favorise le ruissèlement (marnes bleu, limons-argileux), avec toujours un couvert végétale de densité faible à moyenne.

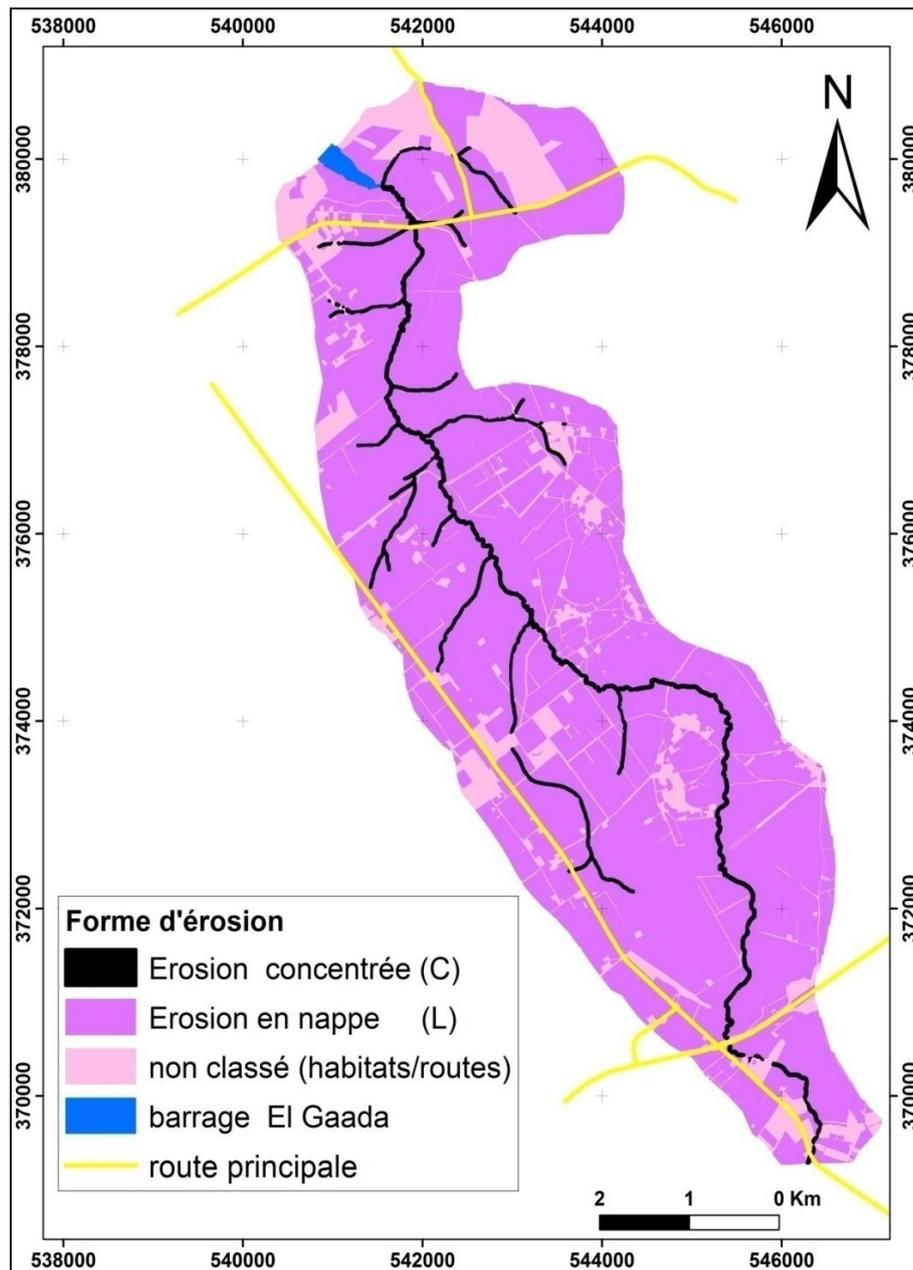


Figure 29: Cartes des différentes formes d'érosion hydrique dans bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

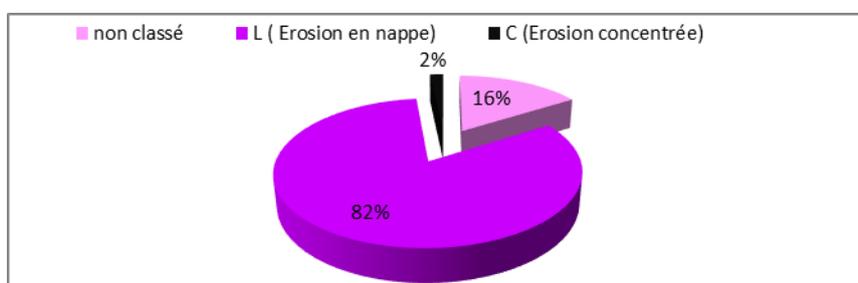


Figure 30: Pourcentage des formes d'érosion hydrique dans bassin de l'oued Boufekrane

3 Phase d'intégration : Carte consolidée d'érosion et carte des tendances

La phase d'intégration complète les résultats obtenus lors de la phase prédictive par les données descriptives des processus d'érosion. Le but de cette étape est la réalisation de la carte finale identifiant et évaluant, à la fois l'érosion potentielle (Statut érosif) et l'érosion actuelle sous ses différentes formes, intensités et tendances évolutives.

3.1 Carte consolidée de l'érosion

La carte consolidée de l'érosion (Fig.31) est le résultat de la superposition de la carte des états érosifs de la phase prédictive (Fig. 27), et la carte des formes d'érosion de la phase descriptive (Fig.29). Le produit de ce calage constitue une base de données qui cible les zones prioritaires nécessitant des actions de conservation et de lutte contre l'érosion. Les classes obtenues suite à ce calage sont citées selon leur importance dans le tableau suivant:

Tableau 18: Les différents types d'érosion selon leurs intensités dans le bassin de l'oued Boufekrane

Classe	Type et intensité d'érosion
1	Erosion en nappe (L) faible
2	Erosion en nappe (L) élevée
3	Erosion en nappe (L) notable
4	Erosion en ravins (C) faible
5	Erosion en ravins (C) élevée
6	Erosion en ravins (C) notable
7	Erosion en ravins (L) très élevée

La classe la plus dominante est celle de l'érosion en nappe de faible intensité, elle occupe plus que la moitié de ce bassin (53%). Cette classe est caractéristique des zones de faible pente, de lithologie compacte, et de moyenne densité de couvert végétal.

La classe de l'érosion en nappe élevée occupe 15% de la surface du bassin, elle se localise sur des pentes faibles à modérées, un substrat favorise le ruissèlement (marnes bleues), et un couvert végétal faible à moyen. C'est à partir de ce stade commence le ruissèlement des eaux et forme des rigoles.

La classe de l'érosion en nappe notable occupe 13% de la surface totale du bassin. Elle se trouve généralement sur des zones de faible pente où les sédiments sont limono-argileux.

La classe de l'érosion concentrée en ravins de faible intensité occupe une faible portion (3%) de notre bassin, elle se situe généralement à côté des écoulements de l'oued Boufekrane où la pente est plus importante (4-13%), et/ou le substrat est imperméable (marnes, limons argileux) favorisant le ruissèlement.

Les autres classes sont faiblement représentées, car elles n'occupent que 0,2% de la surface totale de ce bassin.

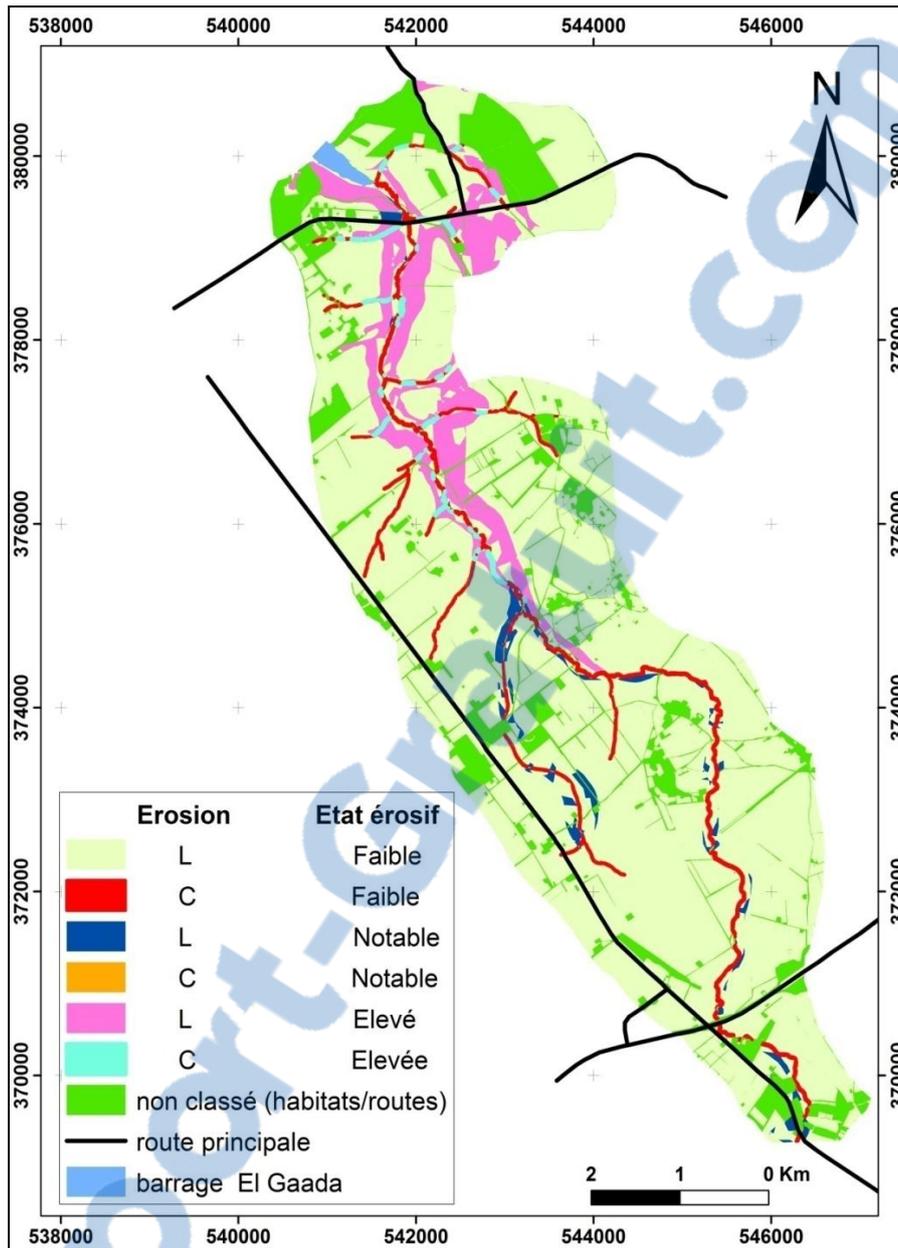


Figure 31: Carte consolidée de l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

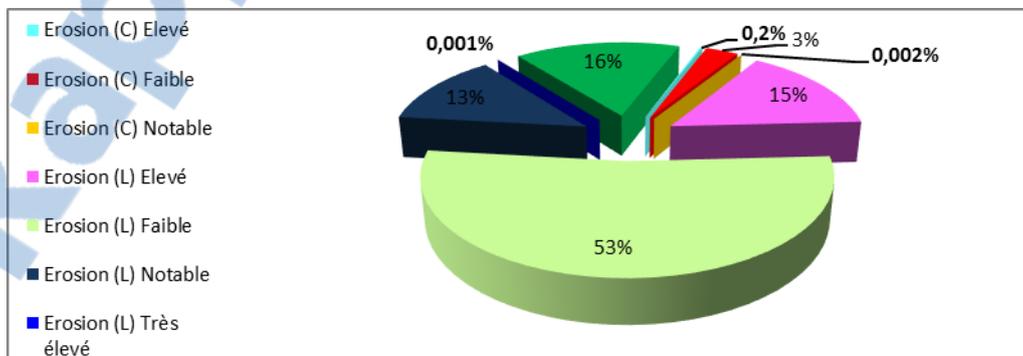


Figure 32: Pourcentage des formes d'érosion selon leurs degrés d'érosivité

On remarque que bassin de l’oued Boufekrane est dépourvu des zones totalement protégées contre l’érosion hydrique, cela est dû à sa situation dans une région agricole caractérisée par l’absence du couvert végétale dense (forets, arbustes dense), ce qui rend ce dernier totalement exposé aux risques d’érosion hydrique selon ces différentes intensités.

Les zones instables touchées par l’érosion hydrique (en nappe et en ravins) occupent presque 84%, le reste du bassin (16%) est occupé par les habitats et les routes (non classés) qui ne sont pas concernées par l’érosion hydrique.

La situation de ce bassin dans une zone de plaine (faibles pentes) n’empêche pas que ce dernier présente un risque d’érosions ce qui confirme le rôle important de la couverture végétale (type et densité) dans la protection du sol contre l’érosion hydrique.

3.2 Carte des tendances de l’érosion hydrique

En plus de la réalisation de la carte consolidée, cette phase permet de déterminer les tendances de l’évolution superficielle de l’érosion hydrique. Ces tendances sont déterminées selon une matrice qui rassemble les états d’érosion, et les formes d’érosion réelles.

Tableau 19:Matrice des tendances à l’érosion selon PAP/CAR

Etat érosifs	Formes d’érosion	
	Formes mineurs d’érosion SP, L, D	Formes majeures d’érosion C1.....CX
Erosion très faible	1	3
Erosion faible	1	3
Erosion notable	2	4
Erosion élevée	2	4
Erosion très élevée	2	4

Les indices de 1 à 4 des tendances proposés par PAP/CAR décrivent les différents comportements de l’érosion hydrique comme suivant :

1: Tendence est à la stabilisation, à la régression ou à la limitation de l'expansion spatiale du processus d'érosion lorsque les états érosifs faible ou très faible coïncident avec des formes d'érosion réelle mineures

2: La tendance est à l'expansion ou à l'intensification localisée du processus d'érosion quand il y a un état érosif prédit qui est élevé alors que les formes d'érosion sont minimales. Cela peut

vouloir dire qu'il y a d'autres facteurs en plus de ceux étudiés qui freinent et s'oppose à l'érosion.

3: La tendance est à l'expansion ou à l'intensification généralisée lorsque les états érosifs prédits selon les facteurs étudiés montrent une érosion faible alors que l'érosion réelle est plus importante et se manifeste par des formes plus spectaculaires. Dans ce cas d'autres facteurs accéléreraient l'érosion

4: La coïncidence d'un état érosif prédisant une érosion potentiellement élevée avec des formes d'érosions majeures indiquerait une tendance de la dégradation généralisée vers une situation irréversible.

La carte de des tendances de l'érosion (Fig. 33) montre la dominance de la tendance à la stabilisation, à la régression ou à la limitation de l'expansion spatiale du processus d'érosion qui occupe 31 % de la surface totale du bassin .les tendances localisée à l'expansion ou à l'intensification occupe 26 %.les tendances généralisées à l'expansion ou à l'intensification occupe 19 % .les tendances de la dégradation généralisée vers une situation irréversible occupe 8% de la surface totale du bassin.

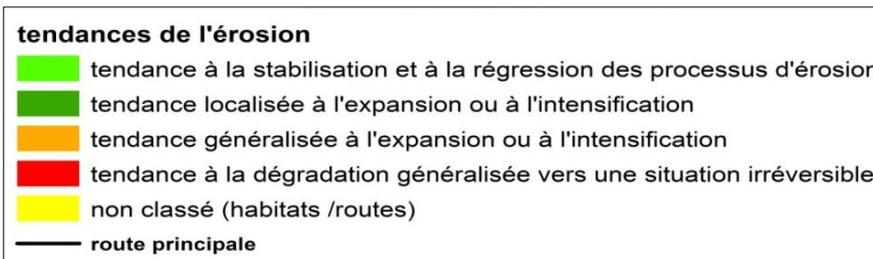
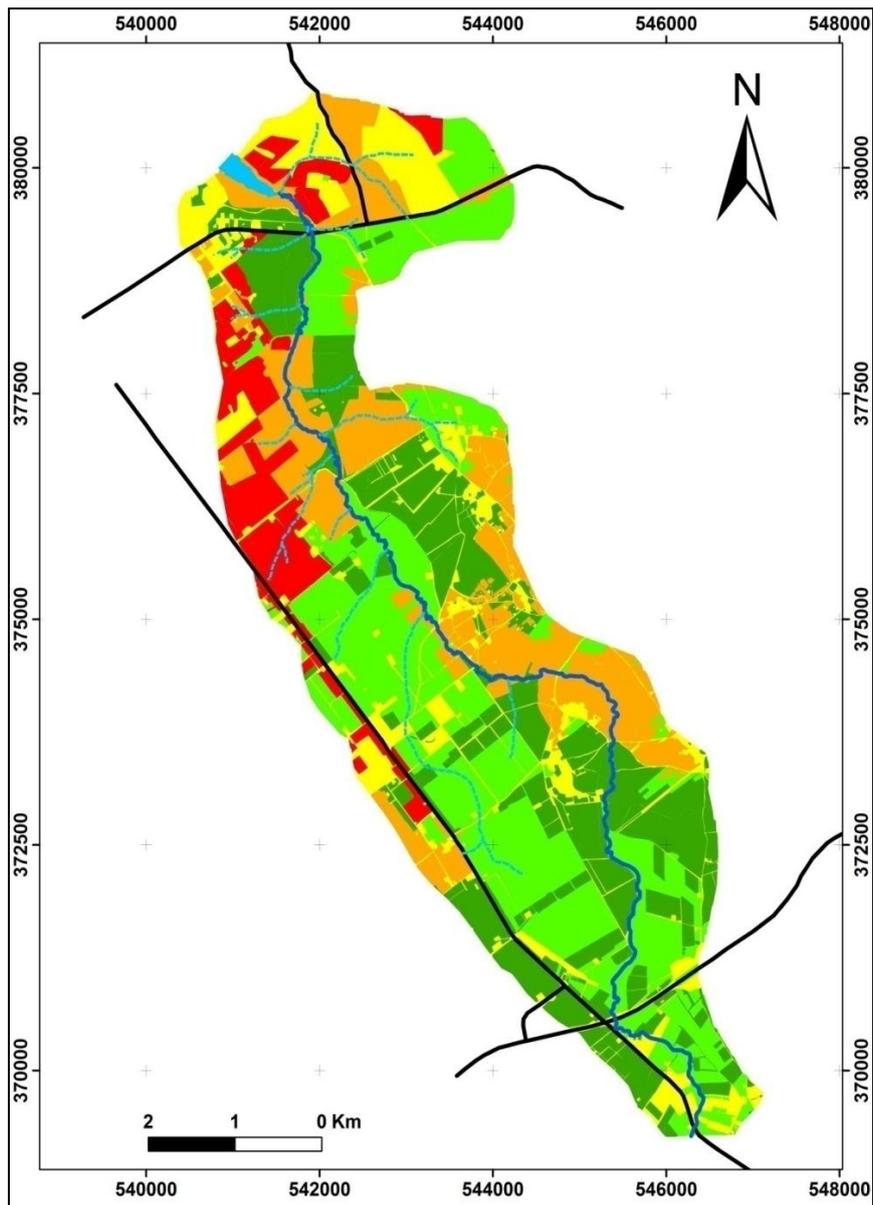


Figure 33: Carte des tendances de l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane selon PAP/CAR

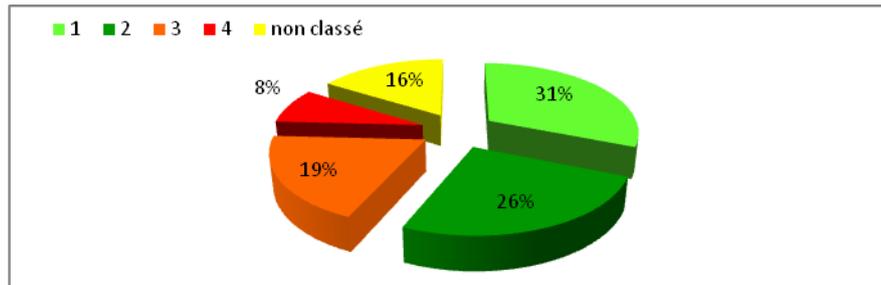


Figure 34: Pourcentages des tendances de l'érosion hydrique dans le bassin de l'oued Boufekrane

La carte des tendances constitue un outil d'orientation des décisions en matière d'aménagement du territoire, car elle décrit l'érosion réelle et son évolution avec le temps, ce qui permet d'hierarchiser le bassin en plusieurs zones de priorité.

Les indices de 1 à 4 des tendances décrivent une progression croissante des risques d'érosion. De ce fait l'indice 4 est relatif aux zones les plus prioritaires aux interventions de contrôle et de lutte contre l'érosion. Par contre l'indice 1 représente les zones non prioritaires qui représentent une tendance à la limitation de l'expansion spatiale du processus d'érosion (Fig. 35).

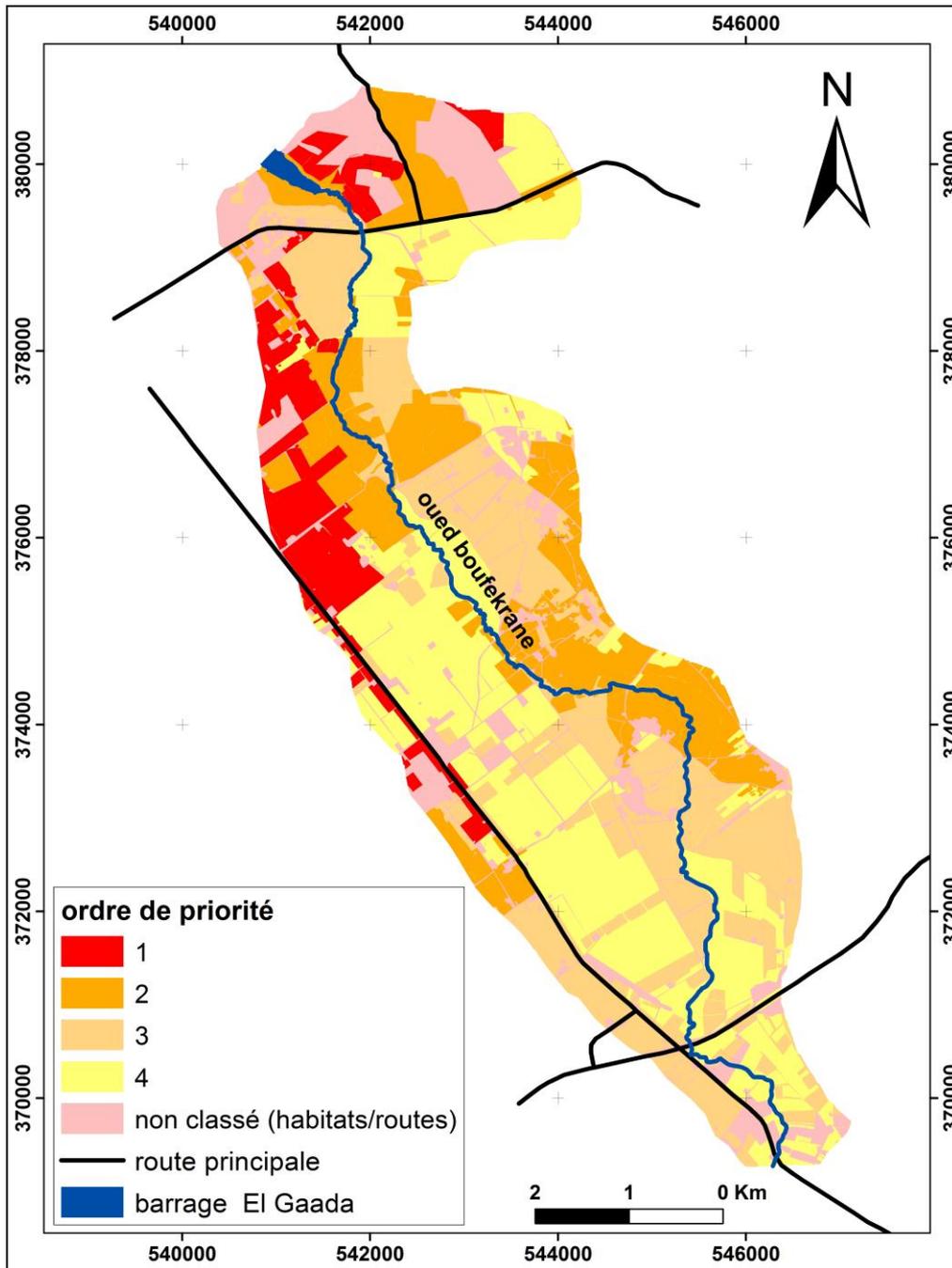


Figure 35: La carte de la hiérarchisation du bassin de l'oued Boufekrane selon les ordres de priorité

Conclusion Générale

La cartographie et l'estimation de l'érosion hydrique au moyen de la méthode PAP/CAR dans le bassin de l'oued Boufekrane a permis d'analyser et de comprendre la problématique de la zone d'étude sur le plan risques érosifs.

La première carte de la phase prédictive dite d'érodibilité, réalisée en tenant compte de la pente et de la lithologie, a montré que 89,4% du bassin présente un degré d'érodibilité faible relative à des zones de faible pente et de lithologie compacte. Les érodibilités fortes et modérées occupent relativement une faible portion (10,1%), et se situent dans des zones où les pentes sont faibles à modérées avec un matériel peu résistant (marnes) ou faiblement compactes (formation alluviales).

De point de vue couvert végétale, la carte de protection montre que 84% de la superficie totale du bassin est mal protégée, cela est dû aux faibles densités de la végétation (céréales, olivier, cultures en lignes), qui ne dépassent pas une densité de 50%, avec l'absence du couvert végétale dense (forêts ou arbustes denses).

La carte des états érosifs est l'étape finale de l'approche prédictive, fournit des informations sur l'état actuel de la dégradation, et montre que 74% de la surface totale du bassin est caractérisée par un faible état érosif, cela est dû à la situation du bassin dans une région de plaine où les pentes faibles sont les plus dominants (60,6%). Les états érosives élevées ne représentent que 8%, ils sont localisés dans les zones des pentes modérées et de lithologie non compacte (marnes bleues). Les états d'érosion modérés et extrêmes sont moins abondants, ils ne touchent que 2% du bassin.

L'approche descriptive a montré que le bassin de l'oued Boufekrane est totalement exposé aux risques d'érosion, cela est dû à l'absence de couvert végétale dense, ce qui rend ce dernier dépourvu des sites protégés (zone stables) vis-à-vis de l'érosion hydrique.

Les zones instables sont représentées par deux types d'érosion, chacun se manifeste avec des différents degrés de risque. L'érosion en nappe (L) est la forme la plus dominante, elle occupe 82% de la surface du bassin. L'érosion concentrée en ravins (C) est moins abondante, elle occupe 2% de la surface bassin, son intensité est en fonction de l'importance de la pente, et de la texture du sol.

La carte consolidée d'érosion montre que plus de la moitié de la surface du bassin (53%) est affectée par l'érosion en nappe de faible intensité, 13% est affectée par l'érosion en nappe d'une intensité notable, 15% est affectée par l'érosion en nappe élevée. L'érosion en rigole de faible intensité occupe 3%, elle se situe le long de l'oued Boufekrane relative à des zones où la pente, et la lithologie favorisent le ruissèlement.

La carte des tendances constitue le résultat final de la phase d'intégration, elle décrit les tendances de l'évolution de l'érosion dans les différentes parties du bassin de l'oued Boufekrane, donc elle constitue un outil pour orienter les décisions en matière d'aménagement du territoire et des méthodes du travail du sol, afin de limiter les risques de l'érosion hydrique dans ce bassin.

Bibliographie

ASRFM, 2016 –"Annuaire statistique régionale Fès-Meknès, 2016".163p.

BOU KHEIR R., GIRARDM C., KHAWLE M., FAOUR G., 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.

DUCHEMI M, 2000 –"Approche géomantique pour simuler l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des petits bassins versants agricoles". Thèse de doctorat, Université du Québec INRS-Eau.317p.

EI HAGE H., TOUCHART L., FAOUR G., 2011 –" Sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la bekaa ou Liban" .Mappemonde, N°109. Pp. 1-17.

FOURNIER F., 1949 –"Les facteurs climatiques de l'érosion du sol " .Bulletin de l'Association de géographes français, volume 26, N°202-203.pp 97-103.

FOURNIE F., 1954–" Influence des facteurs climatiques sur l'érosion du sol estimation des transports solides effectués en suspension par le cours d'eau ".Publication n°38 de l'Association Internationale d'Hydrologie, Assemblage de Rome 1954 .pp 283-288.

HORTON R., (1933) –" The role of infiltration in the hydrologic cycle". EOS, Transactions American Geophysical Union. Vol14, n°1.pp 446–460.

LAVABRE J., ANDRÉASSIAN V., 2000 –" La Forêt: un outil de gestion des eaux ? " . Forêt méditerranéenne, T. XXI, n°2.pp 146-153.

LE BISSONNAIS Y., 2000–"Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion : la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés ". Ingénieries - E A T, N° 22 juin 2000.pp 27-36.

LE BISSONNAIS Y., 1988 –" analyse des mécanismes de dégradation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies ".Thèse de doctorat, Université d'Orléans. 192p.

LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., et DAROUSSIN J., 2002 –" L'EROSION HYDRIQUE DES SOLS EN France ". Rapport INRA, IFEN, novembre 2002, 106p.

Le GALL M., 2016– "Traçage des sources de sédiments à l'amont des hydrosystèmes agricoles : apport de la géochimie élémentaire, du rapport Sr/Sr et des radionucléides " .Thèse de doctorat, L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY ,261 p.

LEGUEDOISE S., 2003 – "Mécanismes de l'érosion diffuse des sols Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés ".Thèse de doctorat, Université d'Orléans.156p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00516390/document>.

LE SOUDER C, 1990 – " Effet d'un conditionneur minéral sur la formation des croûtes superficielles du sol sous l'action des pluies"'.Thèse de doctorat, institut national agroéconomique, (PARIS-GRIGNON).149p.

MABIT L., LAVERDIERE M., CLAUDE B., 2002 – " L'érosion hydrique : méthodes et études de cas dans le Nord de la France". Cahiers Agricultures, Vol. 11, N°3. pp 195-206.

MGRFM, 2015– " Monographie générale de la Région de Fès-Meknès, 2015 "rapport .57p.

OUAZZANI A., 2008–"cartographie de l'érosion hydrique par l'usage de la télédétection et du SIG dans le bassin versant de l'oued Boufekrane». Mémoire de Master.76 P.

PAP/CAR, 1998 –" Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes". Rapport du Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires.72p.

QUANSAH C., 1981 –" The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport ". European Journal of Soil Science, Vol.32, n°2. pp 215–224.

REYNARD E., LASRI M., WERREN G., OBDA K., AMYAY M., et TAOUS A ., 2001 – "Carte des phénomènes d'inondation des bassins de Fès et Beni Mellal " . Rapport rédigé dans le cadre du projet du projet « Gestion du risque d'inondation dans deux bassins versants marocains : Fès et Beni Mellal.38p.

RIVAS-MARTINEZ S., 2004–" Global bioclimats (classification bioclimática de la Teirra) ".<http://www.globalbioclimatics.org>.

ROOSE E ., 1985 –" Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropicale conséquence sur les méthodes antiérosives " .Machinisme Agricole Tropical, N° 87. PP 4-36

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B., 1993– " érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCS" .CAHIERS ORSTOM série PÉDOLOGIE., vol. XXVIII, n° 2.PP 289-308.

SCET-Maroc, 1967 –" Etude pédologique au 1/100000 en vue de la mise en valeur agricole dans les cercles de Fès-Banlieue, de Karia et de Tissa provinces de Fès et de Taounate ". Rapport de mission.33p.

Rapport-Gratuit.com