



Année Universitaire : 2016-2017



Master Sciences et Techniques : Géorressources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant Oued R'dom par la méthode révisée de Wischmeier (RUSEL)

Présenté par:

Ikram EZ-ZEJJARI

Encadré par:

- Pr. Lahcen BENAABIDATE (FST-Fès)
- Pr. Fatima EL HAMMICHY (FP-TAZA)

Soutenu le 14 Juin 2017 devant le jury composé de:

- Mr. Hassan TABYAOUI (FP-TAZA)
- Pr. Lahcen BENAABIDATE (FST-Fès)
- Pr. Fatima EL HAMMICHY (FP-TAZA)

Stage effectué à : FST- Fès





Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Ikram EZ-ZEJJARI

Année Universitaire : 2016/2017

Titre: Estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant Oued R'dom par la méthode révisée de Wischmeier (RUSEL)

Résumé

Le bassin versant de Oued R'dom est situé au nord-ouest du Maroc. Il occupe une superficie de 1330.5 Km² et présente une forme allongée. Les altitudes varient de 23 m vers le nord à 1121 m vers l'est avec une moyenne de 552 m et un relief fort selon la classification du relief d'ORSTOM.

L'objectif de ce présent travail est d'estimer les pertes en sol au niveau du bassin versant Oued R'dom par l'utilisation de l'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE) de Wischmeier dans un Système d'Information Géographique. Le modèle de Wischmeier a été adopté pour la modélisation des principaux facteurs impliqués dans les phénomènes érosifs. Les facteurs majeurs sont l'érosivité des pluies, la couverture végétale et l'érodibilité qui dépend des caractéristiques physiques du sol, de l'action humaine sur le sol et du relief.

Le bassin versant Oued R'dom montre une érosivité R de 221 à 409. L'érodibilité des sols K varie de 0,01 à 0,46. Le facteur topographique LS varie de 0 à 23. La couverture végétale est bonne couverture. La superposition des différentes cartes de ces paramètres est faite sur ArcGis. Elle nous a permis de déduire la carte de perte en sol. Cette dernière montre que le phénomène d'érosion touche l'ensemble du bassin mais à des niveaux différents. Le taux moyen des pertes en sol est de 5,51 t/ha/an ; 78 % de la superficie du bassin versant présente une érosion faible (inférieur à 5 t/ha/an) et est enregistrée principalement à l'amont et à l'aval du bassin. 22 % de la superficie du bassin est exposée à une érosion modérée (entre 5 et 11,19 t/ha/an). L'érosion modérée est placés surtout dans les limites orientale et occidentale du bassin. Ces zones sont caractérisées par une pente forte, une érodibilité élevée et une érosivité de pluies importante.

Mots clés: Oued R'dom, Erosion hydrique, Equation Universelle des Pertes en Sol Révisée (RUSLE), Système d'Information Géographique (SIG).

Résumer

Le bassin versant de Oued R'dom est situé au nord-ouest du Maroc. Il occupe une superficie de 1330.5 Km² et présente une forme allongée. Les altitudes varient de 23 m vers le nord à 1121 m vers l'est avec une moyenne de 552 m et un relief fort selon la classification du relief d'ORSTOM.

L'objectif de ce présent travail est d'estimer les pertes en sol au niveau du bassin versant Oued R'dom par l'utilisation de l'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE) de Wischmeier dans un Système d'Information Géographique. Le modèle de Wischmeier a été adopté pour la modélisation des principaux facteurs impliqués dans les phénomènes érosifs. Les facteurs majeurs sont l'érosivité des pluies, la couverture végétale et l'érodibilité qui dépend des caractéristiques physiques du sol, de l'action humaine sur le sol et du relief.

Le bassin versant Oued R'dom montre une érosivité R de 221 à 409. L'érodibilité des sols K varie de 0,01 à 0,46. Le facteur topographique LS varie de 0 à 23. La couverture végétale est bonne couverture. La superposition des différentes cartes de ces paramètres est faite sur ArcGis. Elle nous a permis de déduire la carte de perte en sol. Cette dernière montre que le phénomène d'érosion touche l'ensemble du bassin mais à des niveaux différents. Le taux moyen des pertes en sol est de 5,51 t/ha/an ; 78 % de la superficie du bassin versant présente une érosion faible (inférieur à 5 t/ha/an) et est enregistrée principalement à l'amont et à l'aval du bassin. 22 % de la superficie du bassin est exposée à une érosion modérée (entre 5 et 11,19 t/ha/an). L'érosion modérée est placés surtout dans les limites orientale et occidentale du bassin. Ces zones sont caractérisées par une pente forte, une érodibilité élevée et une érosivité de pluies importante.

Abstract

The Oued R'dom catchment situated in the north-west of Morocco, this basin occupies an area of 1330.5 Km² with an elongated shape and it's characterized by an altitude ranging from 23 m to the north to 1121 m to the east with an average of 552 m and with a strong relief according to the classification of the Relief of ORSTOM.

The objective of this work is to estimate soil losses at the Oued R'dom watershed by using the Wischmeier universal receding soil loss equation (RUSLE) and Geographic Information Systems. The Wischmeier model has been adopted for the modeling of the main factors involved in erosive phenomenon. The major factors are the erosivity of the rains, the vegetation cover and the erodibility which depends on the physical characteristics of the soil, the human action on the ground and the relief.

In our basin, the erosivity factor R varies from 221 to 409. The soil erodibility factor K varies from 0.01 to 0.46. The topographic factor LS varies from 0 to 23. The map of the vegetation cover factor shows good coverage in general. The overlay of the different maps of these parameters is done on ArcGis allowing us to deduce the soil loss map, from which it is observed that the phenomenon of erosion affects the whole basin but at different levels. The average soil loss degree is 5.51 t/ha/yr, 78% of the catchment area is subject to low erosion of less than 5 t/ha/yr recorded mainly at the upstream and downstream of the basin, and 22% of the basin area is exposed to moderate erosion between 5 and 11.19 t/ha/yr. Moderate erosion is mainly located in the eastern and western limits of the basin, these areas characterized by a steep slope, high erodibility and high rain erosivity.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail. . . .

À toute ma famille que je remercie infiniment pour leur amour, leur patience, leur soutien, leurs encouragements, et leur confiance.

À mes professeurs.

Et

À mes chers amis qu'ils trouvent dans ce travail mon profond respect.

Acceptez ce travail comme témoignage de l'estime, le respect et le grand amour que je prouve pour vous.

Ikram EL-ZE LLAGI

Remerciement

Au terme de ce Projet de Fin d'Etudes, Je tiens à remercier Mr. Lahcen BENABIDATE, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique de Fès, Responsable du Master Géo-ressources et Environnement et Mme. Fatima EL HAMMACHI, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de Taza d'avoir proposé le sujet et encadré ce sujet de memoir.

Je tiens à remercier Mr. TABYAOUI Hassan, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de Taza, pour ses conseils pertinents et qui m'a aidé à réaliser mon projet dans les meilleures conditions.

Mes vifs remerciements s'adressent à ma famille et mes amis et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tout le corps professoral du Master « Géo-ressources et Environnement » à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, et également aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Liste des figures, des tableaux et des équations

Figure 1: Carte de situation géographique du bassin versant Oued R'dom.	12
Figure 2: Carte de la géologie régionale du bassin versant Oued R'dom.	15
Figure 3: Histogramme des précipitations moyennes annuelles des deux stations Meknès et My Idriss (1968/2003).....	16
Figure 4: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles des deux stations Meknès et My Idriss (1968/2003).....	17
Figure 5: Température moyenne annuelle °C station My Idriss période (1961/2009).	18
Figure 6: Température moyenne mensuelle °C station My Idriss période (1968/2003).	18
Figure 7: Diagramme ombrothermique de Gaussen de la station My Idriss (1968/2003).	19
Figure 8: MNT du bassin versant Oued R'dom.....	21
Figure 9: Carte hypsométrique du bassin versant Oued R'dom	22
Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant Oued R'dom.	23
Figure 11: Carte des pentes du bassin versant Oued R'dom.	25
Figure 12: MNT avec le réseau hydrographique du bassin.....	26
Figure 13: Carte de classification du RH selon le système de Strahler (1957).	27
Figure 14: Les sous bassin avec le réseau de drainage.....	28
Figure 15: Carte d'érosivité des pluies du bassin Oued R'dom. (Facteur R)	31
Figure 16: Carte d'érodibilité du sol du basin Oued R'dom. (Facteur K)	32
Figure 17: Carte du facteur topographique LS au niveau du bassin Oued R'dom. (Facteur LS).....	33
Figure 18: Relation entre NDVI et facteur C de RUSEL.....	34
Figure 19: Carte du NDVI du bassin versant Oued R'dom.	35
Figure 20: Carte du facteur de couverture végétale du bassin Oued R'dom. (Facteur C) ...	36
Figure 21: Organigramme méthodologique du modèle RUSLE appliqué.....	37
Figure 22: Carte des pertes en sols du bassin versant Oued R'dom.	38
Tableau 1: Les caractéristiques géographiques des stations météorologiques étudiées.....	16
Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles (mm) période de (1968/2003).....	17
Tableau 3: Température moyenne mensuelle °C station My Idriss période (1968/2003).	18
Tableau 4: Répartition de la surface totale par tranche d'altitude.	22
Tableau 5: Superficies cumulées au-dessus de l'altitude.	22
Tableau 6: Classification du relief par la méthode d'ORSTOM à partir de Ds.	24
Tableau 7: Valeurs de n.	33
Équation 1: Indice de compacité de Gravélius.....	20
Équation 2: Longueur et largeur du rectangle équivalent.....	21
Équation 3: Altitude moyenne.	23
Équation 4: Pente moyenne.....	24
Équation 5: Indice global de pente.....	24
Équation 6: Dénivelé spécifique.....	24
Équation 7: Densité de drainage.....	26
Équation 8: Constante de stabilité.....	27

Équation 9: L'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE)	29
Équation 10: Equation pour calculer le facteur R.	30
Équation 11: Formule de l'énergie cinétique des pluies.	30
Équation 12: Indice modifié de Fournier.	30
Équation 13: Relation entre R et F.	30
Équation 14: Facteur topographique LS	32
Équation 15: Equation général du NDVI.	34
Équation 16: Equation du NDVI par Sentinel-2.	35
Équation 17: Facteur C.	36

Table des matières

Résumer	3
Abstract.....	4
Dédicace	5
Remerciement	6
Liste des figures, des tableaux et des équations	7
Introduction	11
Chapitre I : Présentation général de la zone d'étude	
I- Introduction.....	12
II- Présentation de la zone d'étude	12
1- Situation géographique	12
2- Cadre géologique.....	12
2-1- Contexte géologique générale de tout le bassin.....	12
a-La meseta occidentale	13
b-Le Moyen Atlas.....	13
c-Le Couloir sud rifain.....	13
d-Les rides sud rifaines	14
e-Le domaine rifain	14
2-2- Contexte géologique générale de la partie étudiée.....	15
3- Contexte climatique.....	16
3-1- Précipitations	16
a-Précipitations moyennes annuelles	16
b-Précipitations moyennes mensuelles	16
3-2- Température.....	17
a-Température moyenne annuelle.....	17
b-Température moyenne mensuelle.....	18
3-3- Diagramme ombrothermique	18
4- Caractéristiques géométriques.....	20
4-1- Caractéristique de forme.....	20
a-Aire et Périmètre.....	20
b-Indice de compacité	20
c-Rectangle équivalent	20
4-2- Caractéristique du relief.....	21
5- Etude de la pente	23

5-1- La pente moyenne	23
5-2- Indice global de pente.....	24
5-3- Dénivelé spécifique (Ds)	24
6- Réseau hydrographique.....	25
6-1- Densité de drainage	26
6-2- Constante de stabilité.....	27
6-3- Type de drainage dans les sous bassins	27
Chapitre II : Estimation de l'érosion hydrique par l'équation Universelle Révisée de Perte en Sol (R.U.S.L.E) dans le bassin versant Oued R'dom	
I- Introduction	29
II- Equation Universelle Révisée de Perte en Sol (R.U.S.L.E)	29
1- Facteur pluie ou indice d'érosivité R	29
2- Facteur érodabilité du sol K.....	31
3- Facteur topographique LS.....	32
4- Facteur de couverture végétale C	34
4-1- Indice de végétation par différence normalisé NDVI	34
4-3- Facteur C.....	35
5- Facteur anti-érosives P.....	36
III-Evaluation des pertes en sol	37
Conclusion.....	39
Bibliographie	40
Webliographie	41
ANNEXES	42
Outils et données	42
1- Outils	42
Aperçu sur logiciel ArcGis	42
2- Les données d'entrés	43
Pluies et température moyenne annuelles (ABHS)	43

Introduction

L'érosion hydrique constitue la principale cause de dégradation des sols en plus de la détérioration de la qualité géochimique de l'eau qu'elle entraîne, elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt.

L'érosion hydrique est sous l'influence de deux grands facteurs que sont l'érosivité des pluies et l'érodibilité qui dépend des caractéristiques physiques du sol, de l'action humaine sur le sol et du relief. Ces éléments permettent de déterminer les facteurs de l'érosion hydrique (le climat, la morphologie de la zone, les caractéristiques du sol, la couverture du sol et les actions humaines).

Une large variété de modèles est disponible pour estimer le risque d'érosion des sols. L'Equation Universelle Révisée de Perte en Sol (RUSLE) (Wischmeier et Smith, 1978) a été utilisée car c'est le modèle qui demande le moins de données-sources et il a été appliqué largement à toutes les échelles. C'est un modèle empirique simple, basé sur des analyses de régression de taux de perte en sol.

La présente étude propose d'évaluer l'ampleur du phénomène d'érosion au niveau du bassin versant Oued R'dom et à le spatialiser en élaborant des cartes de risques érosifs à partir des données météorologiques, des cartes du sol, des images satellitaires du Sentinel-2 et des Modèles Numériques de Terrain (MNT) et toutes ces données sont utilisées dans le système ArcGIS. Cette étude est subdivisée en deux chapitres, le premier s'occupe de la présentation générale de la zone étudiée dans cette présentation on va parler de la situation géographique du bassin, le cadre géologique, le contexte climatique, les caractéristiques géométriques du bassin et le réseau hydrographique. Le deuxième chapitre présente l'Equation Universelle Révisée de Perte en Sol (RUSLE), les facteurs utilisés pour le calcul de perte en sol, les résultats calculés pour chaque facteur et l'estimation de l'érosion dans notre bassin sous forme de carte.

Chapitre I : Présentation général de la zone d'étude

I- Introduction

Oued R'dom est un affluent d'Oued Sebou, il est constitué par la réunion à une dizaine de kilomètres au NW de Meknès, de Oued Bou Fekrane, de Oued Ouisslane et de Oued Chejra.

Dans ce chapitre, on va présenter la zone d'étude on commençant par sa situation géographique, l'étude géologique et climatique, en suite présentation et calcule des caractéristique géométrique du bassin, et à la fin de ce chapitre on va faire une étude de pente et de réseau hydrographique au niveau du bassin.

II- Présentation de la zone d'étude

1- Situation géographique

Oued R'dom représente un affluent du bassin versant de Oued Sebou situé au nord-ouest du Maroc. Le bassin versant de Oued R'dom s'étend du Gharb jusqu'au moyen atlas en intégrant les rides sud-rifaines et il se forme lorsque Oued Bou Fekrane rejoint Oued Ouisslane et Bou Ishak au nord.

Le bassin versant est situé entre les coordonnées géographiques suivantes :

Latitude : $33^{\circ}30'00''$ N et $34^{\circ}30'00''$ N en DMS (degrés, minutes, secondes), 33.5 et 34.5 en DD (degrés décimaux) ;

Longitude : $5^{\circ}10'00''$ W et $6^{\circ}00'00''$ W en DMS (degrés, minutes, secondes), -5.16 et -6.00 en DD (degrés décimaux).

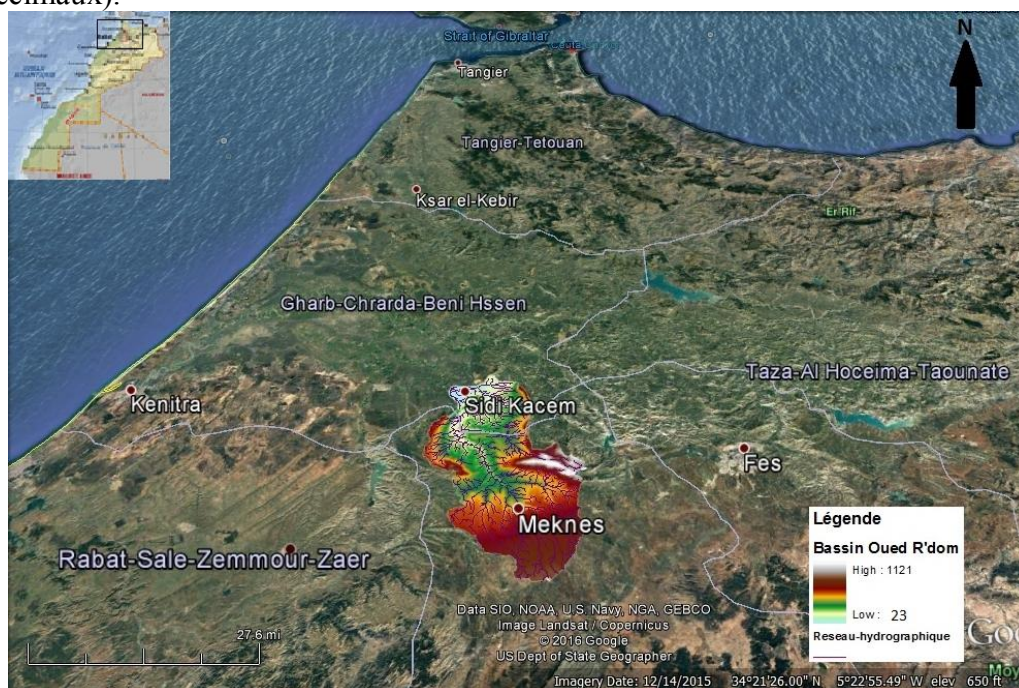


Figure 1: Carte de situation géographique du bassin versant Oued R'dom.

2- Cadre géologique

2-1- Contexte géologique générale de tout le bassin

Le bassin versant de Oued R'dom passe par plusieurs unité géologique, ces unités sont les suivant de l'amant vers l'aval :

- ✓ La Meseta occidentale (El Hajeb et ses régions),
- ✓ Le bassin de Saïss,

- ✓ Le bassin de Gharb.

a- La meseta occidentale

Le domaine Mesetien occupe la partie sud occidentale du bassin versant de Oued R'dom, ce domaine est bordé du côté sud-ouest par le bassin versant de Oued Bourrag et les affleurements calcaires du causse moyen atlasique, la plaine du Gharb et les affleurements des rides sud rifaines constituent la bordure septentrionale du domaine Mesetien. (Zian, 2011).

Le domaine mesetien constitue la principale zone orogénique de la chaîne varisque du Maroc. Il est caractérisé par une déformation hétérogène associée à des événements magmatiques divers dans un climat métamorphique contrasté. Ses diverses séries paléozoïques ont ainsi enregistré différemment les effets de l'orogénèse varisque et sont, par conséquent, subdivisées en plusieurs zones structurales. (Michard, 1976; Piqué & Michard, 1981, 1989; Piqué, 1994). Dans chacune de ces zones, les structures sont contemporaines et caractérisées par un régime et une intensité semblable à la déformation. Elles sont séparées les unes des autres par des accidents cisailant ou des chevauchements à jeu synmétamorphique. La tectonique post-paléozoïque est de faible ampleur dans ce domaine et il est justifié de considérer que ce domaine est resté instable depuis l'orogénèse hercynienne. L'élévation progressive de la partie orientale du domaine Mesetien, qui provoque le surcreusement des oueds dans cette région, est liée à la surrection du Moyen Atlas par la tectonique atlasique. (Zian, 2011).

b- Le Moyen Atlas

Le Moyen Atlas occupe la partie sud orientale du bassin versant de oued R'dom. Ses bordures :

- ✓ nord : les dépôts atlasiques sud rifaines ;
- ✓ sud : les affleurements des bassins versant d'Oum Rbia et de la Moulouya ;
- ✓ est : les affleurements moyens atlasiques du bassin versant de Moulouya ;
- ✓ ouest : les affleurements paléozoïques de la Meseta occidentale.

Le Moyen Atlas septentrional est constitué de point de vue structural par quatre rides anticlinales qui dépassent de larges zones synclinales. Les trois premières rides sont tracées sur leur front NW par des accidents très importants (Colo, 1961). Ses rides se succèdent du NW au SE, à partir de la ride anticlinale constituée par l'accident Nord Moyen Atlasique, le synclinal de Zloul et de Skoura, la ride de Jbel Tichoukt, le synclinal d'El Mers, ets ... (Piqué, 1994). Ces grandes lignes structurales ont une orientation WSW-ENE. Elles sont recoupées par des accidents obliques E-W, NW-SE ou SE plus récents (Colo, 1961).

c- Le Couloir sud rifain

Le bassin de R'dom passe par le bassin de Gharb et le bassin de Saïs.

- ✓ Le bassin de Gharb :

Le périmètre du Gharb est situé au nord-ouest du Maroc et couvre une superficie de l'ordre de 616 000 ha. Elle est entourée par l'Océan Atlantique, les dunes du Sahel, les collines du pré-Rif et le plateau Marmora.

La plaine du Gharb est une cuvette qui s'est affaissée au Quaternaire et dans laquelle se sont accumulés des sédiments continentaux très argileux. Jobidon et al (1991) ont montré, dans le flan méridional du Gharb, que le socle paléozoïque plonge du sud vers le nord du bassin sous forme d'un monoclinale non faillé. Même si ces failles existent, elles ne sont pas nombreuses. Vers le nord, la morphologie du toit du paléozoïque est plus compliquée et le socle se trouve ainsi découpé par des failles normales de direction prédominante NNE-SSW et N-S. les éléments structuraux du Gharb restent les failles listriques qui marquent l'épaississement des sédiments dans le bloc affaissé. Ces failles de croissance deviennent de plus en plus plates en profondeur (Jobidon et al, 1991).

- ✓ Le bassin de Saïs :

Dans le bassin de R'dom le Saïs forme une dépression globalement E-W, il est bordé au nord par la nappe pré rifaine et par les affleurements des rides sud rifaines, au sud il est limité par la bordure nord de la Meseta centrale et le causse Moyen Atlasique. A l'ouest, il est isolé de la plaine de Gharb

par Oued Beht et la ride d'El Kansera. La limite est du bassin c'est à quelque kilomètre à l'est du méridien de Fès près de la vallée de Oued Sebou.

La partie occidentale du bassin de Sais est traversé par une faille orienté NE-SW (faille d'Ain Lorma qui est subparallèle à la faille de Sidi Fili), cette faille isole à l'est le Mole de Meknès ou la sédimentation est relativement mince et vers l'ouest un graben du Tris-Lias ou la séquence salifère est très développée (Munro et Nahim, 1986). Plus à l'est de cette faille se trouve la flexure de Dar Ait Moussa qui délimite le plateau de Meknès vers l'est.

d- Les rides sud rifaines

Les rides sud rifaines sont situées à la limite méridionale du domaine rifain. Vers le sud, elles sont séparées du Moyen Atlas par la zone effondrée du Saiss. La limite occidentale des Rides comprend le Gharb, le pays d'Azemmour et la vallée de l'Oued Beht, alors que vers l'est, elles s'étendent jusqu'à la vallée de l'Oued Sebou (ride de Zalagh).

Les Rides sud rifaines se présentent en reliefs dominant des dépressions remplies de terrains néogènes et quaternaires. Les reliefs principaux sont disposés en deux arcs plus au moins concentriques. On y distingue deux grands ensembles :

- ✓ Un ensemble occidental localisé entre l'Oued R'dom et l'Oued Beht et présente une structure arquée : Jbel Bou Draa, Jbel Ari, Jbel Khaloua, Jbel Outita et Jbel Kefs avec d'autres petites rides associées.
- ✓ Un ensemble oriental renfermant des rides bien distinctes : Jbel Zerhoun, Jbel Nesrani, Fert El Bir, Dhar En-Nsour, l'unité Takerma-Kennoufa et plus à l'est Jbel Terhat et Jbel Zalagh.

Selon les auteurs, plusieurs interprétations ont été attribuées aux Rides sud rifaines. Daguin (1972) les a considérées comme des anticlinaux déversés vers le N-W et vers le S suite aux mouvements compressifs de la nappe pré rifaines. Faugères (1981) (in Ait Brahim, 1983) a considéré cette région comme appartenant aux bassins post-hercyniens qui bordent les marges africaine, américaine et ouest européenne.

Sur le plan structural (Faugères, 1978) chaque ride est liée à une ou plusieurs failles. Selon les directions de celles-ci, les rides se répartissent en trois groupes :

- ✓ Des rides liées à des failles N50-70 ; Jbel Balaas, Jbel Nouillat, Jbel Outita et Jbel Nesrani.
- ✓ Des rides liées à des failles N-S ; Jbel El Kanesera, Jbel Ari, Jbel Boukenfoud et Jbel Tselfat.
- ✓ Des rides à des failles N90-130 ; Koudiat Bou Azouf, Jbel Kefs, Jbel Zerhoun, Jbel Takerma, Jbel Kannoufa et Jbel Fert El Bir.

L'approfondissement des séries stratigraphiques des rides sud rifaines se fait des rides occidentales (rides de Bou Draa) vers des rides orientales (rides de Tselfat) et la partie méridionale vers la partie septentrionale.

e- Le domaine rifain

Le domaine rifain correspond à l'essentiel des affleurements du Maroc septentrional. Il est subdivisé en deux grandes parties ; le Rif interne et le Rif externe. Ce dernier fait partie du bassin versant du R'dom du fait qu'il occupe une partie septentrionale du bassin.

Le Rif externe est limité, vers le nord, par les affleurements du Rif interne alors que vers l'est, il est bordé par le môle de Tazekka et le Moyen Atlas nord-oriental. Sa limite méridionale est constituée par un avant pays plat correspondant aux bassins de Gharb et de Saiss.

Le Rif est subdivisé en trois zones (Michard, 1976) ; la zone infra-rifaine, la zone méso-rifaine et la zone pré-rifaine. D'après les travaux de Wildi (1983), la zone infra-rifaine correspond à l'unité de Ketama-Tanger. L'unité de Ketama est formée par des dépôts d'âge mésozoïque du Tris au Crétacé moyen (Andrieu, 1971 in Piqué, 1994). Cette unité est chevauchée par la nappe de Chouamat et elle chevauche elle-même, vers le sud, les unités méso-rifaines. Quant à l'unité de Tanger, elle est constituée par des dépôts d'âge crétacé et tertiaire.

La zone méso-rifaine est formée par des dépôts jurassico-crétacés surmontés par un Miocène discordant. En position anticlinale, elle correspond à des fenêtres d'autochtone relatif sous les nappes du Rif externe (Piqué, 1994).

La zone pré-rifaines comporte essentiellement des faciès marneux (Piqué, 1994). dans le pré-rif interne, les séries Jurassiques sont conservées, alors que le pré-rif externe se présente sous forme de nappes de charriage « Olistostromes » dont la complexité géologique ne permet pas d'y établir une succession stratigraphique continue et complète. (Zian, 2011).

2-2- Contexte géologique générale de la partie étudiée

Le bassin Oued R'dom occupe une large surface, alors pour ce projet la partie qui nous intéresse c'est juste la zone montrée dans la première figure. Ce bassin couvre une surface de 1330.5 Km², avec une élévation d'altitude varie entre 23 et 1121 m au-dessus du niveau moyen de la mer. La digitalisation de la carte géologique du Maroc 1/100 000 de 1985 donne la carte de la géologie régionale du bassin (figure 2). Cette dernière montre que notre zone couverte par 4 unités géologique. Le quaternaire occupe une petite partie à l'aval du bassin et une vaste partie à l'amont, le miocène situé au milieu, le jurassique se positionne dans au nord et dans les limites est et ouest du bassin et finalement le pliocène qui se trouve dans un petit espace au nord, une partie au milieu du bassin plus vers l'est et des zones vers l'amont du bassin. Pour l'étude des fracturations la carte montre que ces derniers sont rassemblés au nord du bassin et vers les limite est et ouest sur le jurassique. Les fracturations situées au nord du bassin ont en générale deux sens NW-SE et NE-SW, les fractures vers l'est et l'ouest du bassin ont des directions respectivement E-W et NW-SE.

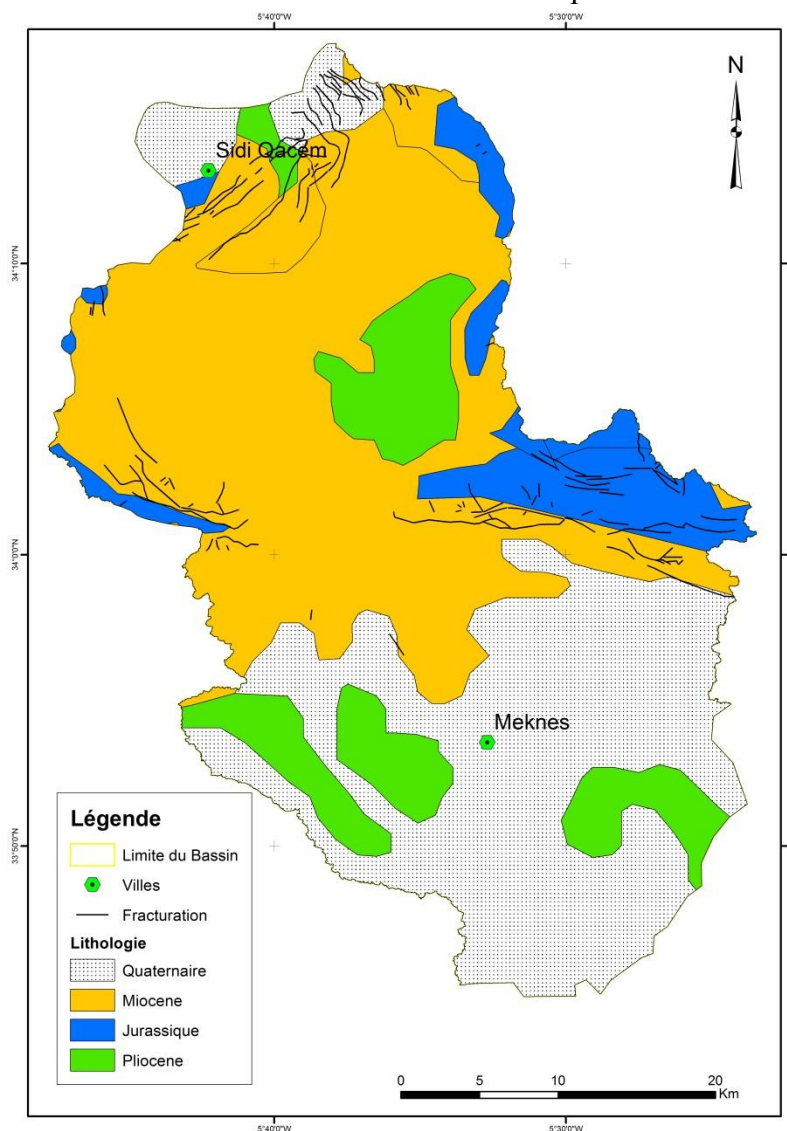


Figure 2: Carte de la géologie régionale du bassin versant Oued R'dom.

3- Contexte climatique

Les précipitations et la température constituent des principales composantes du cycle hydrologique et des facteurs majeurs responsables des phénomènes érosifs. Donc il faut faire une étude pour mieux comprendre le comportement climatique de la zone.

On va étudier dans cette partie les caractéristiques spatio-temporelle des paramètres climatiques enregistrés dans les deux stations suivantes (les plus proches de notre bassin): Meknès et My Idriss. Le tableau suivant illustre les caractéristiques géographiques de ces 2 stations.

Tableau 1: Les caractéristiques géographiques des stations météorologiques étudiées.

Nom	Longitude	Latitude
Meknès	5° 32' 50.17"W	33° 53' 36.67"N
My Idriss	5° 5' 2.04"W	33° 55' 22.44"N

3-1- Précipitations

Les données pluviométriques sont la base de toutes études hydrologiques (statistiques climatiques, planification et gestion des ressources en eau, délimitation des zones inondables).

Les données disponibles des deux stations météorologiques (Meknès et My Idriss) des précipitations sont de la période 1968/2003.

a- Précipitations moyennes annuelles

L'histogramme de précipitations moyennes annuelles des deux stations (Meknès et My Idriss) de la série 1968/2003 (figure 3) montre que les précipitations maximales relatives à cette période sont enregistrées en 1996 pour la station de My Idriss (1143 mm) et en 2000 pour la station de Meknès (1147.4 mm), pour les précipitations minimales ont été signalées pour les deux stations en 2001 (320 mm pour la station de My Idriss et 269.3 mm pour la station de Meknès). Les précipitations moyennes de cette série pour la station de My Idriss est de 603 mm, pour la station de Meknès les précipitations moyennes est de 564.7 mm.

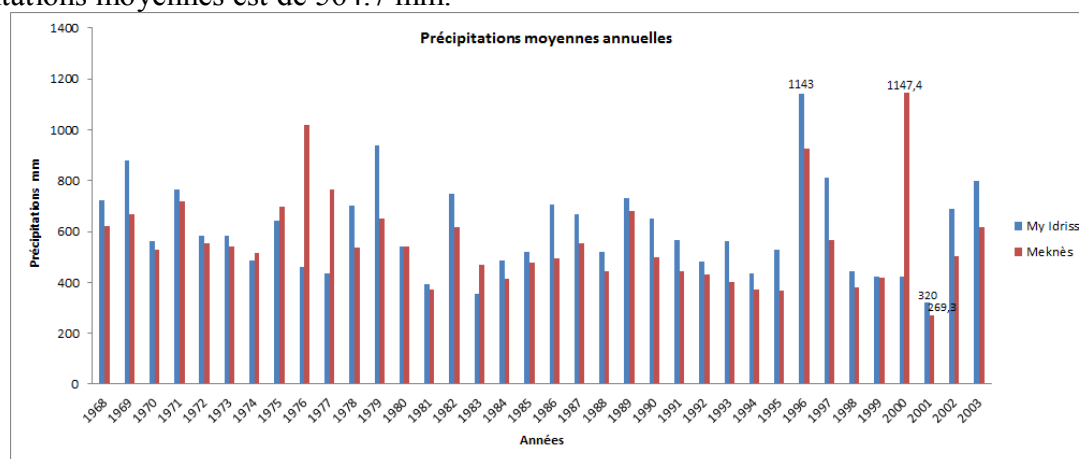


Figure 3: Histogramme des précipitations moyennes annuelles des deux stations Meknès et My Idriss (1968/2003).

b- Précipitations moyennes mensuelles

L'étude des précipitations moyennes mensuelles permet la connaissance de la répartition des pluies au cours de l'année (le régime pluviométrique). Le tableau et l'histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la période (1968/2003) (tableau 2, figure 4) montrent que le mois de décembre est le plus humide par une précipitation moyenne mensuelle de 87.5 mm, et le mois de juillet c'est le plus sec par une pluie moyenne mensuelle de 1.9 mm.

Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles (mm) période de (1968/2003).

Stations	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
Meknès	21,6	45,4	69,9	86,3	75,3	72,0	67,9	67,0	38,8	12,2	1,3	4,1
My Idriss	15,8	50,4	77,4	88,7	79,2	75,9	72,0	72,8	47,6	15,8	2,6	3,6
Moyenne (mm)	18,7	47,9	73,7	87,5	77,3	74,0	70,0	69,9	43,2	14,0	1,9	3,9

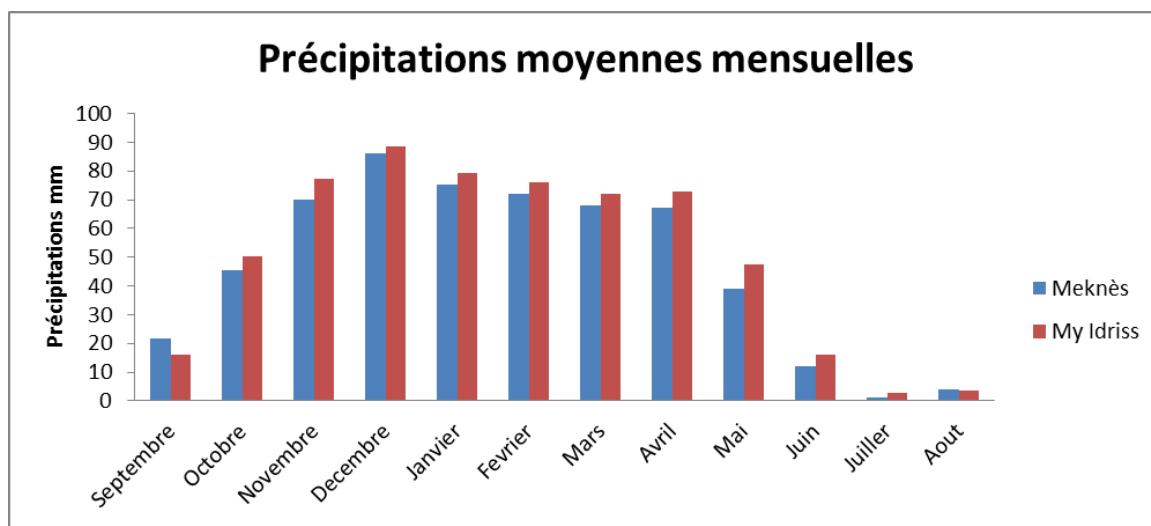


Figure 4: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles des deux stations Meknès et My Idriss (1968/2003).

3-2- Température

La température c'est un élément parmi les composantes principales du climat, elle représente un facteur primordial qui contrôle plusieurs paramètres du cycle de l'eau dont l'évaporation et l'évapotranspiration. Les données de température qui sont utilisées dans le cadre de cette étude proviennent de la station de My Idriss, la température moyenne annuelle en une période de 1961/2009, la température moyenne mensuelle en une période de 1968/2003.

a- Température moyenne annuelle

La courbe (figure 5) montre une température moyenne annuelle de 17,6 °C, une température maximale de 19.7 °C en 1997 et une température minimale de 16.1 °C en 1972.

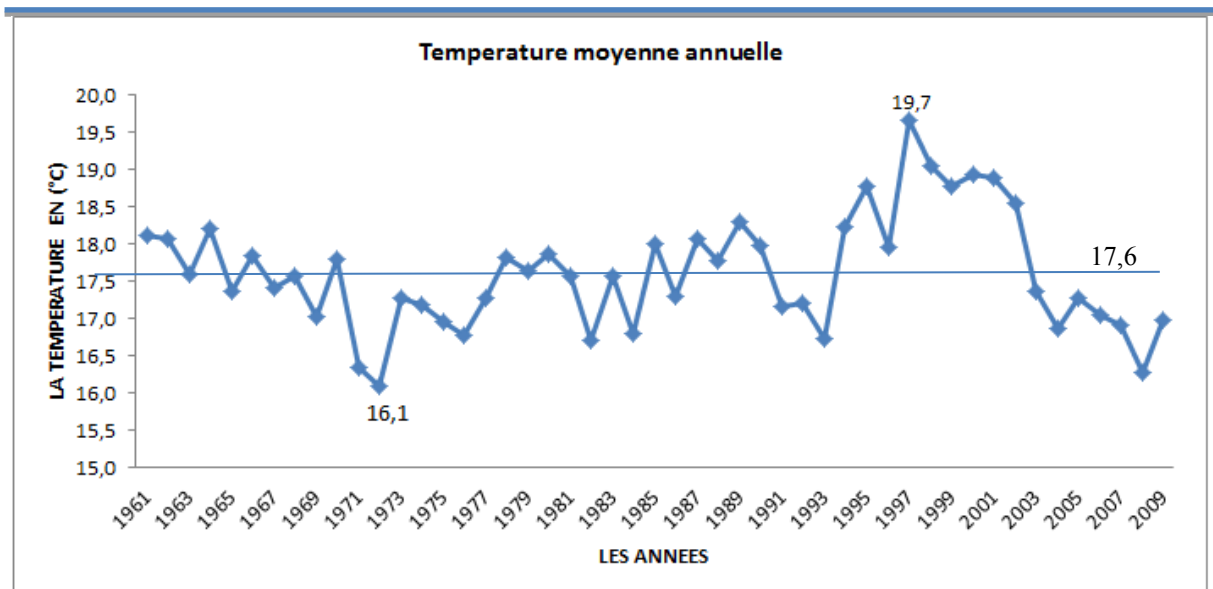


Figure 5: Température moyenne annuelle °C station My Idriss période (1961/2009).

b- Température moyenne mensuelle

A partir du tableau et la courbe de la température moyenne mensuelle (tableau 3, figure 6) on constate que le mois le plus froide c'est le mois de janvier avec une température moyenne minimale de 10,3 °C, le mois le plus chaud avec une température moyenne mensuelle de 26,7 °C c'est juillet.

Tableau 3: Température moyenne mensuelle °C station My Idriss période (1968/2003).

	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
Température moyenne mensuelle °C	23,4	19,2	14,7	11,1	10,3	11,6	13,5	14,8	17,9	22,4	26,7	26,6

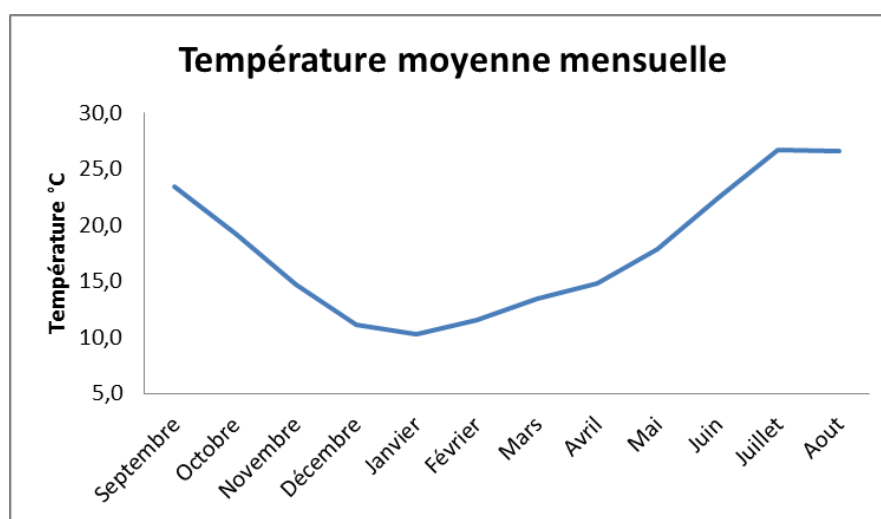


Figure 6: Température moyenne mensuelle °C station My Idriss période (1968/2003).

3-3- Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique de GAUSSEN 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 $P=2T$.

Le diagramme de Gausson pour la station de My Idriss dans la période de 1968/2003 (figure 7) montre que la période humide débute en octobre et finit en mai, alors que la saison sèche commence en juin et termine en septembre.

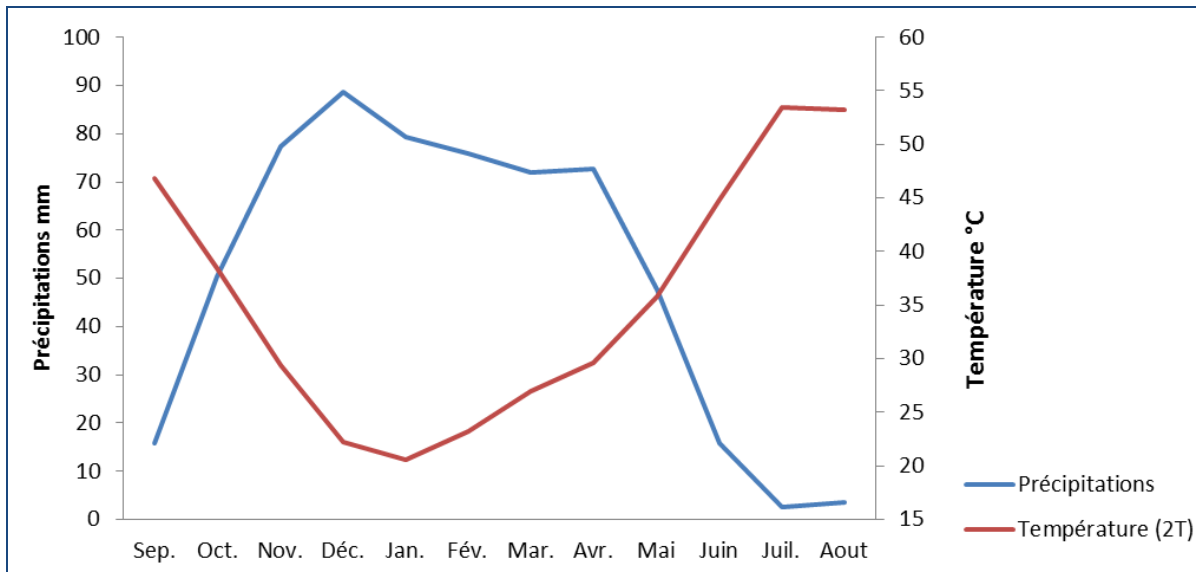


Figure 7: Diagramme ombrothermique de Gausson de la station My Idriss (1968/2003).

Donc en général le bassin versant Oued R'dom bénéficie d'un climat tempéré. La pluie tombe surtout en hiver, avec relativement peu de pluie en été. La température moyenne annuelle est de 17.6 °C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 582 mm.

4- Caractéristiques géométriques

4-1- Caractéristique de forme

a- Aire et Périmètre

L'aire et le périmètre d'un bassin versant jouent un rôle primordial dans les études des bassins versants. Leur influence se manifeste dans la nature de la relation entre le débit et le temps, donc un petit bassin versant réagit très vite à une averse.

L'aire est la partie du plan délimitée par la ligne de crête, ou la ligne de partage des eaux. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre, soit par la méthode des petits carrés ou, mieux, par des techniques de digitalisation comme dans notre cas par l'utilisation de la fonction 'calculate geometry' sur ArcMap. La surface est généralement exprimée en Km².

Le périmètre est la longueur de la ligne de contour du bassin. Sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre ou par des techniques de digitalisation comme dans notre cas par l'utilisation de la fonction 'calculate geometry' sur ArcMap. Le périmètre est généralement exprimé en km.

Le bassin de Oued R'dom s'étale sur une superficie d'environ 1330,5 Km² et un périmètre de 246 Km.

b- Indice de compacité

Par l'utilisation des caractéristiques de forme on peut connaître le degré d'allongement du bassin versant qui traduit sa réaction vis-à-vis de l'écoulement global contre les phénomènes météorologiques. Un petit bassin versant réagit très vite à une averse, les eaux se rassemblent rapidement, par contre un grand bassin versant réagit très lentement à une averse (effet ressenti très lent à l'exutoire).

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 (1914), défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Équation 1: Indice de compacité de Gravelius.

Avec :

K_G est l'indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant [km²] ;

P : périmètre du bassin versant [km].

Cet indice est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Le bassin versant de Oued R'dom a un indice de compacité de $K_G = 1,88$, donc ce bassin a une forme allongée.

c- Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle.

La longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent sont données par les relations suivantes :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2} \right]$$

Équation 2: Longueur et largeur du rectangle équivalent.

L et l : longueur et largeur du rectangle équivalent en Km ;

A et P : air et périmètre du bassin ; K_G : l'indice de compacité de Gravélius.

Pour le bassin versant oued R'dom $L = 111,01$ Km et $l = 11,98$ Km.

Les dimensions du rectangle équivalent traduisent que la longueur est 10 fois plus grande que la largeur.

4-2- Caractéristique du relief

L'étude des caractéristiques du relief d'un bassin versant ce fait dans le but de déterminer sa morphologie, son comportement hydrologique et sa réaction aux phénomènes météorologiques. L'altitude influence la plupart des facteurs hydroclimatiques (précipitation, température...), pour cela il est nécessaire de connaître la répartition de la surface en fonction de l'altitude. La classification des altitudes et le calcul des surfaces est fait sur ArcMap par l'utilisation du MNT (Module Numérique de Terrain) du bassin.

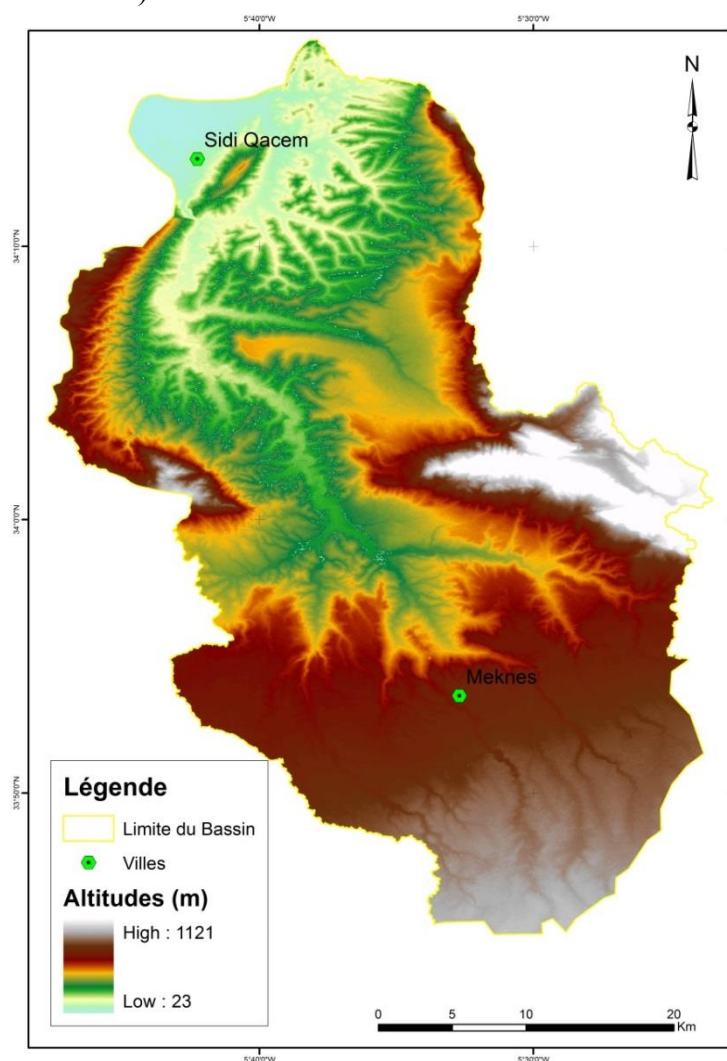


Figure 8: MNT du bassin versant Oued R'dom.

Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue totalisante du relief du bassin. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte sur son axe des ordonnées le pourcentage de surface du bassin qui se trouve au-dessus de l'altitude représentée sur l'axe des abscisses.

Tableau 4: Répartition de la surface totale par tranche d'altitude.

Altitude (m)	Surface (km ²)
23 - 200	154.9
200 - 400	452.8
400 - 600	472
600 - 800	213
800 - 1000	35.3
1000 - 1121	2.5
totale	1330.5

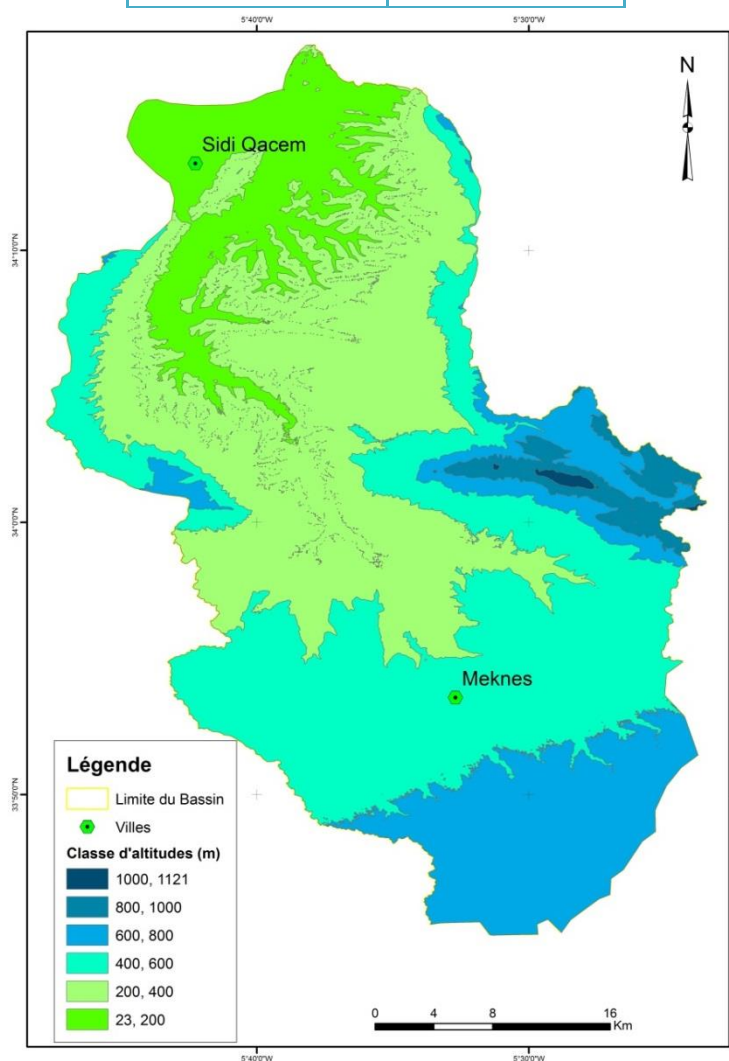


Figure 9: Carte hypsométrique du bassin versant Oued R'dom.

Tableau 5: Superficies cumulées au-dessus de l'altitude.

Altitude (m)	surfaces cumulées supérieures à l'altitude (Km ²)	Pourcentage de la surface cumulée (%)
23	1330.5	100

200	1175.6	87.95
400	722.8	52.71
600	250.8	19.48
800	37.8	2.89
1000	2.5	0.14
1121	0	0

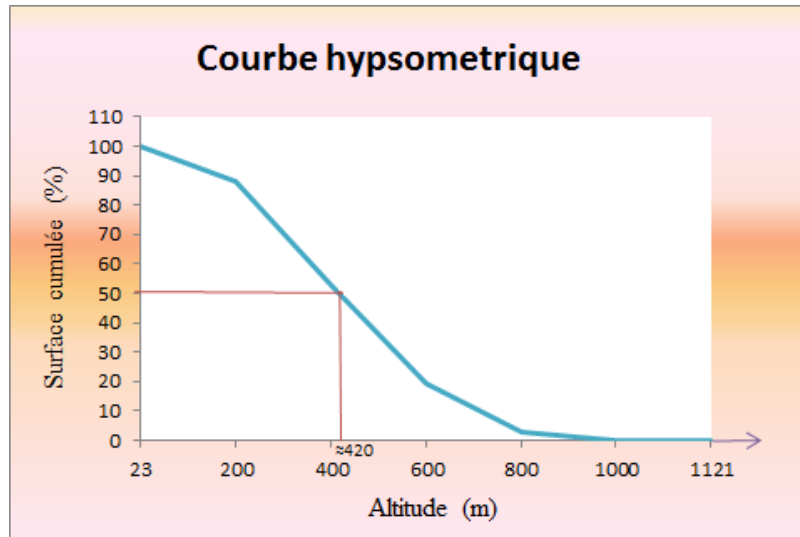


Figure 10: Courbe hypsométrique du bassin versant Oued R'dom.

La forme de la courbe hypsométrique de notre bassin montre que ce dernier est un vieux bassin, c'est-à-dire une plaine douce près d'un cours d'eau où l'altitude varie très peu malgré une superficie importante. Les caractéristiques hypsométriques de ce bassin sont les suivantes :

- ✓ Altitude moyenne: c'est la moyenne entre les altitudes maximale et minimale :

$$Alt. moy = \frac{(Alt. max + Alt. min)}{2}$$

Équation 3: Altitude moyenne.

Dans notre bassin : Alt.max=1121 m , Alt.min=23 m , Alt.moy=572 m.

- ✓ Altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ ou médiane : c'est l'altitude correspondant au point d'ordonnée 50% de la courbe hypsométrique. La courbe hypsométrique (figure 10) montre que l'altitude de fréquence $\frac{1}{2}$ dans notre bassin égale à 420 m.
- ✓ Altitude la plus fréquente : c'est le maximum de la courbe des fréquences altimétriques ou aussi c'est l'altitude de la plus grande surface élémentaire comprise entre deux courbes de niveau successives. Dans notre bassin la plus grande surface élémentaire (452 km²) est comprise entre 200m et 400m.

5- Etude de la pente

La pente c'est une caractéristique physique qui dépend essentiellement de la topographie du bassin versant, elle est considérée comme variable déterminante sur le temps de concentration du ruissellement et l'influence sur le débit de point après une averse.

5-1- La pente moyenne

La pente moyenne d'un bassin versant est la différence entre les hauteurs maximum et minimum par longueur du rectangle équivalent :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L}$$

Équation 4: Pente moyenne.

H_{max} : Altitude maximale (m) ;

H_{min} : Altitude minimale (m) ;

L : Longueur du rectangle équivalent (Km).

H_{max} et H_{min} dans notre bassin sont respectivement 1121 m et 23m, L = 111,01 Km, alors la pente moyenne égale à 9.89 m/Km.

5-2- Indice global de pente

Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5%. On déduit les altitudes H_{5%} et H_{95%} entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin et la dénivelée : D = H_{5%} - H_{95%}.

L'indice global est égal à:

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L}$$

Équation 5: Indice global de pente.

H_{5%} : Altitude au-dessus de laquelle il reste 5% de la surface du bassin versant ;

H_{95%} : Altitude au-dessous de laquelle il reste 5% de la surface du bassin versant ;

L : Longueur du rectangle équivalent.

Dans le bassin versant de Oued R'dom H_{5%} = 1263,9 m ; H_{95%} = 66,5 m et L = 111,01 Km.

Alors I_g = 10,78 m/Km.

5-3- Dénivelé spécifique (Ds)

Dénivelé spécifique sert à la classification du bassin versant, il est calculé par la formule suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{A}$$

Équation 6: Dénivelé spécifique.

I_g : Indice global de pente ;

A : Surface du bassin versant (km²).

Le dénivelé spécifique dans notre bassin égale à 393,4 m.

Tableau 6: Classification du relief par la méthode d'ORSTOM à partir de Ds.

Classe	Type de relief	Valeur de Ds
R1	Relief très faible	Ds<10
R2	Relief faible	10<Ds<25
R3	Relief assez faible	25<Ds<50
R4	Relief modéré	50<Ds<100
R5	Relief assez fort	100<Ds<250
R6	Relief fort	250<Ds<500
R7	Relief très fort	Ds>500

La classification du relief selon l'ORSTOM (tableau 6) montre que la valeur du dénivelé spécifique caractérise un relief fort.

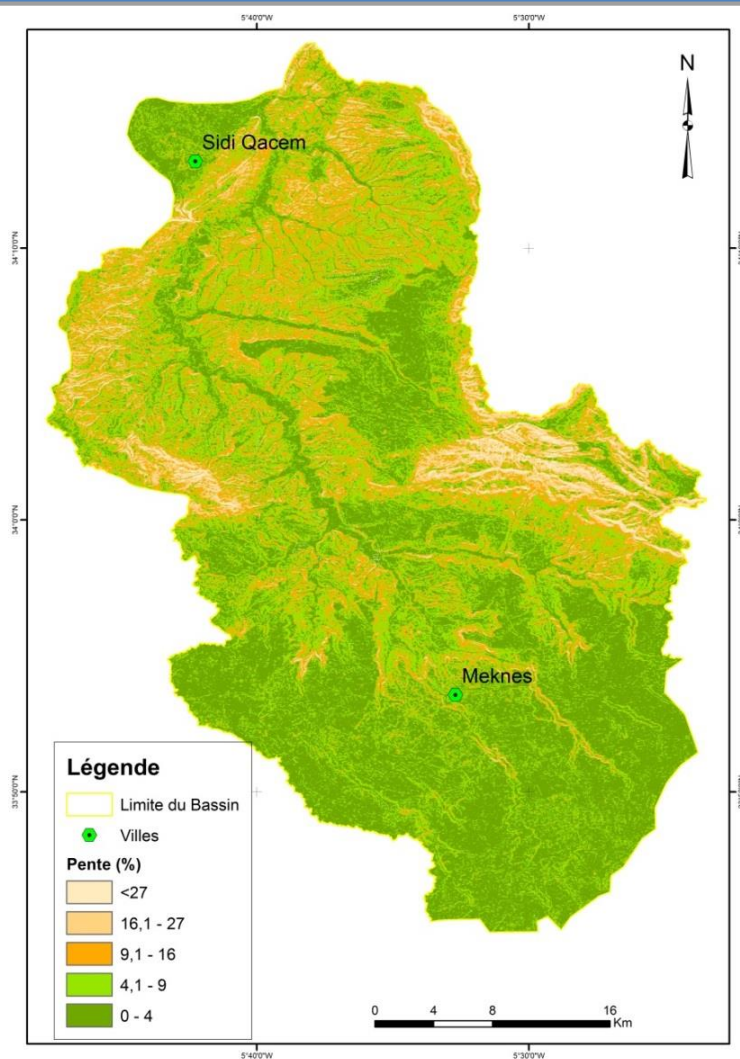


Figure 11: Carte des pentes du bassin versant Oued R'dom.

6- Réseau hydrographique

Un réseau hydrographique un ensemble structuré de chenaux qui assurent le drainage superficiel, permanent ou temporaire, d'un bassin versant. Le réseau hydrographique se distingue par son cours d'eau principal pour le bassin Oued R'dom il présente longueur de 97,82 km, auquel s'ajoute de nombreux affluents pour attribuer au réseau hydrographique une longueur total de 993,8 km. Ces principaux affluents se répartissent de l'amont vers l'aval comme suit (Zian, 2011) :

- ✓ Oued Boufekrane : prend naissance à Ain Rta (Région d'Agouray) à une altitude de 1000 m au pied de Jbel Ksiksou. Il a une longueur d'environ 45Km et rejoint le cours d'eau principal du bassin étudié à environ 2 Km au NW de Meknès. Il est alimenté par plusieurs sources (Ain Maaza, Aine Atrouss..) et Seguias (Taoura, Sfia et Siali Abdelaziz, Dardoura). Enfin, il constitue l'un des Oueds potentiel fournisseurs des eaux d'irrigation pour les agricultures de la région. (Zian, 2011).
- ✓ Oued Ouisslane : prend naissance à partir des frontières sud de la Wilaya de Meknès à une altitude d'environ 1400m. c'est un cours d'eau de direction NW-SE de longueur environ 54 km rejoignant le cours d'eau principal à environ 5 km à la sortie de la route Meknès-Sidi Kacem. (Zian, 2011).
- ✓ Oued Sejra : troisième affluent de Oued R'dom, prend naissance dans le Moyen Atlas aux environs d'El Hajeb à une altitude de 1200 m. sa longueur totale est d'environ 65 km et rejoint le cours d'eau principal à environ 9 km à la sortie de la route Meknès-Sidi Kacem.

La grande partie de son cours d'eau est temporaire, alors que sur une dizaine de kilomètres il est permanent. (Zian, 2011).

- ✓ Oued Kroumane : prend naissance au niveau des rides NW du bassin, au pied de Kalaa Nessrani près du village Moussaoua, à une altitude de 900m. alimenté par quelques sources de Jbel Zerhoun (ex : souce d'El Hamma), on le retrouve presque toujours permanent. Il s'étend jusqu'à la route de Meknès-Sidi Kacem ou il s'intersecte au cours d'eau principal (Oued R'dom) du bassin à environ 10 km de Sidi Kacem. (Zian, 2011).

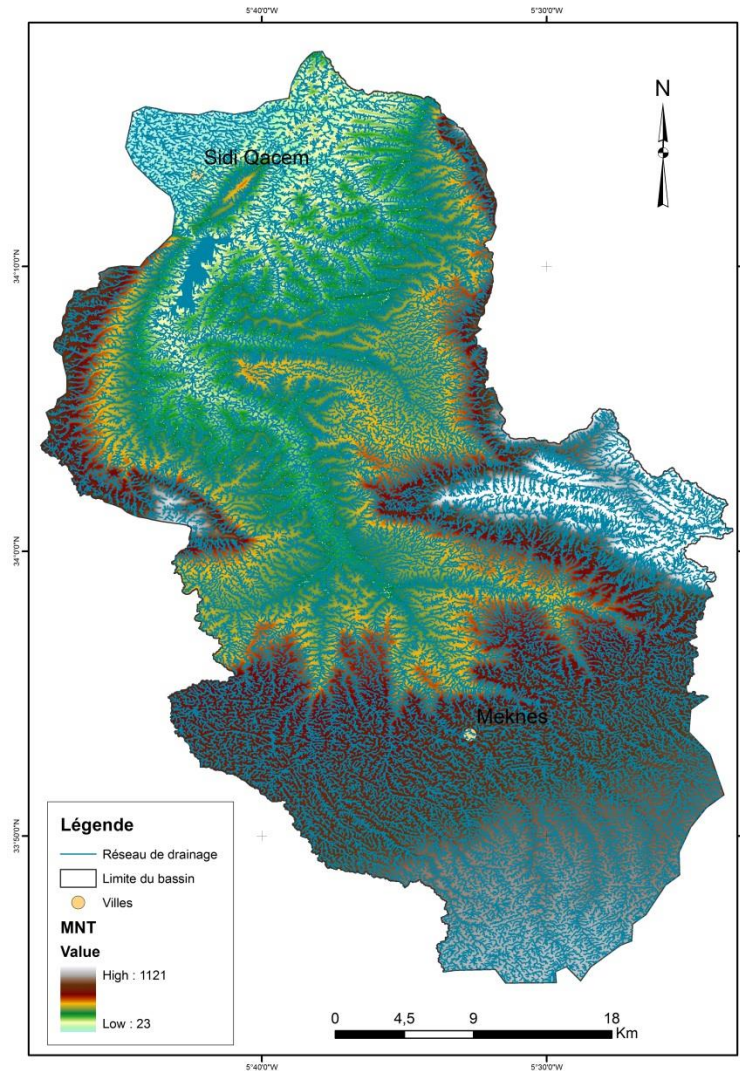


Figure 12: MNT avec le réseau hydrographique du bassin.

6-1- Densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est une mesure du potentiel de ruissellement et du degré de dissection du paysage. Il est défini quantitativement comme le total de toutes les longueurs de cours d'eau dans un bassin divisé par la surface du bassin. La densité de drainage est influencée par la géologie (perméabilité, érodabilité des matériaux de surface), le climat (précipitations et végétation), la pente et l'heure.

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Équation 7: Densité de drainage.

Avec :

Dd : densité de drainage (km/km²) ;

Li : longueur de cours d'eau (km) ;

A : surface du bassin versant (km²).

La densité de drainage de notre bassin est : $Dd = 0,74 \text{ km}^{-1}$, donc il est généralement constitué des formations relativement semi-perméables à imperméables.

6-2- Constante de stabilité

La constante de stabilité du cours d'eau c'est la valeur inverse de la densité de drainage selon Schumm, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau).

$$C = \frac{1}{Dd}$$

Équation 8: Constante de stabilité

La densité de drainage au niveau de notre bassin est égale à $1,33 \text{ km}^2/\text{km}$, donc pour garder la stabilité dans ce bassin chaque kilomètre d'un cours d'eau doit drainer un kilomètre carré de surface.

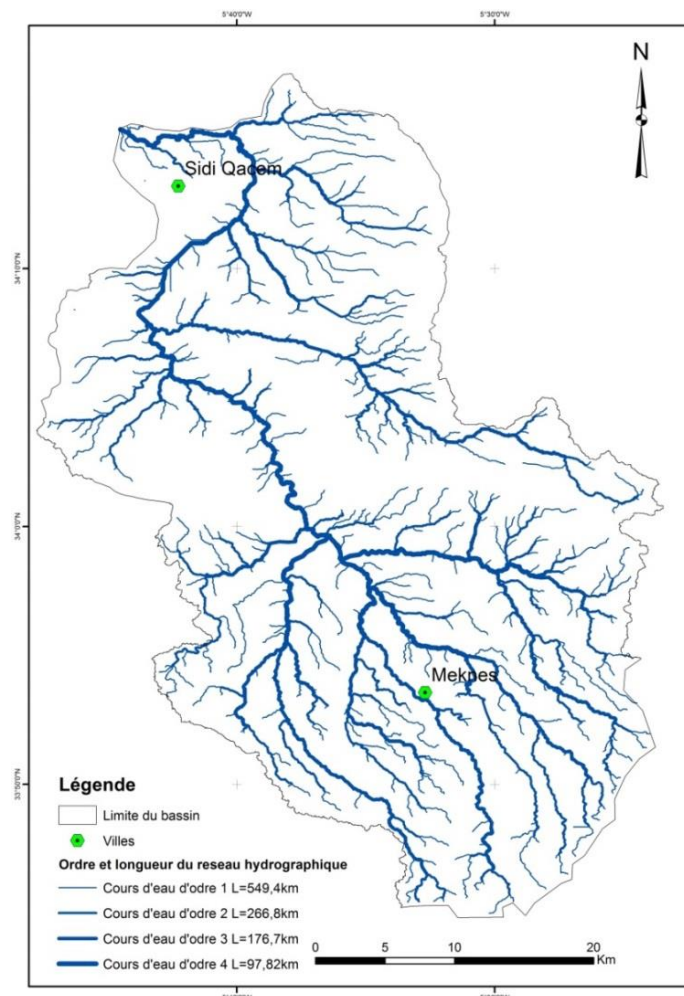


Figure 13: Carte de classification du RH selon le système de Strahler (1957).

6-3- Type de drainage dans les sous bassins

Le bassin versant Oued R'dom est composé de 46 sous bassins comme il est indiqué dans la figure 14, le drainage dans la totalité du bassin est de type dendritique, Il faut signaler que ce type de réseaux correspond soit à des sédiments uniformément résistants, horizontaux ou biseauté par une surface horizontale, soit à des roches cristallines. Il y a des sous bassin qui ont un drainage parallèle

comme le sous bassin 4 et 40 qui ont été situés dans des régions définies par un caractère tectoniquement actif, les réseaux de type parallèle se situent généralement à proximité de faisceaux de faille.

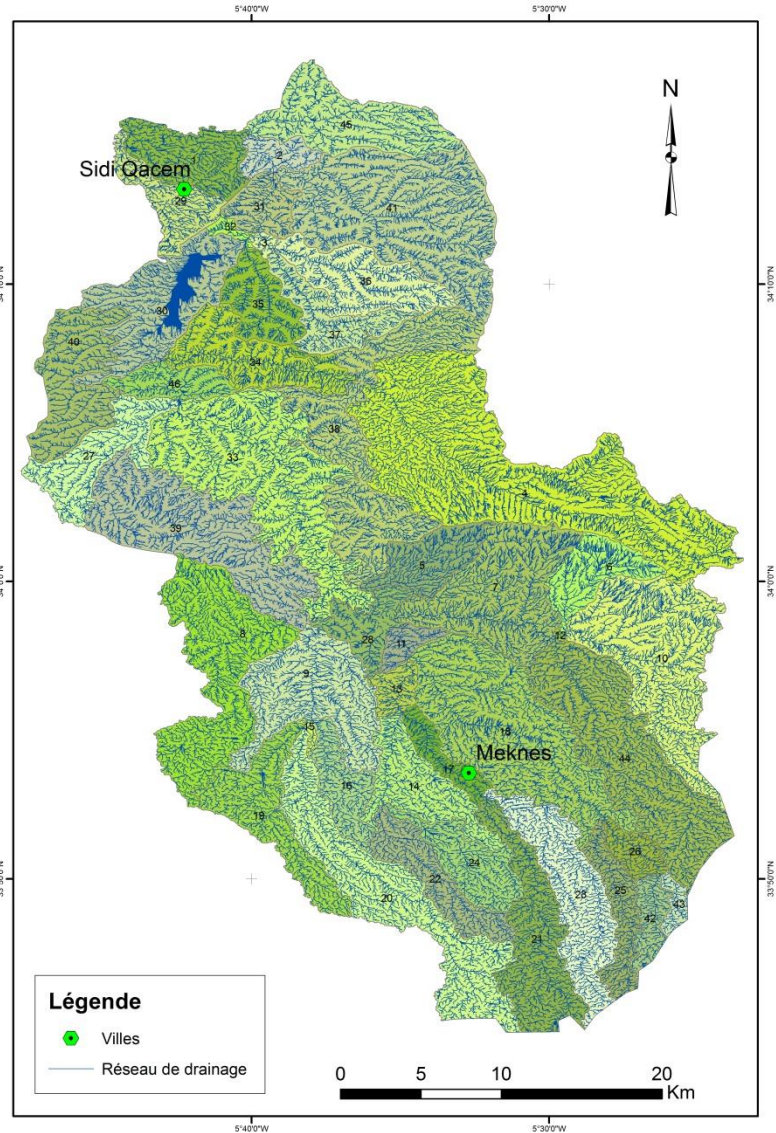


Figure 14: Les sous bassin avec le réseau de drainage.

Chapitre II : Estimation de l'érosion hydrique par l'équation Universelle Révisée de Perte en Sol (R.U.S.L.E) dans le bassin versant Oued R'dom

I- Introduction

L'équation universelle des pertes en sol (USLE) est un modèle à échelle réelle élaboré en 1960 et mis à jour en 1978 par Wischmeier et Smith du ministère de l'Agriculture des États-Unis. Ce modèle prévoit le taux moyen annuel d'érosion à long terme sur la pente d'un champ en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures.

La RUSLE utilise la même équation empirique que l'USLE. Cependant, de nouvelles méthodes sont introduites pour évaluer les valeurs des divers facteurs de l'USLE. Ces nouvelles méthodes tiennent compte des conditions climatiques, édaphiques et l'utilisation du sol du Maroc. Le modèle intègre l'ensemble des facteurs qui déterminent le phénomène d'érosion.

Dans ce chapitre on va détailler chaque facteur de l'équation universelle des pertes en sol pour bien comprendre ce modèle, on va calculer chaque facteur dans le bassin de Oued R'dom pour à la fin estimer le taux d'érosion dans ce bassin.

II- Equation Universelle Révisée de Perte en Sol (R.U.S.L.E)

L'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE), élaborée comme version améliorée provisoire de l'USLE, comme il est indiqué dans l'introduction la RUSLE utilise la même équation empirique que l'USLE. Ce modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs selon la formule :

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

Équation 9: L'équation universelle des pertes en sol révisée (RUSLE)

A : la perte en sol moyenne annuelle en (t/ha/an) ;

R : le facteur érosivité de la pluie ;

K : le facteur érodabilité du sol ;

LS : le facteur topographique ;

C : le paramètre du couvert végétal ;

P : le facteur des pratiques anti-érosives.

1- Facteur pluie ou indice d'érosivité R

Le facteur R est l'indice d'érosivité de l'eau de pluie et du ruissellement nécessaire pour prévoir l'érosion hydrique à l'aide de l'USLE. Les données sur la pluviosité sont utilisées de deux manières dans l'USLE, soit :

- ✓ pour mesurer la quantité annuelle totale de pluie érosive à un endroit donné ;
- ✓ pour évaluer la répartition de la pluie érosive sur l'année exprimée comme une partie du facteur R total par unité de temps.

Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion.

Selon la formule de Wischmeier & Smith, R se calcule à partir de l'énergie de la pluie E et de l'intensité maximale de la pluie pour une période de 30 minutes (I_{30}), alors le facteur d'érosivité R se calcul par la formule suivante :

$$R = E \times I_{30}$$

Équation 10: Equation pour calculer le facteur R.

Où :

E : l'énergie cinétique des pluies (MJ/ha) ;

I₃₀ : l'intensité maximale des pluies en 30 minutes exprimées en mm/heure.

L'énergie cinétique des pluies est donnée par la formule suivante :

$$E = 210 + 89 \log 10 \times I$$

Équation 11: Formule de l'énergie cinétique des pluies.

Où :

I : l'intensité de pluie.

Ces formules (Équation 10 et 11) proposées par Wischmeier et Smith (1978) comme indicateur d'érosivité restent difficilement applicables pour les régions où les données pluviométriques ne sont pas régulières. Pour les zones qui n'ont pas de données climatiques détaillées, R peut être estimé à l'aide d'un indice modifié de Fournier (F). Arnoldus (1977) a proposé une forme modifiée de l'indice de Fournier afin d'éviter les inconvénients liés à la répartition mensuelle des précipitations érosives au cours de l'année et a été utilisé pour établir des zones de risque d'érosion en Afrique du Nord et au Moyen-Orient par la FAO. (Li Hui et al, 2010).

$$F = \sum_{i=1}^{12} \frac{r_i^2}{P}$$

Équation 12: Indice modifié de Fournier.

Où r_i est la précipitation mensuelle et P est la précipitation annuelle.

Une relation entre R et F peut être déterminée par analyse de régression. Arnoldus (1977) a calculé l'équation comme suit :

$$R = 0,264 \times F^{1,5}$$

Équation 13: Relation entre R et F.

Cette équation a été utilisée pour développer une carte isoérodynamique pour le Maroc. L'association entre R et F varie considérablement selon les différentes zones climatiques.

Le facteur R a été calculé séparément pour chaque station à part, puis on a interpolé les résultats par la méthode d'interpolation IDW, pour avoir la carte du facteur d'érosivité du bassin versant Oued R'dom.

✓ Interprétation

La carte d'érosivité réalisé à partir des données climatiques des stations hydrologiques, montre que la valeur du facteur R varie de 221 à 409 (figure 15). Les valeurs élevées sont enregistrées au N-E du bassin, alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées à l'amont par une grande surface et une petite surface à l'aval.

La répartition géographique des différentes classes du facteur d'érosivité des pluies par rapport à la superficie totale du bassin est la suivante :

15 % de la superficie du bassin est soumise à une érosivité élevée de 361 à 409.

26 % de la surface du bassin versant est soumise à une faible érosivité de 221 à 259.

59 % de la surface du bassin versant est soumise à une érosivité de 259 à 361.

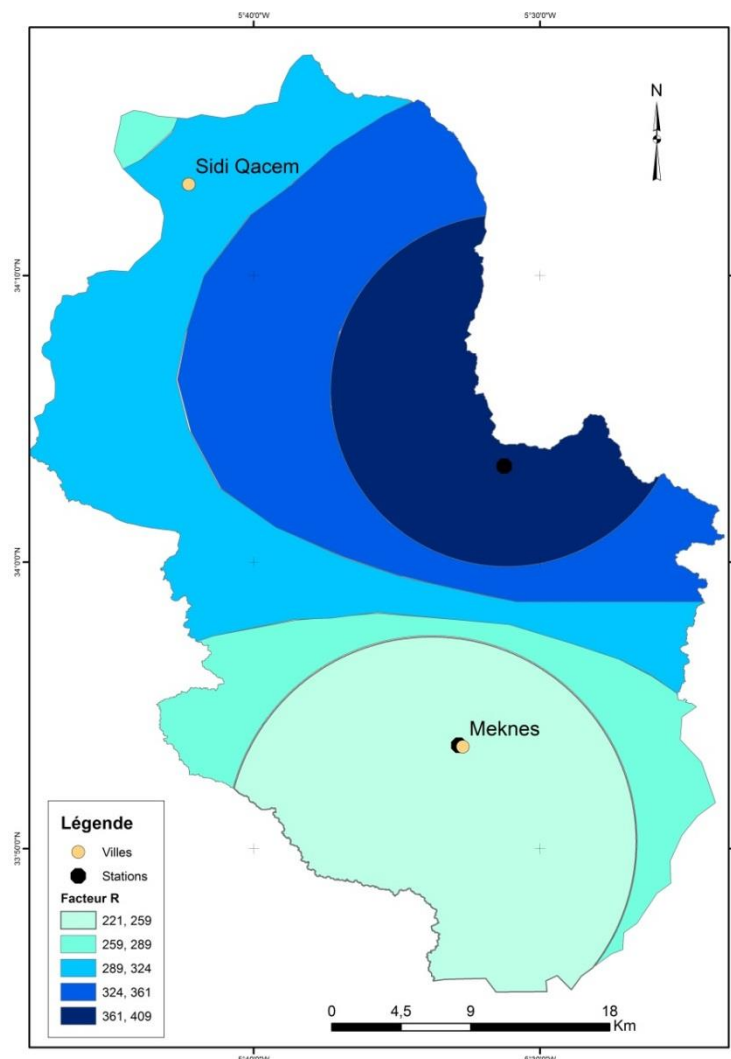


Figure 15: Carte d'érosivité des pluies du bassin Oued R'dom. (Facteur R)

2- Facteur érodabilité du sol K

K représente le facteur d'érodibilité du sol, Il s'agit de la perte en terre moyenne en tonnes/hectare pour un sol particulier. Le facteur K est une mesure de la vulnérabilité des particules de sol au détachement et au transport par la pluie et le ruissellement. La texture est le principal facteur qui influence le facteur K, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer. On a réalisé la carte d'érodibilité du sol de notre bassin (figure 16) par la digitalisation de la carte pédologique de Meknès 1/50 000, chaque type de sol à un facteur d'érodibilité précis.

✓ Interprétation

La répartition des différentes classes du facteur d'érodibilité du sol par rapport à la superficie totale du bassin est la suivante :

37 % de la surface du bassin à un facteur d'érodibilité inférieur à 0,2. Presque 20 % de la surface du bassin constitué des éléments qui ont un facteur d'érodibilité élevé de 0,4 à 0,46. Le reste donc 43 % de la surface du bassin ont un facteur d'érodibilité de 0,2 à 0,4.

Les vertisols présentent une faible érodibilité (0,10-0,20), alors que les sols peu évolués présentent une érodibilité élevée atteignant la valeur de 0,4. (Elbouqdaoui et al).

Vers l'amont, l'aval et un peu au centre le facteur d'érodibilité du sol est inférieur à 0,2 donc ces endroits sont surtout constitué des vertisols.

Au niveau des extrémités est et ouest du bassin l'érodibilité du sol est élevé (supérieur à 0,3) alors le sol est un peu évolués.

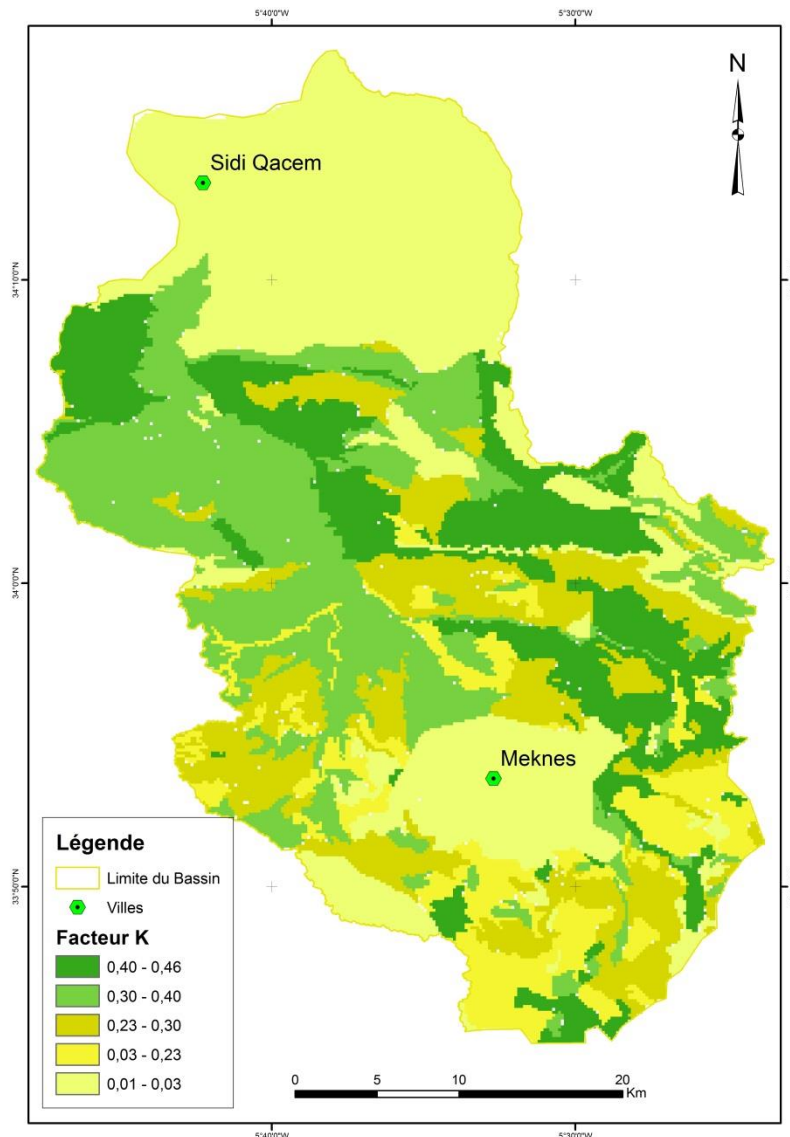


Figure 16: Carte d'érodibilité du sol du basin Oued R'dom. (Facteur K)

3- Facteur topographique LS

Le facteur pente et déclivité tient compte à la fois de la longueur de la pente L et de son inclinaison S. Dans la pratique, les deux facteurs de pente, L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Des formules, tables et abaques permettent de quantifier les valeurs du facteur topographique. L'équation que j'ai utilisé dans ce projet c'est la suivante :

$$LS = \left(\frac{L \cdot R}{22,13} \right)^n \times (0,065 + 0,045 \cdot S + 0,0064 \cdot S^2)$$

Équation 14: Facteur topographique LS

Où :

L : la longueur de la pente en (m) ;

R : la résolution ;
 S : l'inclinaison de la pente (%) ;
 n : à partir du tableau suivant :

Tableau 7: Valeurs de n.

Pente (%)	$\text{pente} < 1$	$1 \leq \text{pente} < 3$	$3 \leq \text{pente} < 5$	$\text{Pente} \geq 5$
n	0,2	0,3	0,4	0,5

✓ Interprétation

Le facteur LS montre l'importance de l'inclinaison et de la longueur de pente dans les processus de l'érosion en nappe et en rigole. La carte du facteur topographique LS est calculée par l'équation ci-dessus (équation 14) sur Arc Map (figure 17). La topographie relativement plane du bassin versant de Oued R'dom implique tout naturellement une répartition des valeurs de LS assez faibles entre 0 et 23,4. La carte montre que la majorité du bassin ont des valeurs du facteur LS faible, et presque 20 % du bassin ont des valeurs du facteur LS relativement élevé jusqu'à 23,4. Les valeurs élevées du facteur LS sont surtout placées vers les extrémités est et ouest du bassin.

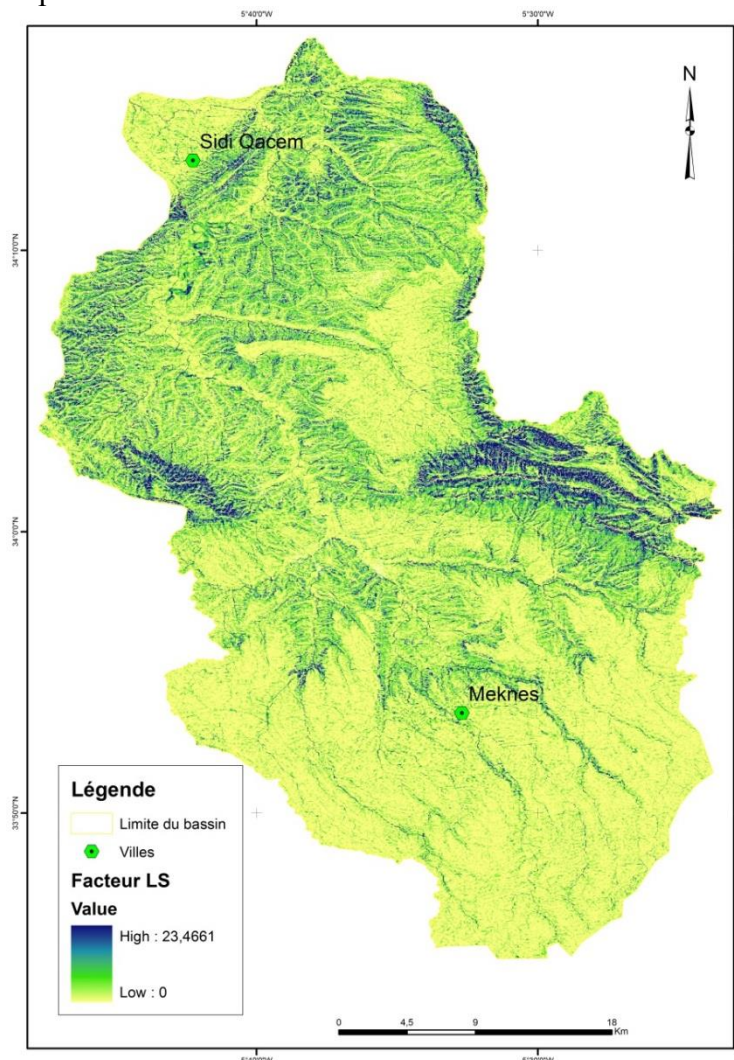


Figure 17: Carte du facteur topographique LS au niveau du bassin Oued R'dom. (Facteur LS)

4- Facteur de couverture végétale C

Le facteur de couverture végétale C est un des paramètres les plus importants dans l'USLE, il représente les effets de la végétation et d'autres couvertures terrestres. Le facteur C reflète l'effet des pratiques de culture et de gestion sur le taux d'érosion du sol. Les chercheurs ont développé de nombreuses méthodes pour estimer le facteur C en utilisant NDVI pour l'évaluation de la perte de sol. Ces méthodes utilisent un modèle de régression pour effectuer une analyse de corrélation entre les valeurs de facteur C mesurées en champ ou obtenues à partir de tableaux de guidage et de valeurs NDVI dérivées d'images à distance. Les valeurs inconnues des facteurs C des classes de couverture terrestre peuvent être estimées à l'aide de l'équation obtenue à partir d'une analyse de régression linéaire.

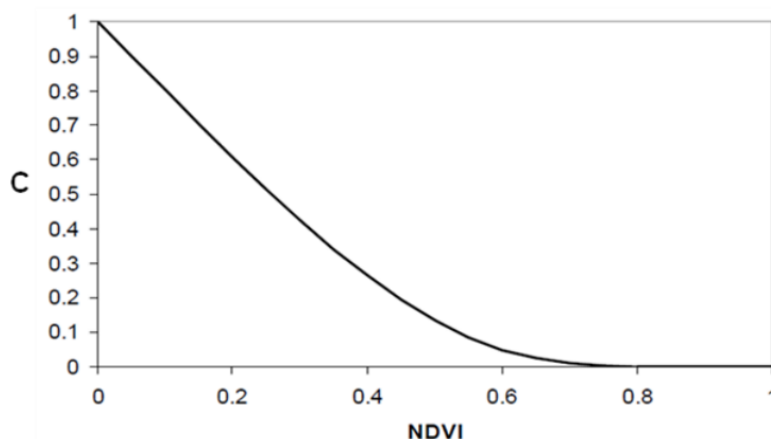


Figure 18: Relation entre NDVI et facteur C de RUSLE

La ligne obtenue après analyse est la ligne de régression qui décrit la relation entre les valeurs C et NDVI.

4-1- Indice de végétation par différence normalisé NDVI

L'indice de végétation par différence normalisé, appelé aussi NDVI est construit à partir des canaux Rouge (R) et Proche Infra Rouge (PIR). L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge.

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

Équation 15: Equation général du NDVI

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation.

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

Pour notre projet on a utilisé des images de Sentinel-2 prise le 30 décembre 2016 à 11 heures du matin. Indice de végétation par différence normalisé NDVI c'est une étape de traitement de Sentinel-2 entre dans la partie de classification des scènes. Cette étape a pour but d'éliminer les pixels de végétation hautement réfléchis en utilisant des tests de filtrage basés sur NDVI.

La bande visible du rouge dans l'image de Sentinel-2 c'est la bande 4, et la bande du proche infrarouge c'est la bande 8. Donc l'équation du NDVI dans le Sentinel-2 est la suivante :

$$NDVI \text{ "Sentinel - 2"} = \frac{(Bande 8 - Bande 4)}{(Bande 8 + Bande 4)}$$

Équation 16: Equation du NDVI par Sentinel-2

- ✓ Les pixels avec NDVI supérieur à la valeur de seuil NDVI T2 sont considérés comme des pixels «sans nuage» (probabilité de nuage égale à 1,0) et classés en pixels de «végétation» dans la carte de classification ;
- ✓ Les pixels avec une valeur NDVI inférieure à la valeur de seuil NDVI T1 ont une confiance en nuage qui reste inchangée ;
- ✓ Les pixels qui ont une valeur NDVI entre les seuils NDVI T1 et NDVI T2 sont considérés comme potentiellement nuageux (la probabilité du nuage est calculée linéairement de 0,0 à 1,0 et multipliée par la probabilité de nuage antérieur).

Les valeurs du NDVI varient entre -1,0 et 1,0, où des valeurs plus élevées sont pour la végétation verte et de faibles valeurs pour d'autres matériaux de surface communs.

Le sol nu est représenté avec des valeurs NDVI les plus proches de 0, pour valeurs négatives ils représentent tous qui sont hydrologique.

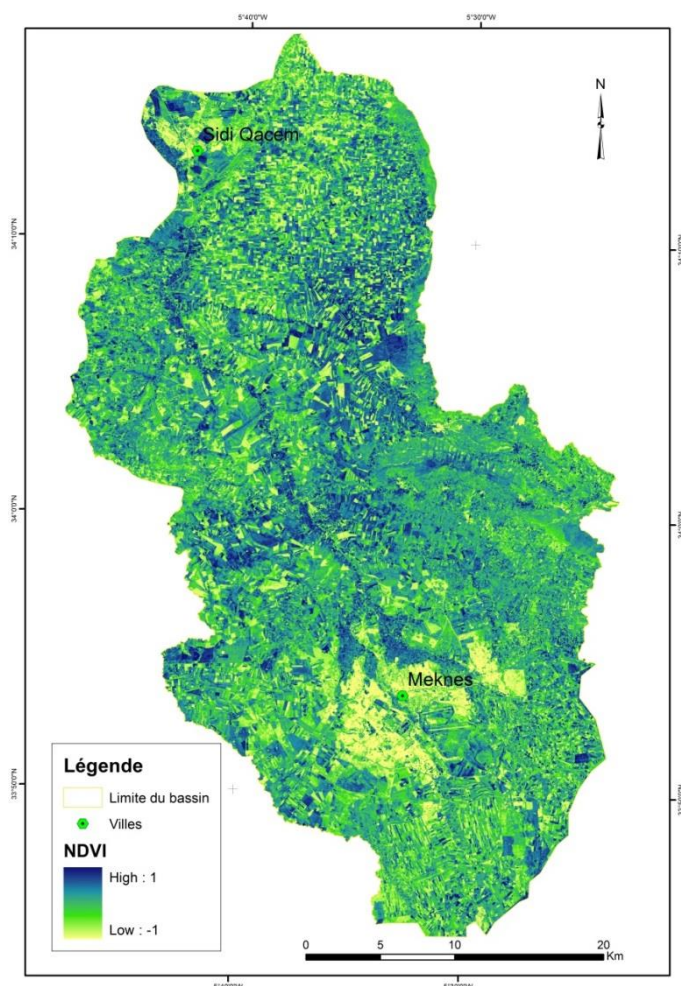


Figure 19: Carte du NDVI du bassin versant Oued R'dom.

4-3- Facteur C

A partir de la courbe de relation entre NDVI et facteur C, l'équation de régression a été trouvée comme suit :

$$\text{Facteur } C = 1.02 - 1.21 \times \text{NDVI}$$

Équation 17: Facteur C

✓ Interprétation

À l'aide de la carte NDVI, la carte des facteurs C de la zone a été préparée dans le logiciel ArcGIS 9.3. La répartition spatiale du facteur C de gestion de la couverture végétale dans la zone d'étude est illustrée dans la figure 20. La valeur du facteur C de la zone d'étude se situe entre 0,5 et 1,5. Sur cette carte, les valeurs les plus élevées du facteur C indiquent que la zone possède une bonne couverture végétale et pour les valeurs inférieures indiquent des terres arides. La carte obtenue montre que la totalité de la superficie du bassin présente un taux de couverture végétale très faible et juste des petites zones, vers le nord et l'est surtout, qui ont une bonne couverture végétale avec $C > 0,3$.

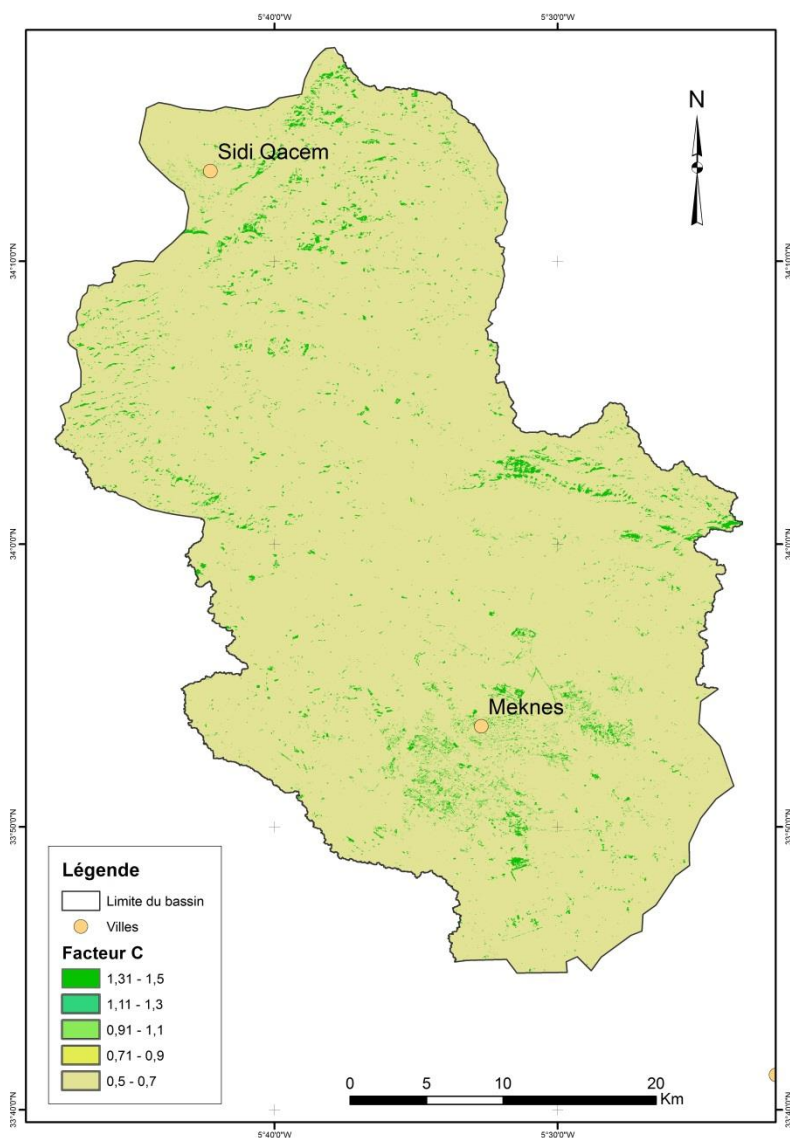


Figure 20: Carte du facteur de couverture végétale du bassin Oued R'dom. (Facteur C)

5- Facteur anti-érosives P

Les pratiques anti-érosives concernent toutes les techniques culturales mises en œuvre pour diminuer le ruissellement et l'érosion. Parmi ces techniques, on trouve la culture en courbe de niveau (COUNTOURING), la pose de bandes enherbées entre deux zones de culture, le paillage naturel ou artificiel, ou la pose de plantes de couverture.

Le facteur P permet de prendre en compte les aménagements antiérosifs tels que la mise en place de terrasses, l'alternance de cultures selon les courbes de niveau, Pour utiliser ces informations il faudrait réaliser une enquête auprès de chaque agriculteur et pour chaque année. La collecte de ces données nécessite beaucoup de temps. On attribuera, par défaut, une valeur de 1 à P : aucun aménagement antiérosif n'est réalisé.

III- Evaluation des pertes en sol

La réalisation des cartes des principaux facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols a permis d'obtenir la carte des pertes en sols en tout point du bassin versant Oued R'dom par la superposition des cinq facteurs de RUSLE sous SIG (figure 21).



Figure 21: Organigramme méthodologique du modèle RUSLE appliqué.

La carte obtenue (figure 22) montre des taux d'érosion variant entre 0 et plus de 11,19 t/ha/an répartis sur l'ensemble de l'aire d'étude, avec une moyenne de l'ordre de 5,51 t/ha/an. La quantité totale d'érosion dans un bassin c'est la moyenne d'érosion multiplié par la surface du bassin, dans notre cas la quantité totale d'érosion dans le bassin Oued R'dom c'est 733464 t/ha/an.

Selon Wall et al, une érosion faible varie entre 0 et 10 t/ha/an, une érosion modérée entre 10 et 20 t/ha/an, alors qu'au-delà de 20, l'érosion est forte (20 à 30 t/ha/an) à très forte (>30 t/ha/an). Selon cette classification presque 78 % de la totalité du bassin subis à une érosion faible et juste 22 % de la totalité du bassin exposé à une érosion modérée.

L'érosion est faible en amont et en aval du bassin, alors que le centre et surtout les extrémités est et ouest du bassin ont des taux de pertes en sols plus élevé (érosion modérée). Ceci est expliqué essentiellement par :

- ✓ La présence des fracturations dans les limites du bassin comme il est indiqué dans le premier chapitre ;
- ✓ Au niveau de l'amont et l'aval du bassin, la dominance des vertisols, présentant une faible érodibilité (0,10-0,20), contribue à réduire les pertes en sols ;

- ✓ Vers le centre et les extrémités du bassin la dominance des sols peu évolués manifestant une érodibilité élevée atteignant 0,4, l'érosivité des pluies et aussi élevée dans cette région, ces deux facteurs participent à augmenter les pertes en sols ;
- ✓ La forte pente au niveau des limites est et ouest du bassin versant conduit à des pertes importantes, malgré la présence d'une bonne couverture végétale surtout vers l'est.

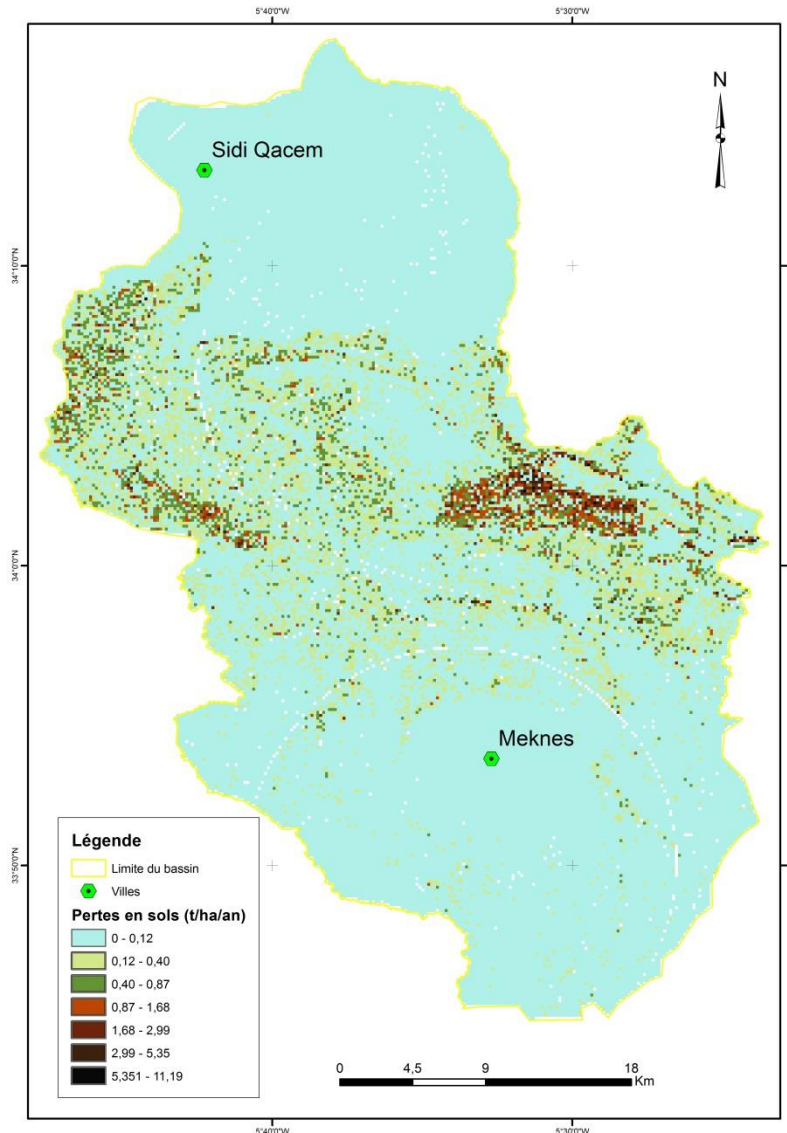


Figure 22: Carte des pertes en sols du bassin versant Oued R'dom.

Conclusion

L'Equation Universelle des Pertes en Sol Révisée (RUSLE) utilisée dans un Système d'Information Géographique pour but de quantifié les pertes en sol au niveau du bassin versant Oued R'dom a donné des résultats fiable qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs pour simuler des scénarios d'évolution et par suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion.

L'étude réalisé montre que les sols du bassin versant Oued R'dom, surtout les sols des extrémités, sont sous l'effet de plusieurs facteurs favorisant le phénomène d'érosion à savoir l'importance des pentes (entre 0 et 23), l'érosivité élevé des pluies (entre 221 et 409) et l'érodibilité des sols (entre 0,01, et 0,46). Elle indique également que le bassin versant Oued R'dom est soumis à une érosion modérée avec des pertes variant de 5 à 11,19 t/ha/an, touchent 22 % du territoire. Les faibles pertes en dessous du seuil de tolérance (< 5 t/ha/an) touchent 78 % de la superficie du bassin versant.

Le présent travail a délimité les zones à risque d'érosion hydrique à moyenne échelle et les facteurs déterminants de la dégradation des terres dans le bassin versant Oued R'dom. Pour affiner les résultats et délimiter les zones les plus exposées aux risques d'érosion il faut choisir un sous bassin et l'analyser en détail à grande échelle, ce dernier va constituer une zone de référence représentative de l'ensemble du bassin versant. Après l'étude à grande échelle on peut donner des stratégies de lutte contre l'érosion hydrique. Toutes ces études sont a pour but de protéger le milieu naturel, éviter la pollution de l'eau et de limiter les flux de migration de la population.

Bibliographie

- ✓ **Amal Markhi, PhD, Nour-Eddine Laftouhi, Dr. Abderrahmane Soulaïmani, Dr. Fatima Fniguire, PhD** : Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. application dans le bassin versant N'fis dans le haut atlas de Marrakech (MAROC), p 340-356, 2015.
- ✓ **Célérier Jean, Charton Albert** : La région de l'oued Rdom (Maroc occidental) [De Petitjean à Moulay Idris et à Meknès]. In: Annales de Géographie, t. 32, n°177, 1923. pp. 240-252;
- ✓ **Dresch Jean** : La région Prérifaine [Essai morphologique]. In: Annales de Géographie, t. 39, n°220, 1930. pp. 395-415; doi : 10.3406/geo.1930.10147.
- ✓ **El Ouadini M., Aït Brahim L., Moukhchane M., Benjbara A., Nachit D.** : Erosion et transport en suspension dans le bassin versant de l'oued Martil (rif septentrional, Maroc). Bull. Réseau Erosion, IRD Montpellier, France, 20 (2000) 78-86.
- ✓ **H. Bamoumen, El M. Aarab, A. Soulaïmani** : Evolution tectono-sédimentaire et magmatique des bassins viséen supérieur d'Azrou-Khénifra et des Jebilet orientales (Meseta marocaine).
- ✓ **J.M. van der Knijff, R.J.A. Jones, L. Montanarella** : Estimation du risque d' érosion en Italie, p 46, 2000.
- ✓ **Li Hui, Chen Xiaoling, Kyoung Jae Lim, Cai Xiaobin and Myung Sagong** : Assessment of Soil Erosion and Sediment Yield in Liao Watershed, Jiangxi Province, China, Using USLE, GIS, and RS, p. 941–95, 2010.
- ✓ **L. Khali Issa, K. Ben Hamman Lech-Hab, A. Raissouni, A. El Arrim** : Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental), p 2778-2795, 2016.
- ✓ **Mohamed Yjjou, Rachid Bouabid, Abdellah El Hmaïdi, Ali Essahlaoui, Mourad El Abassi** : Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia, p 83-91, 2014.
- ✓ **R.J. Patil, and S. K. Sharma** : Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakker river watershed, p 5, 2013
- ✓ **R.P. Stone et D. Hilborn** : Équation Universelle des Pertes en Terre (USLE).
- ✓ **Rupesh Patil and Shailesh Kumar Sharma** : Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakkar river watershed, p 5, 2013.

- ✓ **W.H. Wischmeier and D.D. Smith** : Predicting rainfall erosion losses - a guide for conservation planning Science, U.S. Dept. of Agriculture. Agric. Handbook, Washington, D.C., 1978, 537p.
- ✓ **Yassin.M., S. El Bahi, K Renard et M. El Wartiti** : Application du model de perte en terre révisé 'RUSLE' aux terrains forestiers du plateau central du MAROC, 205p.
- ✓ **Zian Ahmed**: Hydrologie, qualité des eaux de surface et des sédiments et géochimie des eaux thermales du bassin versant de R'dom, région des rides sud rifaines. Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences et Techniques FES, 276p, 2010/2011.

Webliographie

<http://www2.ac-toulouse.fr/mesoe/sommaire/projet/present/projet2/gharb2.htm>

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>

<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/1C.htm>

<http://resources.arcgis.com/en/communities/hydro/01vn0000000s000000.htm>

<http://www.sigterritoires.fr/index.php/qgis-2-8-wien-calcul-des-courbes-hypsometriques/>

<https://www.esrifrance.fr/sig2006/bentekhici.html>

https://www.researchgate.net/publication/287808630_Remote_Sensing_and_GIS_based_modeling_of_cropcover_management_factor_C_of_USLE_in_Shakkar_river_watershed

http://www.memoireonline.com/12/12/6540/m_Etude-du-calage-de-la-validation-et-des-performances-des-reseaux-de-neurones-formels--partir-des12.html

ANNEXES

Outils et données :

1- Outils

Aperçu sur logiciel ArcGis

ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute).

ArcMap représente l'application centrale dans ArcGIS Desktop. Il s'agit de l'application SIG utilisée pour toutes les tâches associées aux cartes, y compris la cartographie, l'analyse des cartes et la mise à jour.

ArcCatalog L'application ArcCatalog facilite l'organisation et la gestion de toutes les données SIG. Elle comprend des outils de navigation et de recherche des informations géographiques, d'enregistrement et de visualisation des métadonnées, de visualisation rapide de tout jeu de données et des outils de définition de la structure des couches de données géographiques.

ArcToolbox ArcToolbox est une application simple contenant de nombreux outils SIG utilisés dans le géotraitement. Il y a deux versions d'ArcToolbox. L'ArcToolbox intégral qui accompagne ArcInfo et une version plus légère qui accompagne les applications ArcView et ArcEditor.

ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox sont conçus afin de fonctionner ensemble pour effectuer les tâches SIG. Par exemple, vous pouvez effectuer une recherche d'un document ArcMap dans ArcCatalog puis l'ouvrir dans ArcMap en double-cliquant sur Catalogue. Vous pouvez ensuite modifier et enrichir vos données à l'aide des outils disponibles dans l'environnement de mise à jour d'ArcMap.

Arc Hydro est un ensemble de modèles de données et d'outils qui fonctionnent dans ArcGIS pour prendre en charge les analyses de données géospatiales et temporelles.

On utilise Arc Hydro pour délimiter et caractériser les bassins hydrographiques en format raster et vectoriel, définir et analyser des réseaux géométriques, gérer des données temporelles et configurer et exporter des données vers des modèles numériques.

Arc Hydro est un système basé sur ArcGIS conçu pour supporter les applications des ressources en eau. Il se compose de deux composants clés :

- ✓ Arc Hydro Data Model ;
- ✓ Arc Hydro Tools.

Ces deux composants, ainsi que le cadre de programmation générique, fournissent une conception de base de données et un ensemble d'outils qui facilitent les analyses souvent effectuées dans l'arène des ressources en eau. Arc Hydro est destiné à fournir les fonctionnalités initiales qui peuvent ensuite être développées en y ajoutant des structures de base de données et des fonctions requises par une tâche ou une application spécifique.

Les outils Arc Hydro fonctionnent dans l'environnement ArcGIS. Certaines fonctions nécessitent l'extension Spatial Analyst. La plupart des outils sont accessibles via la barre d'outils Arc Hydro Tools, où ils sont regroupés par fonctionnalité dans six menus et neuf outils. Des outils supplémentaires ont été développés dans l'environnement de géotraitement et sont disponibles dans la boîte à outils Arc Hydro Tools qui peut être utilisée à la fois dans ArcMap et ArcCatalog.

Les outils Arc Hydro ont deux objectifs principaux. Le premier objectif est de manipuler (attribuer) les attributs clés dans le modèle de données Arc Hydro. Ces attributs servent de base à d'autres analyses. Ils incluent les identificateurs de clé (tels que HydroID, DrainID, NextDownID, etc.) et les attributs de mesure (tels que LengthDown). Le deuxième but pour les outils est de fournir certaines fonctionnalités essentielles souvent utilisées dans les applications des ressources en eau. Cela inclut la délimitation des bassins versants basée sur DEM, la génération de réseau et le traçage basé sur les attributs.

2- Les données d'entrés

Dans ce projet on a utilisé les données suivant :

- ✓ Modèle Numérique de Terrain (MNT) ;
- ✓ Cartes Topographiques ;
- ✓ Cartes Géologiques ;
- ✓ Cartes Pédologiques ;
- ✓ Images satellitaire de Sentinel-2 ;
- ✓ Données climatiques (précipitations et températures).

Pluies et température moyenne annuelles (ABHS)

Précipitations moyennes annuelles (mm) des stations My Idriss et Meknès 1968/2003 :

Année	My Idriss	Meknès
1968	721	621,4
1969	878	667,1
1970	564	527,3
1971	764	718,8
1972	583	552,9
1973	585	540,2
1974	487	515,3
1975	641	696,8
1976	459	1018,8
1977	434	764,9
1978	700	534,7
1979	938	652,4
1980	540	539,2
1981	393	374
1982	746	618
1983	353	469,4
1984	488	413,4
1985	519	478,5
1986	706	496,3
1987	669	553,3
1988	520	445,6
1989	730	679,4
1990	651	498
1991	565	443,7
1992	482	431,2
1993	564	401,8
1994	437	370,3
1995	529	368,4
1996	1143	924
1997	813	566,9
1998	442	380,3
1999	422	417,8
2000	422	1147,4
2001	320	269,3

2002	687	503,6
2003	799	616,8

Température annuelle °C station My Idriss 1961/2009 :

Année	My. Idriss
1961	18,1
1962	18,1
1963	17,6
1964	18,2
1965	17,4
1966	17,8
1967	17,4
1968	17,6
1969	17,0
1970	17,8
1971	16,3
1972	16,1
1973	17,3
1974	17,2
1975	17,0
1976	16,8
1977	17,3
1978	17,8
1979	17,6
1980	17,9
1981	17,6
1982	16,7
1983	17,6
1984	16,8
1985	18,0
1986	17,3
1987	18,1
1988	17,8
1989	18,3
1990	18,0
1991	17,1
1992	17,2
1993	16,7
1994	18,2
1995	18,8
1996	18,0
1997	19,7
1998	19,0
1999	18,8
2000	18,9
2001	18,9
2002	18,5
2003	17,4
2004	16,9

2005	17,3
2006	17,0
2007	16,9
2008	16,3
2009	17,0
Moyenne	18