

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT en sciences**

Structure de Recherche : Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels

Discipline : Science de la Terre

Spécialité : Géomatique, Géomorphologie, Risques Naturels et Environnement

Présentée et soutenue le 03 juin 2022 par :

Najia FARTAS

**Approche multisources et multimodèles pour l'évolution de l'érosion hydrique
dans le Prérif, Maroc**

JURY

| | | | |
|-------------------|------|--|------------------------|
| Jamal AL KARKOURI | PES, | Université Ibn Tofail, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Kénitra | Président |
| Karima SEBARI | PES, | Université Hassan-II, Institut Agronomique et Vétérinaire, Rabat | Examinatrice |
| Ahmed AKHSSAS | PES, | Université Mohamed V, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat | Rapporteur/Examinateur |
| Abdelaziz ADIDI | PES, | Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme, Rabat | Rapporteur/Examinateur |
| Ahmed EL ABOUDI | PES, | Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat | Rapporteur/Examinateur |
| Mohamed MASTERE | PH, | Université Mohamed V, Institut Scientifique, Rabat | Co-directeur de Thèse |
| Bouchta EL FELLAH | PES, | Université Mohamed V, Institut Scientifique, Rabat | Directeur de Thèse |

Dédicace

A TOUTE MA FAMILLE

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

A mon cher mari EL MANSOURY Aziz

Tu as toujours offert soutien et réconfort, j'exprime envers toi un profond respect, reconnaissance et attachement inconditionnels. Depuis que je t'ai connu, tu m'as cessé de me soutenir et de m'épauler. Tu me voulais toujours la meilleure. Ton amour ne m'a procuré que confiance et stabilité. TU as partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie, aux moments les plus difficiles de ma vie, tu étais toujours à mes cotés, je te remercie de ne m'avoir jamais déçu. Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect.

A MA chère fille Hiba

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon attachement à toi.

A mes amis Saida HANCHI, Khadija AOUNA, Naima SOUKHEIR, Mohammed

ELBRAHIMI... Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Remerciements

Cette thèse de doctorat s'inscrit dans le contexte de l'étude des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa au Nord du Maroc réalisée au sein du Laboratoire de Géophysique et risques naturels. Elle a été réalisée en partie dans le cadre du projet PPR 2/2016/63 à l'Institut scientifique de Rabat. Cette thèse est pour moi une formidable expérience très enrichissante tant sur le plan scientifique qu'humain. C'est l'aboutissement de plusieurs années de travail auquel ont fait part des scientifiques de plusieurs disciplines. À ce titre, la reconnaissance et la gratitude sont de mise. À l'issue de ces années de recherche, c'est avec un grand plaisir que je fais la synthèse de mes investigations. Mais avant tout je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Je tiens d'abord à remercier Messieurs le Président de l'Université Mohamed V, le Doyen de la Faculté des Sciences Rabat, et le Directeur de l'Institut Scientifique, pour l'attention et le soutien qu'ils accordent à la recherche scientifique.

Je tiens également à remercier au premier lieu et tout particulièrement mes directeurs de thèse Monsieur :

Monsieur **Bouchta EL FELLAH**, Professeur de l'enseignement supérieur pour m'avoir fait confiance en acceptant d'être le promoteur de cette thèse et pour m'avoir admis dans son laboratoire de recherche. J'ai pu apprécier la justesse de ses conseils qui ont orienté mes travaux, ainsi que sa disponibilité dont aucun qualificatif ne saurait décrire l'étendue. Il a consacré de nombreuses heures à l'interprétation et à l'analyse critique des résultats obtenus, ce qui m'a beaucoup aidé à leur faire prendre corps dans la rédaction de divers articles.

Monsieur **Mohamed MASTERE**, Professeur habilité, fait partie des initiateurs de ce projet de thèse et a été le promoteur de cette étude. J'ai pu profiter de ses avis et de ses critiques toujours constructives. Il, n'hésita jamais à m'aider à résoudre les divers problèmes auxquels on est confronté toute au long de mes travaux. Je lui en suis très reconnaissante.

Je remercie également les membres du Jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir évaluer ce travail de recherche :

Monsieur **Jamal AL KARKOURI**, Doyen de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines Kénitra, Université Ibn Tofail, a accepté d'être le Président du jury de ma soutenance de thèse, je lui adresse mes vifs remerciements.

J'adresse mes considérations sincères à Monsieur **Ahmed AKHSSAS**, Professeur de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et d'avoir bien voulu m'honorer par sa présence au jury.

Je tiens à remercier vivement, Monsieur **Abdelaziz ADIDI**, Professeur à l'Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme Rabat, qui a bien voulu juger ce travail. Ses remarques pertinentes et ses commentaires vont assurément d'améliorer la qualité de cette thèse.

J'adresse mes considérations sincères à Monsieur **Ahmed EL ABOUDI**, Professeur à la Faculté des Sciences Rabat. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et d'avoir bien voulu m'honorer de sa présence au jury.

Je tiens aussi grandement à remercier Madame **Karima SEBARI**, Professeur à l'Institut Agronomique et vétérinaire, Hassan-II de Rabat, pour avoir bien voulu faire partie de cette commission malgré ses préoccupations.

Je tiens aussi grandement à remercier pour leur sympathie Monsieur **Brahim BENZOUAGH**, Professeur à l'Institut Scientifique de Rabat pour ses remarques enrichissantes, le plein intérêt avec lequel il a suivi les résultats de cette étude.

Résumé

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa se localise dans une zone de transition entre le Prérif, le Sillon sud-rifain. Ce bassin couvre une superficie de 60 km² et un périmètre de 59 km. Cette situation est contrôlée par plusieurs paramètres naturels et anthropiques : la prédominance de formations tendres essentiellement marneuses, le contraste climatique caractérisé par des irrégularités nettes de précipitations. Ce bassin est caractérisé par un couvert végétal très réduit et un réseau hydrographique dense et ramifié et des pentes fortes ce qui augmente le degré et l'impact de l'érosion. La zone d'étude constitue un milieu très sensible et vulnérable aux différents risques naturels notamment l'érosion hydrique.

Le présent travail consiste à une étude multidisciplinaire qui a pour objectifs : la détermination du degré de priorisation des zones à risque par l'analyse morphométrique, la cartographie qualitative d'érosion hydrique par la méthode PAP/CAR, la caractérisation physico-chimique des sols et l'estimation de la stabilité structurale, et l'estimation quantitative de l'érosion hydrique par l'approche RUSLE au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa. Le principal objectif est l'élaboration des cartes thématiques des zones à risque et de constituer un document décisif pour aider les différents intervenant dans le domaine de la gestion des territoires en vue de mettre en œuvre une stratégie et un plan d'action de prévention et de prévision des risques érosifs étudiés dans ce bassin.

Les résultats obtenus permettent d'identifier et de localiser les zones exposées aux risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. Ces résultats montrent que l'intensité de l'érosion hydrique varie essentiellement en fonction de la nature des terrains, des pentes et de l'occupation des sols. En conséquence, cette étude nous a permis de spatialiser un modèle ponctuel d'évaluation des risques d'érosion hydrique et de localiser des zones prioritaires pour d'éventuelles interventions d'aménagement.

Mots-clés : Prérif, PAP/CAR, érosion hydrique, bassin versant Oued Joumouaa, cartographie, analyse morphométrique, RUSLE.

Abstract

The Oued Joumouaa watershed is located in a transition zone between the Prérif and the Sillon sud-rifain. This basin covers an area of 60 km² and a perimeter of 59 km. This situation is controlled by several natural and anthropic parameters: the predominance of soft formations essentially marly, the climatic contrast characterized by clear irregularities of precipitation. This basin is characterized by a very reduced vegetation cover and a dense and branched hydrographic network and steep slopes which increases the degree and impact of erosion. The study area is a very sensitive and vulnerable to various natural hazards including water erosion.

The present work consists of a multidisciplinary study which aims to: determine the degree of prioritization of risk areas by morphometric analysis, qualitative mapping of water erosion by the PAP / CAR method, physicochemical characterization of soils and estimation of structural stability, and quantitative estimation of water erosion by the RUSLE approach at the level of the catchment area of Oued Joumouaa. The main objective is the elaboration of thematic maps of the risk areas and to constitute a decisive document to help the various intervening parties in the field of the management of the territories in order to implement a strategy and an action plan of prevention and forecasting of the studied erosive risks in this basin.

The results obtained allow identifying and locating the areas exposed to the risks of water erosion in the Oued Joumouaa watershed. These results show that the intensity of water erosion varies essentially according to the nature of the land, slopes and land use. Consequently, this study allowed us to spatialize a point model for the evaluation of water erosion risks and to locate priority areas for possible development interventions.

Keywords: Prérif, PAP/CAR, water erosion, Oued Joumouaa watershed, mapping, morphometric analysis, RUSLE.

Sommaire

| | |
|--|-------------|
| Dédicace | ii |
| Remerciements | iii |
| Résumé | v |
| Abstract | vi |
| Liste des Figures | xiii |
| Liste des Tableaux | xvii |
| Liste des Acronymes | xx |
| Introduction | 2 |
| A-Problématique et objectifs | 2 |
| B-Méthodologie | 3 |
| C- Plan de la thèse | 4 |
| Chapitre I : Contexte géographique et géologique du bassin versant de l’Oued Joumouaa | 6 |
| I-Introduction | 6 |
| II-Situation géographique de la zone d’étude. | 6 |
| III-Géologie du bassin versant de l’Oued Joumouaa | 7 |
| 1-Le Rif | 8 |
| 2-Le domaine interne | 10 |
| 3-le domaine des flyschs | 12 |
| 4-Le domaine externe | 12 |
| 4-1-L’intrarif : | 12 |
| 4-2-Le Mésorif | 13 |
| 4-3-Le Prérif | 13 |
| 4-4-l’avant pays (les unités décollées et glissées) | 15 |
| 5- Le Moyen-Atlas | 15 |

| | |
|--|-----------|
| Chapitre II : Analyse Géomorphologique, Hydro-Climatique du Bassin Versant de l'Oued Joumouaa | 18 |
| I-Introduction | 18 |
| II-Les zones de transitions en bordures du bassin versant de l'Oued Joumouaa | 18 |
| 1- Contact entre le Rif et le Prérif | 18 |
| 2-Contact entre le Prérif et le Moyen-Atlas..... | 19 |
| III- Le bassin versant de l'Oued Joumouaa, un pays de basses collines..... | 20 |
| IV- Contexte hydro-climatique du bassin versant | 21 |
| 1-Etude des précipitations..... | 23 |
| Conclusion..... | 25 |
| Chapitre III : Essai de quantification de l'érosion hydrique | 27 |
| Introduction..... | 27 |
| I- Les indicateurs du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant . | 29 |
| II- Le seuil tolérable du risque de l'érosion hydrique | 30 |
| III- Processus de l'érosion hydrique | 30 |
| 1-Détachement des particules | 31 |
| 2- Détachement par ruissellement | 32 |
| 3-Transport des particules | 32 |
| 4-Dépôt des particules..... | 33 |
| IV- Facteur d'érosion hydrique dans le bassin versant Oued Joumouaa..... | 33 |
| 1-Facteurs naturels | 34 |
| 1-1 Facteur climatique..... | 34 |
| 1-2 La topographie collinaire favorise l'écoulement..... | 35 |
| 1-3 Formations de marnes imperméables | 35 |
| 1-4 Facteur pédologique..... | 36 |
| 1-5 L'occupation du sol se résume dans un espace cultivé..... | 36 |
| 1-6 Le couvert végétal est menacé et dégradé | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 1-7 Facteurs anthropiques..... | 37 |
| V- Formes d'érosions hydriques..... | 38 |
| 1- Érosion en nappe ou érosion diffuse | 38 |
| 2- Érosion linéaire | 38 |
| 3- Érosion en rigole | 39 |
| 4- Érosion par ravinement | 40 |
| 5- Érosion en masse..... | 41 |
| 5-1- Glissements de terrain | 42 |
| 5.2- Éboulements..... | 43 |
| 6-Érosion par sapement des berges | 44 |
| VI- Évolution de l'érosion hydrique..... | 45 |
| 1- Ordres de grandeurs de pertes de sol par type d'érosion | 46 |
| 2-Forme d'accumulation de l'érosion hydrique..... | 46 |
| VII- Conséquence d'érosion hydrique dans un bassin versant..... | 47 |
| Les dégâts sur les ressources hydriques | 48 |
| Conclusion..... | 50 |
| Chapitre IV : Analyse morphométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa | 52 |
| Résumé | 52 |
| Introduction..... | 52 |
| I-Caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 53 |
| 1-Forme du bassin..... | 53 |
| 1-1-l'indice de compacité ou de Gravilius KG..... | 53 |
| 1-2-rectangle équivalent | 54 |
| 2-Relief du bassin versant..... | 55 |
| 2-1-Hypsométrie du bassin..... | 55 |

| | |
|---|------------|
| 2-2-Les pentes du bassin | 59 |
| 3-Les pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa | 61 |
| 3-1-Pente moyenne du bassin versant..... | 64 |
| 3-2-Indices de pente global | 64 |
| 3-3-Exposition..... | 65 |
| II- Analyse morphométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 68 |
| 1-L'analyse morphométrique..... | 68 |
| 2- les paramètres morphométriques..... | 68 |
| 2-1-Les paramètres de base | 74 |
| 2-2-Les paramètres linéaires | 76 |
| 2-3-Paramètre de forme..... | 88 |
| 2-3-Paramètres de relief..... | 105 |
| III-Matrice de corrélation des paramètres d'analyses morphométriques du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 111 |
| IV-Prioritisation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa..... | 112 |
| Conclusion..... | 118 |
| Chapitre V : La cartographie et la modélisation du bassin versant de l'Oued Joumouaa par les directives PAP/CAR..... | 120 |
| Résumé | 120 |
| I- Introduction..... | 120 |
| II- Approche Méthodologique et Matériel Utilisé..... | 121 |
| III- Résultats et discussions | 124 |
| 1- La phase prédictive..... | 124 |
| 1-1 Carte des pentes..... | 124 |
| 1-2 Carte de litho-faciès | 127 |
| 1-3 Carte de friabilité..... | 129 |
| 1-4-Carte d'érodibilité | 131 |
| 1-5 Carte du couvert végétal | 133 |
| 1-6 Carte d'occupation des sols..... | 136 |
| 1-7 Carte de protection des sols..... | 138 |

| | |
|--|------------|
| 2-Phase descriptive..... | 141 |
| 2-1 Carte d'état érosif..... | 141 |
| 2-2 Carte des formes d'érosion | 144 |
| 3- Phase d'intégration..... | 146 |
| Conclusion..... | 148 |
| Chapitre VI : Modélisation de l'érosion Hydrique par la méthode de Wishmeier | 150 |
| Résumé | 150 |
| I- Introduction..... | 150 |
| II- Aperçu su le modèle de Wischmeir et Smith (RUSLE)..... | 152 |
| III- Le Modèle Révisé USLE : RUSLE..... | 153 |
| IV- Facteurs du modèle RUSLE | 155 |
| 1- Classe d'Agressivité Climatique R..... | 155 |
| 3- Classe topographique : LS | 161 |
| 4- Classe couvert végétal C..... | 163 |
| V- Quantification des pertes en sol dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa selon le modèle de Wishmeir..... | 167 |
| Conclusion..... | 170 |
| Chapitre VI : Caractérisation physicochimique des sols agricoles et estimation de la stabilité structurale au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa ... | 172 |
| Résumé | 172 |
| I-Introduction | 172 |
| II-Matériels et méthodes..... | 174 |
| 1 -Présentation de la zone d'étude | 174 |
| 2 -Echantillonnage et méthodes d'analyses | 175 |
| III-Résultats et discussions..... | 178 |
| 1 -Texture du sol..... | 178 |

| | |
|--|------------|
| 2-pH du sol..... | 178 |
| 3 - Conductivité électrique (la salinité) | 180 |
| 4 - Matière organique | 181 |
| 5- Calcaire total | 182 |
| 6 - Phosphore assimilable | 183 |
| 7- Potassium assimilable | 184 |
| 8-La stabilité structurale : | 185 |
| IV-Évolution des paramètres physicochimiques des sols dans les trois stations du bassin l'Oued Joumouaa. | 186 |
| IV-Discussions | 188 |
| 1- Le pH..... | 188 |
| 4.2 Carbonate de calcium | 189 |
| 4.3 Matière organique | 189 |
| V-Matrice de corrélation (Pearson (n)) des trois stations..... | 190 |
| Conclusion..... | 191 |
| Conclusions Générales | 194 |
| Perspectives | 196 |
| Références Bibliographiques..... | 197 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Situation du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 7 |
| Figure 2 : Localisation géographique des principales régions du bassin sud-rifain occidental (Cirac, 1987). 1 : limite d'affleurement du Néogène ; 2 : limite des principales régions..... | 8 |
| Figure 3: Carte géologique simplifiée du Rif « domaines morphostructuraux » (Cirac 1987). | 9 |
| Figure4:Disposition des chaînes alpines autour de la Méditerranée Occidentale. (In El Morabet ,1996). | 9 |
| Figure 5: Carte géologique simplifiée du Rif. (Suter, 1980 : carte géologique du Rif au 1/500000). | 10 |
| Figure 6: Principales unités structurales du Rif septentrional. (D'après Suter, 1980 : carte géologique du Rif au 1/500000). 1- Sebvides, 2- Ghomarides, 3- Dorsale calcaire, 4- Nappes de flyschs, 5- Unités intra-rifaines, 6- Prérif, 7- Néogène et Quaternaire, 8- Péridotides de Béni Bouchraa. | 11 |
| Figure 7: Modèle de mise en place de la Nappe Prérifaine dans le Domaine Externe du Rif (Flinch, 1993). | 14 |
| Figure 8: Coupe géologique dans le Moyen-atlas nord-oriental (Sabaoui, 1998). | 16 |
| Figure 9 : Zones de contacts entre le Rif, Prérif et Moyen-Atlas (Gartet et al, 2011,modifié). | 19 |
| Figure 10: Cadre géomorphologique du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 21 |
| Figure 11: Diagramme Ombrothermique du bassin versant d'Ouergha (Boukrim,2011). | 22 |
| Figure 12: Carte du climat du Maroc. Source :(http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat_maroc). | 23 |
| Figure 13: Carte de la Pluviométrie annuelle du Maroc. Source :(http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat Maroc). | 24 |
| Figure 14: Ampleur du risque d'érosion hydrique à l'échelle mondiale. | 27 |
| Figure 15: Ravins et ravinement généralisés : quelques indicateurs d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa(Teroual), (FARTAS le 22/12/2018). | 30 |

| | |
|---|----|
| Figure 16: Processus de l'érosion hydrique dans un bassin versant Joumouaa..... | 31 |
| Figure 17: Processus de transport des particules érodées (dans un cours d'eau)..... | 33 |
| Figure 18: Facteurs responsables de la genèse des risques d'érosion hydrique dans un bassin versant (Benzougagh, 2019)..... | 34 |
| Figure 19: Erosion pelliculaire du bassin versant de l'Oued Joumouaa (Ain Dorij), (FARTAS le 22/12/2018)..... | 39 |
| Figure 20: Erosion en rigole sur le flanc des collines dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa (Teroual), (FARTAS, 2018)..... | 40 |
| Figure 21: Formation de "badlands" par érosion régressive dans les marnes miocènes (Teroual), (FARTAS, 2018)..... | 41 |
| Figure 22: Glissement rotationnel : a : Schéma générale ; b : glissement rotationnel dans le bassin versant de l'Oued Inaouène (Benzougagh 2019)..... | 42 |
| Figure 23: Erosion remontante par ravinement au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa .. | 44 |
| (FARTAS, 2019)..... | 44 |
| Figure 24 : Érosion par sapement des berges du cours d'eau de l'Oued Joumouaa (FARTAS, 2019). | 45 |
| Figure 25: Taux d'envasement des barrages des pays du Maghreb (Remini&Remini 2003). | 49 |
| Figure 26 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 57 |
| Figure 27: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 58 |
| Figure 28 : Carte des altitudes du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 60 |
| Figure 29: Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 63 |
| Figure 30: Carte d'exposition du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 67 |
| Figure 31: Les douze sous bassins versants de l'Oued Joumouaa..... | 70 |
| Figure 32 : Méthodologie d'analysemorphométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 73 |

| | |
|--|-----|
| Figure 33 : Modèle numérique du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 75 |
| Figure 34 : Réseaux hydrographique détaillé du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 80 |
| Figure 35: Nombre de flux au niveau de chaque ordre de flux ;B :pourcentage du chaque ordre du flux du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 83 |
| Figure 36: Nombre et longueur de courant de chaque ordre du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 84 |
| Figure 37: Classification du rapport de bifurcation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 87 |
| Figure 38: Densité de drainage du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 91 |
| Figure 39: Fréquence de flux du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 93 |
| Figure 40: relation entre fréquence de flux et densité de drainage des 12 sous bassins versant de l'Oued Joumouaa. | 94 |
| Figure 41: Carte de texture de drainage des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 96 |
| Figure 42: Carte de longueur d'écoulement du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 98 |
| Figure 43: Carte de facteur de forme des sous bassins versant de l'Oued Joumouaa. | 99 |
| Figure 44: Carte du rapport d'allongement des sous bassins versant de l'Oued Joumouaa. | 100 |
| Figure 45: Carte d'entretien du canal du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 102 |
| Figure 46: Valeur d'infiltration dans bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 103 |
| Figure 47: Nombre de robustesse des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 109 |
| Figure 48: Carte de robustesse des sous bassins de l'Oued Joumouaa. | 110 |
| Figure 49: Carte de priorisation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 117 |
| Figure 50: Méthodologie adoptée pour la cartographie d'érosion du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 123 |
| Figure 51: Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 126 |

| | |
|---|-----|
| Figure 52: Carte de litho-faciès du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 128 |
| Figure 53: Carte de friabilité du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 130 |
| Figure 54: Carte d'érodibilité du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 132 |
| Figure 55: Carte de degré de recouvrement végétal dans le bassin versant de l'o. Joumouaa (extraite de l'image Landsat 8 du 29/06/2018) | 135 |
| Figure 56: Carte d'occupation des sols dans le bassin versant de l'o. Joumouaa (Extraite de l'image Landsat 8 du 29/06/2018) | 137 |
| Figure 57: Carte de protection des sols dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 140 |
| Figure 58: Carte d'état érosif du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 143 |
| Figure 59: Carte des formes d'érosion dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 145 |
| Figure 60: Carte consolidée du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'o. Joumouaa. | 147 |
| Figure 61: la méthodologie adoptée pour la réalisation de la carte de perte en sols..... | 154 |
| Figure 62 : Carte d'érosivité des pluies dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 157 |
| Figure 63 : Carte d'érodibilité du sol dans le bassin de l'oued Joumouaa..... | 160 |
| Figure 64: Carte du facteur topographique LS du bassin de l'oued Joumouaa. | 162 |
| Figure 65 : Carte montrant le facteur C dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 164 |
| Figure 66 : la relation entre NDVI et le facteur C. | 165 |
| Figure 67: Carte des classes des pertes en sol le bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 169 |
| Figure 68: Situation géographique de la zone d'étude avec localisation des trois stations. | 175 |
| Figure 69: Courbes des évolutions des paramètres physico-chimiques dans les trois stations de la zone d'étude. | 188 |
| Figure 70 : Effet de la matière organique sur la stabilité structurale. | 190 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1: Dégradations spécifiques potentielles érosifs d'un bassin versant en fonction de la nature lithologique (Benzougagh,2019)..... | 36 |
| Tableau 2: L'importance des pertes en sols par type d'érosion (Benzougagh, 2019) | 46 |
| Tableau 3: Etat des barrages des pays sud de la Méditerranée (Remini et Remini, 2003). | 49 |
| Tableau 4: Répartition des superficies selon les tranches d'altitude du bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 58 |
| Tableau 5: Classification des pentes et répartition des classes et dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 62 |
| Tableau 6 : Classification ORSTM du relief à partir de l'indice de pente globale..... | 65 |
| Tableau 7 : Répartition des classes d'exposition du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 66 |
| Tableau 8: Méthode de calcul de paramètres morphométrique. | 71 |
| Tableau 9: Analyse des courants des douze sous-bassins versants de l'Oued Joumouaa..... | 76 |
| Tableau 10: rapport de longueur d'ordre et moyenne de rapport d'ordre..... | 78 |
| Tableau 11: Nombre de cours d'eau, longueur du cours d'eau et rapport des longueurs des douze sous bassins versants. | 81 |
| Tableau 12 : Classement de rapport de bifurcation dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 85 |
| Tableau 13: Résultats des paramètres de forme dans le bassin de l'Oued Joumouaa. | 88 |
| Tableau 14: Apport de circularité, coefficient de compacité, rapport d'allongement et facteur de forme dans le bassin de l'Oued Joumouaa. | 89 |
| Tableau 15: Classification de texture de drainage (Benzougagh,2019)..... | 95 |
| Tableau 16: Corrélation entre Rc et stade du cycle du bassin versant de l'Oued Joumouaa..... | 104 |
| Tableau 17 : Les paramètres de relief des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Tableau18: classement des paramètres linéaires dans les sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 113 |
| Tableau 19: Classement des paramètres de forme dans les sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 114 |
| Tableau 20: Résultats de priorisation de l'analyse morphométrique des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 115 |
| Tableau 21 : Priorité finale de l'analyse morphométrique des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. | 116 |
| Tableau 22: Les classes de risque lié à la valeur de pente de bassin versant de l'Oued Joumouaa. | 124 |
| Tableau 23: Classification des litho-faciès selon les directives PAP / CAR. | 127 |
| Tableau 24 : Classification du niveau de couverture végétale selon PAP / CAR..... | 133 |
| Tableau 25: les classes et niveau de protection du sol selon PAP/CAR..... | 138 |
| Tableau 26: La Matrice de degré des états érosifs des sols selon le modèle PAP/CAR..... | 141 |
| Tableau 27: Les différentes classes des états érosifs selon le modèle PAP/CAR..... | 142 |
| Tableau 28: Les stations des précipitations au niveau du bassin de l'oued Joumouaa. | 155 |
| Tableau 29 : Valeurs du facteur P (Wischmeier & Smith,1978). | 166 |
| Tableau 30: Classes de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (DMP) (Le bissonnais, 1995). | 177 |
| Tableau 31 : Caractérisation texturale moyenne des sols étudiés. | 178 |
| Tableau 32: Résultats de mesures de pH des trois stations de la zone d'étude..... | 179 |
| Tableau 33: Résultats de conductivité électrique des trois stations de la zone d'étude. | 180 |
| Tableau 34: Résultats de la matière organique des trois stations de la zone d'étude. | 181 |
| Tableau 35: Résultats du calcaire total des trois stations de la zone d'étude..... | 183 |
| Tableau 36: Résultats du phosphore assimilable dans les trois stations de la région d'étude. | 184 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 37: Résultats du potassium échangeable des trois stations de la zone d'étude. | 185 |
| Tableau 38: L'indice de stabilité des trois sites de la région d'étude. | 186 |
| Tableau 39: Statistiques générales des différentes analyses physicochimiques de la station 1 | 186 |
| Tableau 40 : Statistiques générales des différentes analyses physicochimiques de la station 2 | 186 |
| Tableau 41: Statistiques générales des différentes analyses physicochimiques de la station 3 | 187 |

Liste des Acronymes

| | |
|-------|--|
| SIG | Systèmes d'information géographique |
| MNT | Modèle numérique de terrain |
| BV | Bassin versant |
| ASTER | The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer |
| DEM | Digital Elevation Model |
| MN | Modèle numérique des altitudes |
| A. | Superficie du bassin versant |
| P. | Périmètre du bassin versant |
| QGIS | Quantum GIS |
| AEE | Agence européenne pour l'environnement |
| USLE | Equation universelle de la détermination des pertes en sol |
| FAO | Food and Agriculture Organization of UN |
| M.O | Matière organique |
| RUSLE | Equation universelle de la détermination des pertes en sol version révisée |
| THR | Très haute résolution spatiale |
| HRS | Haute résolution spatiale |
| ESA | Agence spatiale européenne |

Introduction

Introduction

A-Problématique et objectifs

Le sol est une ressource non renouvelable qui remplit de multiples fonctions : support pour l'agriculture, zone de stockage de l'eau, habitats, dégradation de substances polluantes. Du fait particulièrement de pressions anthropiques en constante augmentation, les menaces sur cette ressource se multiplient. L'érosion des sols constitue la manifestation la plus préoccupante de ces menaces puisque les taux de dégradation dépassent les taux de formation et de régénération en de nombreuses zones du milieu méditerranéen (Bleu and Antipolis,2003). L'irrégularité climatique, la torrencialité des écoulements, la faible densité du couvert végétal et la surexploitation des terres sont particulièrement favorables à l'accélération du phénomène de l'érosion hydrique qui menace gravement les potentialités en eau et en sols (Bleu and Antipolis,2003 ; Hentati et al, 2010).

L'érosion hydrique est très nuisible dans les milieux agricoles en enlevant la couche arable du sol. En effet la disparition de la totalité ou d'une partie de cette couche superficielle diminue le potentiel de production du sol en réduisant sa fertilité, sa capacité d'emmagasiner l'eau et l'air. Les particules enlevées peuvent se redéposer un peu plus loin sans grandes conséquences apparentes pour l'environnement. Cependant cette mobilisation des matériaux de terre dans les flux d'eau peut également générer de fort impacts sociaux, humains et économiques : comblement des retenues de barrages, augmentation des inondations suite à l'alluvionnement des cours d'eau de plaines, dégradation de la qualité des eaux coulées boueuses (Albegel et al., 2003). Les principaux facteurs responsables de l'érosion hydrique sont bien connus : le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (King and Le Bissonais, 1992). En région méditerranéenne, la réalité de ces 4 facteurs fait que l'érosion hydrique des sols est un phénomène largement répandu (kheir et al., 2001).

L'érosion résulte de nombreux processus qui jouent au niveau de trois phases : le détachement des particules, le transport solide et la sédimentation (Cerdan et al., 2006). Quelle que soit l'échelle d'étude, du mètre carré au bassin versant de centaines de milliers de km², on retrouve partout ces trois phases de l'érosion mais avec des intensités distinctes. D'où la diversité des facteurs de l'érosion en fonction des phases dominantes. Vu la nature des dégâts observés, de nombreuses recherches sur le processus et les facteurs de l'érosion hydrique ont été engagées (Le Bissonais et al.1998). Elles ont contribué à mieux faire connaître les mécanismes de l'érosion des sols en se basant sur des observations de terrain, sur la modélisation des phénomènes, ainsi que sur la connaissance des mécanismes physiques.

Différentes approches de quantification et d'évaluation des processus de l'érosion hydrique sont souvent basées sur des mesures directes à savoir les mesures topographiques, les simulations des pluies et les mesures bathymétriques (Chegour et al., 2008). Les évaluations des taux d'érosion se sont également basées sur des mesures indirectes, principalement par recours à la modélisation à travers des modèles conceptuels (Novara et al., 2011) ou physiques (Amore et al., 2004 ; de Vente et al., 2005 ; Govers et al., 2007), à l'utilisation des systèmes d'informations géographiques ou l'imagerie satellitaire (Kheir et al., 2008).

Les objectifs de cette thèse sont doubles à savoir, le diagnostic de l'état de dégradation du bassin et l'identification des zones à risques. Afin de constituer un document décisif dans le choix des zones (sous bassins) affectées sérieusement et profondément par le phénomène d'érosion hydrique. Le choix de ces zones est le fruit de plusieurs investigations pour la quantification des pertes en terre, la modélisation spatialisée des facteurs d'érosion et la cartographie aussi bien des différentes zones potentiellement productrices de sédiments et des états érosifs actuels du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

B-Méthodologie

L'étude de l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants demeurent un défi de taille pour les institutions à notre échelle, nous avons procédé par plusieurs phases basées essentiellement sur :

- la synthèse des travaux antérieurs effectués dans le secteur d'étude,
- la collecte des données de terrain (log lithostartigraphique, levés géologiques.
- la collecte des données numériques sur la zone d'étude (carte topographique, carte géologique, données climatiques et images satellitaires,).

Il s'agit d'une approche méthodologique multidisciplinaire visant d'atteindre les objectifs cités, basés principalement sur les étapes suivantes :

- Analyse morphométrique à travers plusieurs paramètres (linéaires, de formes et de reliefs) et ce pour l'identification des zones à risques et leurs degrés de priorisation. Chaque paramètre se caractérise par plusieurs variables qui contrôlent l'étude des risques naturels dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.
- Étude cartographique et application des directives PAP/CAR pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa (Région de Zoumi).

- la détermination des zones à risque et l'évaluation d'érosion potentielle suivant les estimations des pertes en terres spatialisées sur tout le bassin versant et données par le modèle RUSLE (modèle révisée de l'équation universelle de perte en terre).

-caractérisation physico-chimique et estimation de la stabilité structurale des sols agricoles du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

La vérification des résultats obtenus par des campagnes du terrain a été effectuée afin de valider chaque méthode. Ensuite, on passe à la réalisation des cartes thématiques des zones à risque en vue de constituer un document décisif pour aider les différents intervenants dans le domaine de la gestion du territoire. Ces mêmes résultats sont en mesure d'engager des stratégies et plans d'actions de prévention et prévision pour réduire l'impact des risques naturels sur les vies humaines, et les biens de la société.

C- Plan de la thèse

Chapitre 1 : Le contexte géographique et géologique du bassin versant de Joumouaa, ce chapitre présente la géographie et la géologie du bassin versant de l'Oued Joumouaa dans son environnement pré-rifain.

Chapitre 2 : Le contexte géomorphologique, hydro-climatique du bassin versant de l'Oued Joumouaa complète l'analyse du milieu physique.

Chapitre 3 : Essai de quantification de l'érosion hydrique complète le canevas descriptif.

Chapitre 4 : Analyse morphométrique et priorisation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa. Établir la priorisation des zones à risques est en réalité un travail qu'a fait l'objet d'une publication à comité de lecture.

Chapitre 5 : La cartographie et la modélisation du bassin versant de l'Oued Joumouaa par les directives PAP/CAR, évaluation qualitative de l'érosion hydrique. Là, il a été question d'une approche utilisée et de la vérifier dans le Prérif occidental.

Chapitre 6 : Estimation de pertes en terre dans le bassin versant de l'oued Joumouaa selon le modèle de Wischmeier.

Chapitre 7 : Caractérisation physicochimique des sols agricoles et estimation de la stabilité structurale au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Conclusion générale.

***Chapitre I : Contexte Géographique et
Géologique du Bassin versant de l'Oued
Joumouaa.***

Chapitre I : Contexte géographique et géologique du bassin versant de l'Oued Joumouaa

I-Introduction

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est localisé dans un contexte géographique particulier. Il est situé au Nord-ouest du Maroc, le Prérif qui lui confère une très grande diversité de paysages. Leur connaissance permet d'une part de mieux comprendre les phénomènes hydrologiques et d'autre part de mettre cette étude dans l'ambiance morphologique régionale. Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu des conditions concernant les différents facteurs pris en compte (sols, climat, etc) pour l'ensemble du bassin versant.

II-Situation géographique de la zone d'étude.

Sur le plan administratif, le territoire du bassin versant de l'Oued Joumouaa appartient à la région Tanger-Tetouan-El houceima, province d'Ouazzane. Il fait partie du grand bassin hydrologique du Sebou. C'est un sous bassin de l'Ouergha. Il couvre une superficie d'environ 60km² et un périmètre de 59km. Il s'installe dans une zone de transition entre le Prérif méridional et le contact avec le Gharb.

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est situé dans le Nord du bassin versant du Sebou. Il prend sa naissance à la hauteur de la ville de Ain Dorij. Il est limité au nord par la ville de Zoumi, à l'est par Ounanna au sud par Lamjaara, et à l'ouest par Zghira. C'est un sous bassin de l'Oued Ouergha, situé dans la partie méridionale du Rif.

Il s'inscrit dans la province d'Ouezzane et regroupe plusieurs communes rurales : Zoumi, Teroual, Ounnana, Zghira, et Lamjaara (Fig.1).

La zone d'étude présente une forme allongée du Nord-Est au Sud-Ouest est caractérisée par un dénivelé très important allant de 92 m à 760 m et par un relief à forte composante collinaire qui favorise la genèse du risque d'érosion hydrique.

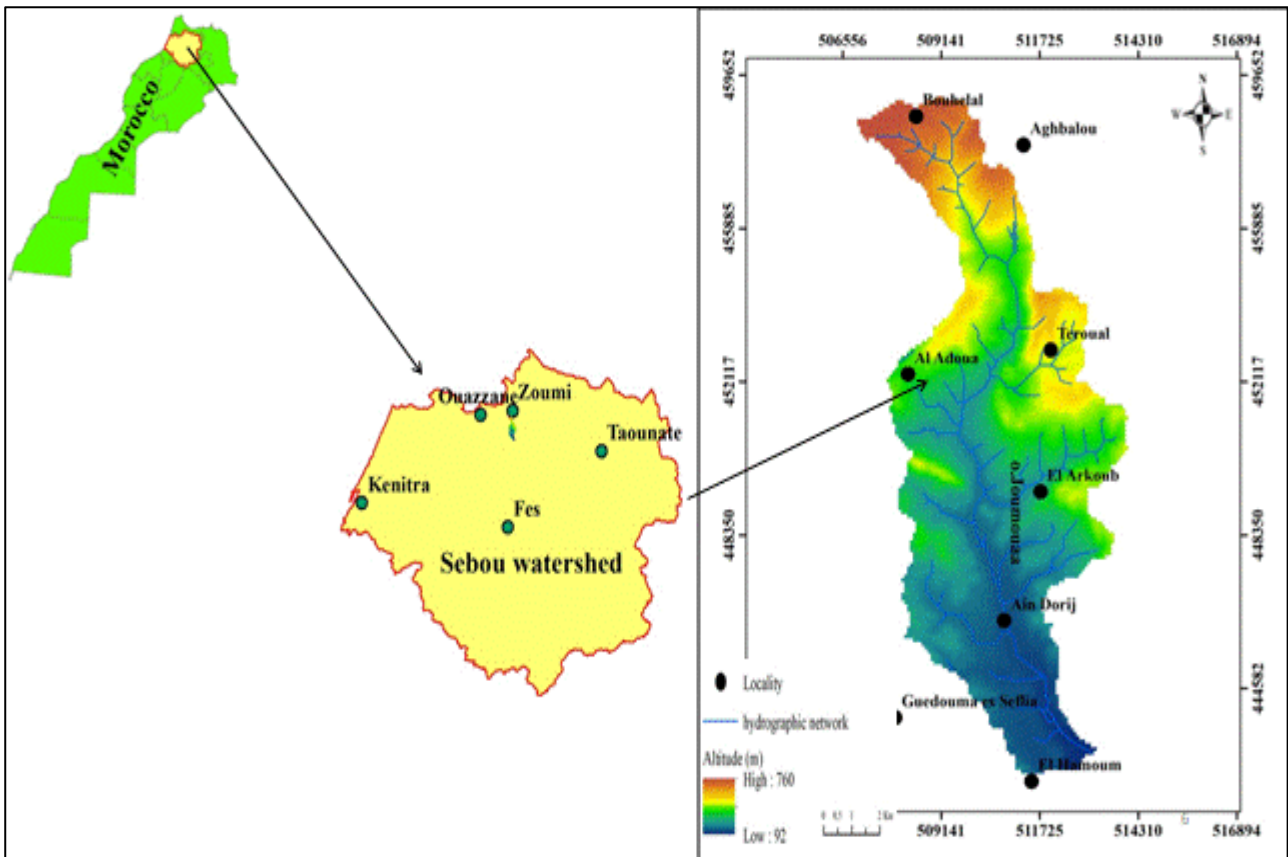


Figure 1 : Situation du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

III-Géologie du bassin versant de l'Oued Joumouaa

La zone d'étude qui fait l'objet de ce travail fait partie du bassin sud-rifain occidental (Cirac, 1985), elle recouvre en partie le Prérif occidental. Cette zone occupe la partie Sud-occidentale du Prérif Externe, qui fait partie du domaine rifain (Fig 2).

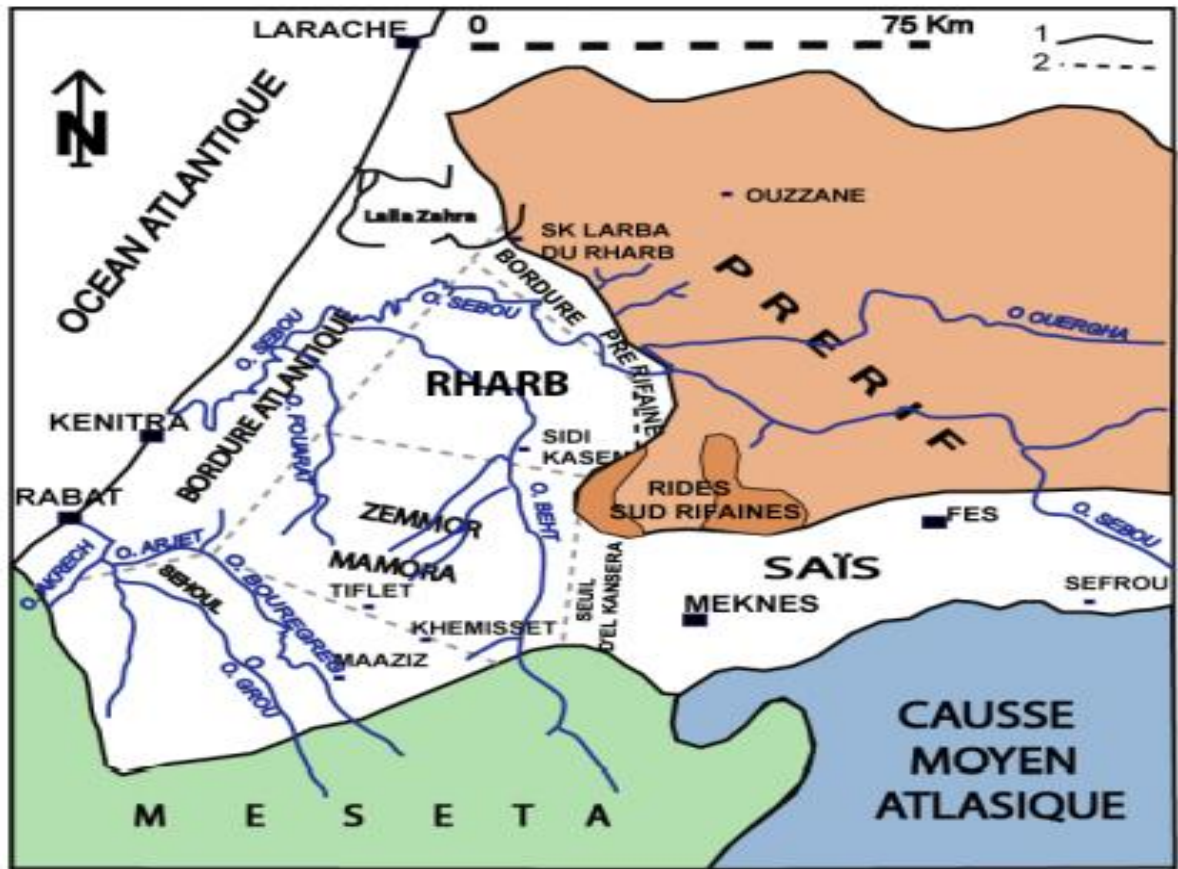


Figure 2 : Localisation géographique des principales régions du bassin sud-rifain occidental (Cirac, 1987). 1 : limite d’affleurement du Néogène ; 2 : limite des principales régions.

1-Le Rif

Selon Choubert et Marais (1952), la région du Rif s’étend sur une chaîne étendue de montagnes qui se rattachent (Maurer, 1968). Cette région est désignée comme partie du Maroc Méditerranéen (Michard, 1976). La chaîne Rifaine constitue la pierre angulaire du domaine géologique rifain (Fig3). Elle s’ouvre sur la méditerranée par une côte rocheuse, vers le Nord-Est. Alors que vers le Sud-Ouest, elle s’abaisse vers le domaine des collines péririfaines bordés par la plaine du Gharb et le plateau de Saïs (Meknès et Fès). Les parties internes de ce domaine s’immergent sous les eaux de la Méditerranée et ses éléments majeurs peuvent être suivis sous les eaux du Golfe de Cadix (Bonin et al, 1975, lajat et al, 1975).

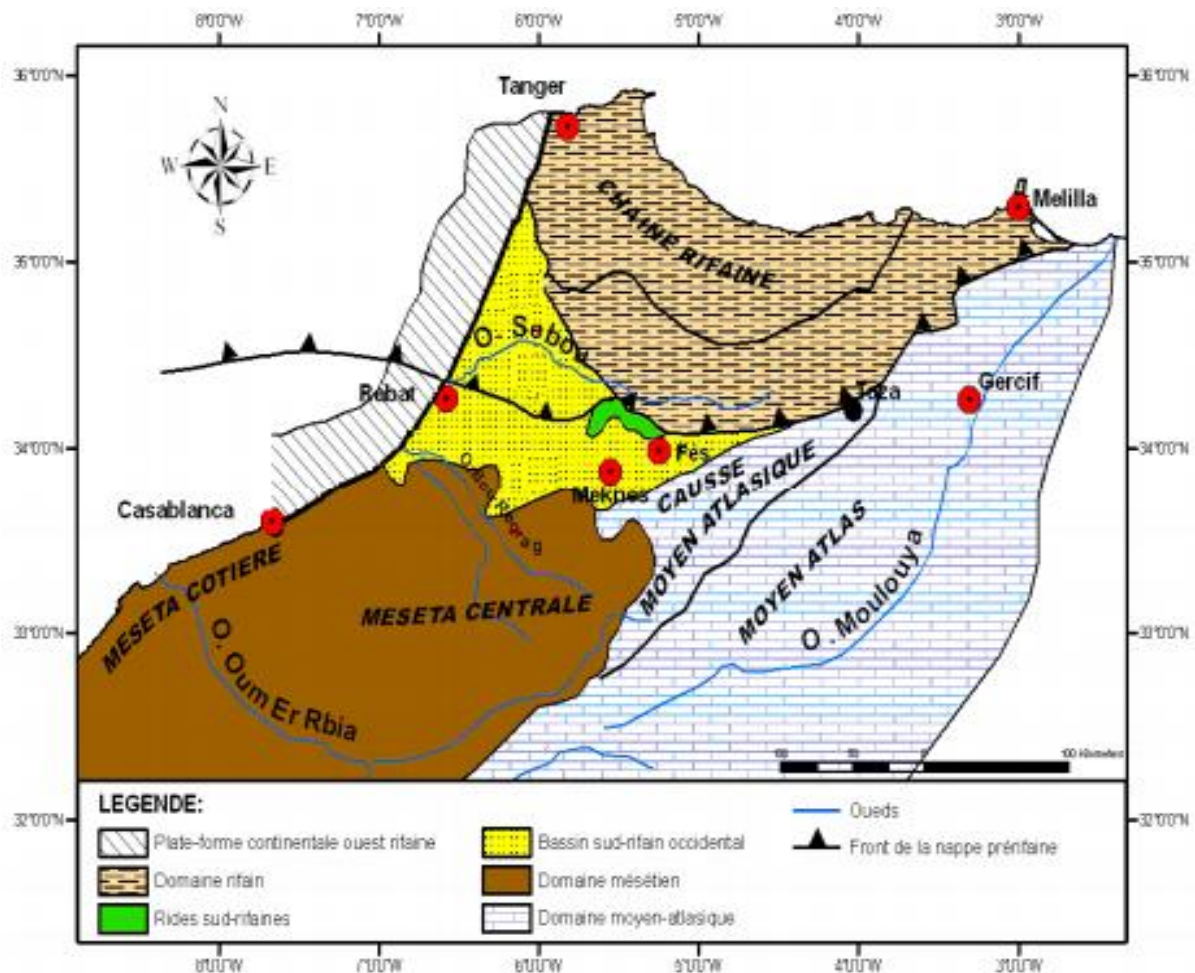


Figure 3: Carte géologique simplifiée du Rif « domaines morphostructuraux » (Cirac 1987).

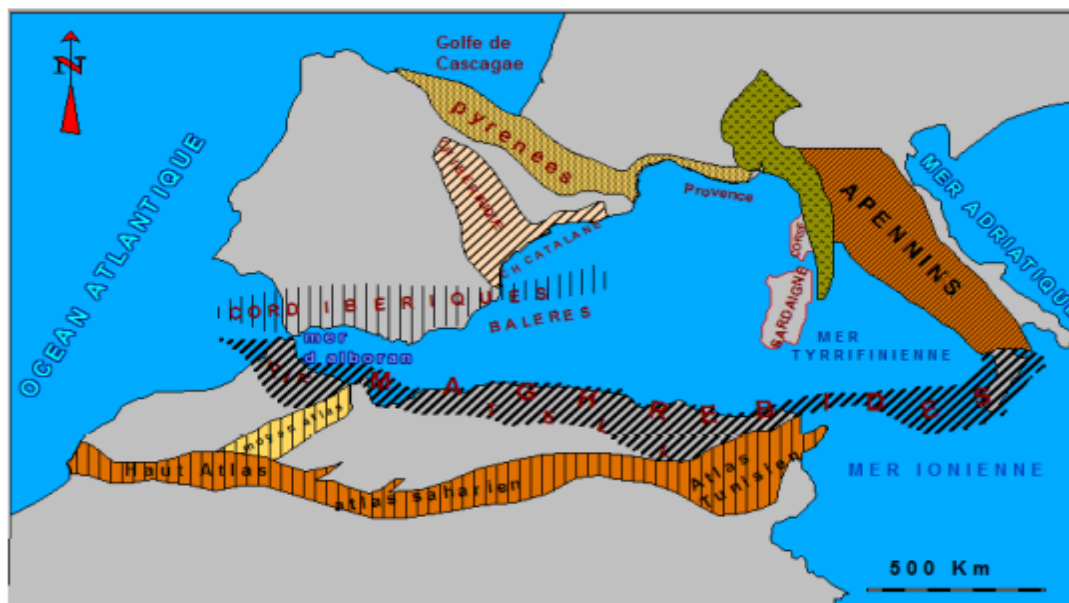


Figure4:Disposition des chaînes alpines autour de la Méditerranée Occidentale. (In El Morabet, 1996).

Les chaînes des alpes, regroupent en partie l’orogène Bético-Rifo-Kabyle, constitué des bétiques en Espagne et des Maghrébides au sud. Ces dernières sont formées du Tell algéro-tunisien, et du Rif Marocain qui forme avec les cordillères bétiques, l’arc de Gibraltar (Fig4), limite occidentale du système alpin pré-méditerranéen (Durand-Delga, 1980).

Le domaine rifain se caractérise par une structure géologique violente avec métamorphisme et charriage. Il comporte trois grandes parties subdivisées en zones emboîtées les unes dans les autres poussées du Nord au Sud, la zone externe, l’Intrarif et le Mésorif. La partie sud-occidentale du Rif fait l’objet de cette étude. La chaîne rifaine comporte, trois domaines marquants (fig5) : le domaine interne, le domaine des flyschs et le domaine externe (Durand-Delga, 1960, 1962 ; Kornprobst, 1974)

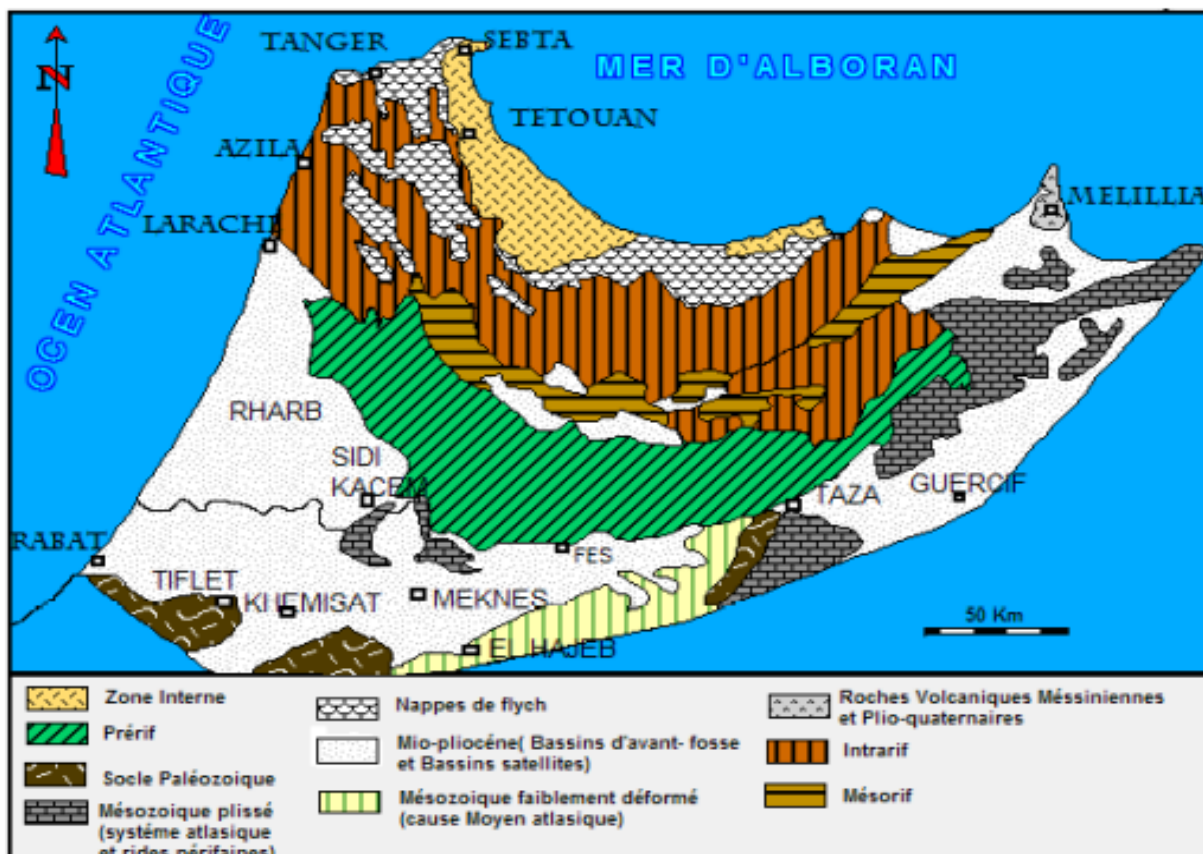


Figure 5: Carte géologique simplifiée du Rif. (Suter, 1980 : carte géologique du Rif au 1/500000).

2-Le domaine interne

Le domaine interne est constitué par des gneiss, schistes, calcaires et dolomites, d’âges primaires et permio-triasiques : les Sebtides et les Ghomarides. Il s’étend généralement le long de la

Méditerranée de Sebta à Jebha. Plus à l'extérieur, la dorsale calcaire, s'étend du détroit Gibraltar jusqu'à l'accident de Jebha. Elle se distingue par un matériel très dominés par les faciès calcaires et dolomitiques (trias, lias). Plus à l'Est, le domaine interne est représenté par le chaînon des Bokkoya.

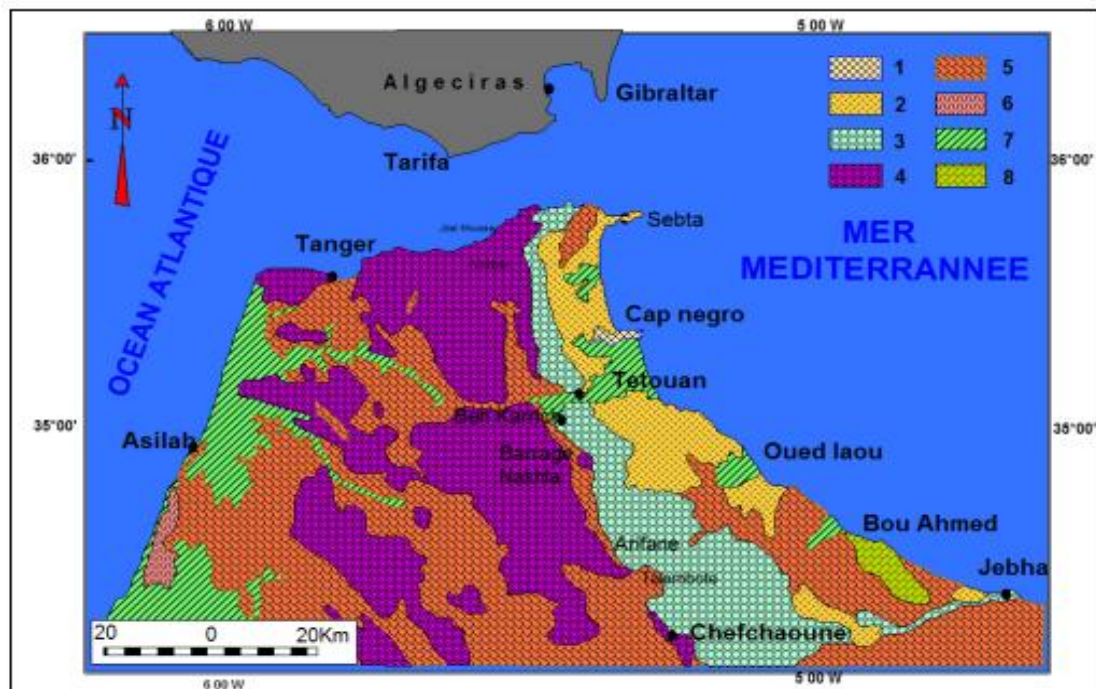


Figure 6: Principales unités structurales du Rif septentrional. (D'après Suter, 1980 : carte géologique du Rif au 1/500000). 1- Sebtides, 2- Ghomarides, 3- Dorsale calcaire, 4- Nappes de flyschs, 5- Unités intrarifaines, 6- Prérif, 7- Néogène et Quaternaire, 8- Péridotides de Béni Bouchraa.

Le domaine interne comporte trois ensembles structuraux superposés du bas vers le haut (Fig 6) :

- **Les sebtides** : c'est l'ensemble des terrains métamorphiques et ultrabasiques, correspondant à des unités plymétamorphiques allant du Carbonifère au Trias (Milliard, 1959)
- **Les ghomarides** : c'est un ensemble de nappes constitués de terrains paléozoïques peu métamorphiques, à savoir les terrains épi-métamorphiques d'âge Silurien à Carbonifère (Durrand-Delga, 1963 ; Chalouan, 1986), surmontés d'une couverture mince et discontinue Méso-cénozoïque. Les Ghomarides sont constitués de trois écaïlles (Milliard in Durand-Delga et al., 1960-1962) à matériel siluro-dévonien très déformé (Chalouan, 1983), d'un carbonifère à faciès discordant, d'un Permo-Trias à grès rouge et dolomies et d'une couverture secondaire et tertiaire condensée.
- **La dorsale calcaire** : Elle correspond à un ensemble d'écaïlles à ossature carbonatée triasico-liasique massive de plateforme (Didon et al., 1973 ; El hatimi et al., 1991). Cette série

surmonte d'autres séries condensées jurassico-crétacées, coiffées par un matériel tertiaire détritique.

3-le domaine des flyschs

C'est un domaine entièrement allochtone. il chevauche le domaine externe entre le détroit de Gibraltar et le Rif central à l'Est (Fig 6). Ce domaine comprend des nappes constituées de matériel crétacé et tertiaire (Bouillin et al., 1970 ; Didon et al., 1973 ; Suter, 1980). Ces nappes occupent trois positions structurales : elles sont soit en superposition sur les unités du domaine interne, soit entre le domaine interne et le domaine externe, ou bien en position plus externe sous forme de masse isolées sur les unités du domaine externe.

4-Le domaine externe

Ce domaine est vaste, il représente la marge téthysienne de la plaque africaine.

Ce domaine est recouvert par les nappes de charriage de flyschs et en partie par le domaine interne. Il est reparti en trois grandes parties qui sont de l'intérieur vers l'extérieur c'est-à-dire du Nord au Sud : l'intrarif, le mésorif, et le pré-rif. Celles-ci sont surmontés par des terrains allochtones secondaire et tertiaires appelés Nappes rifaines (Le Blanc, 1979, 1990).

4-1-L'intrarif :

On désigne par l'intrarif, la région de **Ketama**, qui affleure exclusivement dans le Rif central (Andrieux, 1971). C'est une unité parautochtone et épimétamorphique à matériel schisto-quartzitique d'âge liasique à crétacé inférieur (Andrieux, 1971, 1973 ; Frizon de Lamotte, 1985).

Sa couverture décollée comporte : **l'unité de Tanger**, représentée dans la partie occidentale du Rif externe. Sa série stratigraphique comporte des formations allant de l'Albo-Aptien au Miocène inférieur, mais il est largement représenté par les marges argileuses au Crétacé Supérieur.

Enfin **l'unité de Loukkous**, qui affleure dans le Rif occidental, les faciès qui prédominent sont les marno-calcaires de l'Albo-cénomannien et du Sénomannien (Lespinasse, 1975 ; Ben yaich, 1991).

4-2-Le Mésorif

C'est l'ensemble des terrains qui vont du Lias au Miocène moyen, ils sont caractérisés par des dépôts argilo-gréseux du callovo-Oxfordien (Wildi, 1981 ;1983), et par les calcarénites du Miocène moyen (Suter, 1965).

4-3-Le Prérif

A l'extérieur d'une chaîne montagneuse rifaine, il y'a un domaine de collines à dominante argilo-marneuse. C'est ce qu'on nomme le Prérif. Il constitue la partie la plus méridionale de la chaîne rifaine. Il est bordé au sud par la plaine de Saïs, sur laquelle sont bâties les villes de Fès et Meknès, à l'Ouest par la plaine du Rharb et le pays des zemmour, et vers l'Est, ne dépasse pas la vallée de Sebou. Subdivisé à son tour en Prérif interne et Prérif externe (Wildi,1983 ; Marcais et Suter in Durand delga et al 1962)

a-Le Prérif interne

Ce prérif est constitué d'écailles apparemment enracinées sous le Mésorif. La série stratigraphique comprend des calcaires du Lias et du Dogger qui forme les (sofs), alignement dans le paysage des écailles calcaires, appelé également (grès de Mrayt) (Tejera de leon, 1993) et les carbonates de plateforme du kimméridgien et du Tithonique.

b-Le Rif externe et la nappe prériefaine

La nappe prériefaine est un exemple de nappe du Prérif externe à matrice marno-sableuse du Miocène supérieur où sont emballés des éléments de toutes tailles (Ben yaich, 1991).

Le Prérif externe constitue l'une des unités frontales de la chaîne du Rif. Son front sud, qui s'arrête au contact des premiers contreforts de la marge méridionale du bassin du Rharb, passe par la limite nord des rides prériefaines (Faugères, 1978). Vers l'ouest, dans l'atlantique, le front de la nappe dessine un arc en (fer à cheval) qui rejoint, vers le nord (l'unité allochtone de Guadalquivir), équivalent de la nappe prériefaine dans la cordillère bétique.

Son allochtonie, mise en évidence par le plan de décollement présent à la base, lui vaut le nom de (nappe Prériefaine) (Bruderer et Levy, 1954). Le terme de (complexe prériefain) (Le Blanc, 1977) ou (complexe tectono-sédimentaire) (Feinberg, 1986), a été également suggéré pour cette unité géologique à cause de sa lithologie hétérogène.

Flinch fait correspondre la nappe pré-rifaine à un prisme d'accrétion (accretionary-wedge) qui progresse vers les parties externes du Rif (fig7), entraînant dans son mouvement des sédiments de mer profonde (argiles détritiques, et argiles à évaporites).

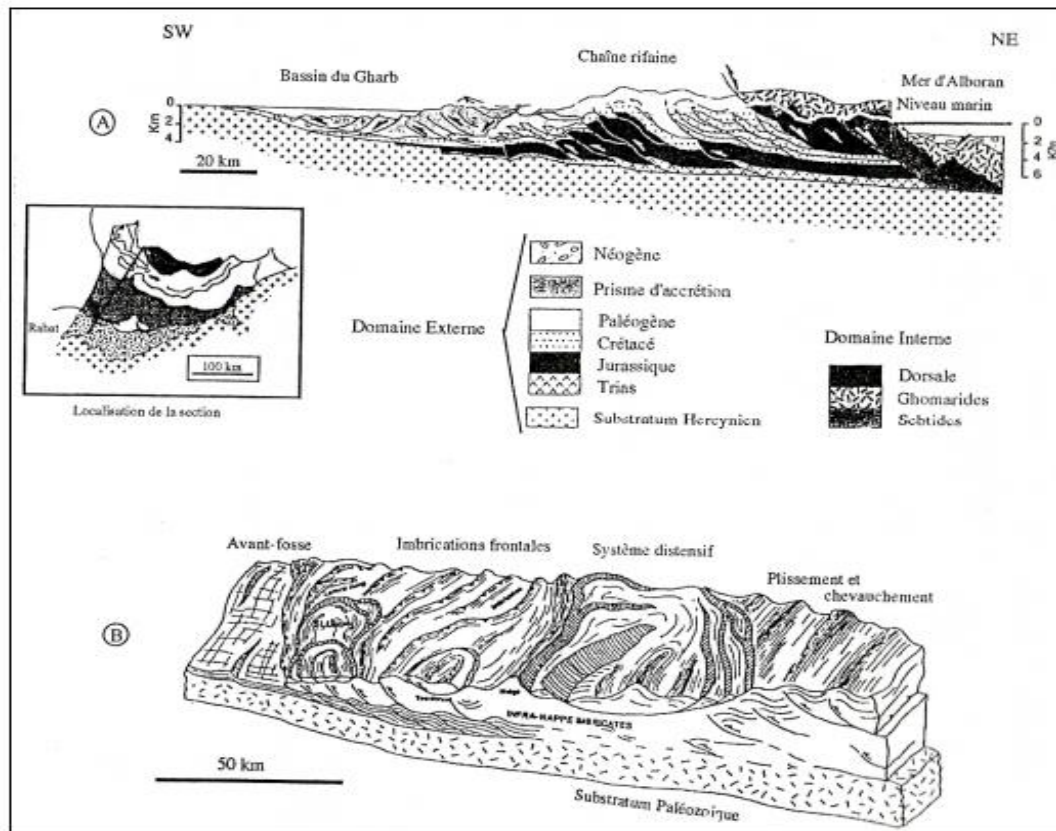


Figure 7: Modèle de mise en place de la Nappe Pré-rifaine dans le Domaine Externe du Rif (Flinch, 1993).

A. Coupe transversale reliant le Domaine Interne du Rif au Domaine Externe.

B. Bloc diagramme représentant le prisme d'accrétion.

C-Stratigraphie

Du point de vue stratigraphique, la Nappe pré-rifaine correspond à un ensemble chaotique à matrice marneuse. Des éléments de toutes tailles, depuis le microfossile jusqu'au blocs les plus divers, couvrent parfois des surfaces de plusieurs centaines de mètres, interstratifiés dans des marnes bleutées d'âge Miocène. Ces éléments, dont les plus fréquents sont constitués de Trias marnogypsifère, ont pour origine les différentes nappes des zones externes du Rif (Lajat et al, 1975).

La Nappe prérifaine est constituée principalement par des argiles détritiques et turbiditiques et par des évaporites de Trias. Ces séries triasiques, crétacées, paléogènes et néogènes très déformées auraient été détachées de leur base originelle et charriées sur le Mésozoïque et le miocène moyen de l'avant-pays (Flinch, 1993).

4-4-l'avant pays (les unités décollées et glissées)

- Nappe rifaine supérieure à affinité intrarifaine (Wildi, 1983)
- Les unités supérieures à affinité intrarifaines sont toutes les séries allochtones superposées à l'unité de Ketama dont le Jurassique détritique est semblable à celui de la nappe de Senhadja et la nappe d'Aknoul.
- Nappes rifaines à affinité Mésorifaines (Wildi, 1983).
- Nappes de type Ouezzane : on y trouve la nappe d'Ouezzane (sensu stricto) (1980a-1980b), la nappe de Habt et l'unité de Tsoul qui est superposée au domaine prérfain (LeBlanc et Olivier, 1983). De point de vue stratigraphique ces nappes sont constituées de terrains allant du Crétacé au Miocène supérieur.

Les bassins du Gharb et de Sais au sud de la chaîne du Rif, constituent les bassins d'avant pays de la chaîne. Ils sont localisés entre le domaine du prérf au nord et le Moyen Atlas.

5- Le Moyen-Atlas

Il se situe au sud des rides prérfaines et se subdivise en deux parties : le causse moyen-atlasique au NW et le Moyen-Atlas plissé au SE. Ces dernières sont séparées par le massif paléozoïque (boutonnière) de Tazekka (Fig. 8) et par un contact anormal dit accident Nord Moyen-atlasique (Colo, 1961). La bordure septentrionale de cet ensemble est orientée NE-SW et rejoint le Prérf au niveau du col de Touaher (in Dridri, 2004).

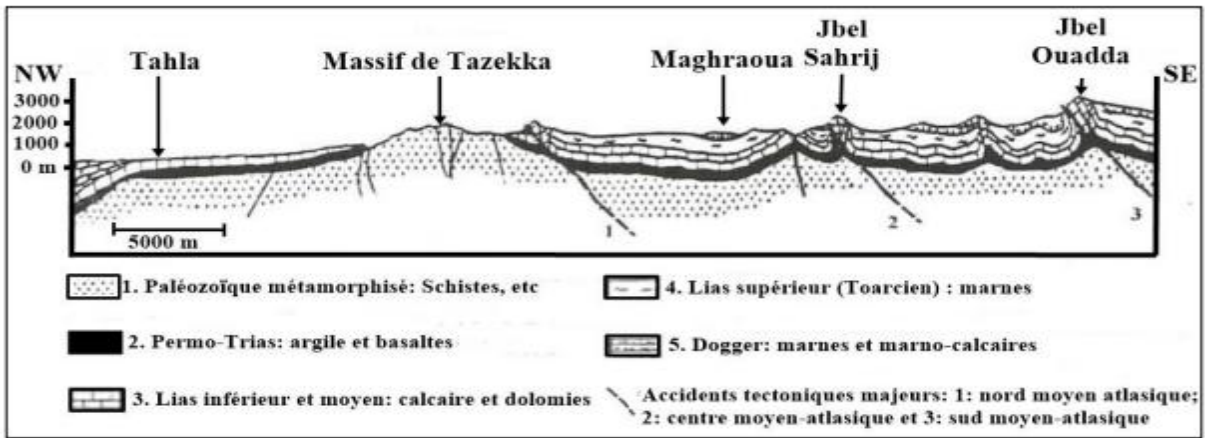


Figure 8: Coupe géologique dans le Moyen-atlas nord-oriental (Sabaoui, 1998).

La partie nord est constituée par les fronts des nappes pré-rifaines, dont les affleurements caractéristiques sont d'âge cénozoïque, sans oublier quelques formations du crétacé. Cet ensemble est séparé du domaine moyen-atlasique, sauf au niveau du col de Touaher, par le ~ 13 ~ sillon Sud rifain qui constitue un bassin post-orogénique (Naoura, 2011). La nature lithologique des formations moyennes-atlasiques est variée, avec la dominance des formations carbonatées du Jurassique.

*Chapitre II : Analyse Géomorphologique,
Hydro-Climatique du Bassin Versant de
l'Oued Joumouaa*

Chapitre II : Analyse Géomorphologique, Hydro-Climatique du Bassin Versant de l'Oued Joumouaa

I-Introduction

La discipline qui s'intéresse à l'étude des processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau, s'appelle la géomorphologie fluviale. La morphologie du cours d'eau fusionne l'ensemble des paramètres le caractérisant (pente, largeur, granulométrie, forme des berges). Elle s'appuie sur de nombreuses données de terrain, des prélèvements étant traités en laboratoire, ou d'observations du milieu. Cette discipline est relativement récente et se situe au croisement de plusieurs autres disciplines des sciences de la terre, telles que la géologie, la géographie physique, l'hydrologie, la sédimentologie... (Malavoi et Bravard, 2010). La morphologie fluviale met en jeu deux composantes physiques : l'hydrodynamique au-dessus d'un fond érodable et la dynamique du transport sédimentaire (Fourrière, 2009).

Les caractéristiques hydro-climatiques d'un bassin versant peuvent influencer sur tous les processus hydrologiques et érosifs dans ce bassin. Ils peuvent donc être à l'origine des risques de glissements de terrains, d'inondation et d'érosion.

Au cours de ce chapitre, on va aborder la géomorphologie du bassin versant de l'Oued Joumouaa et étudier les données hydro-climatiques.

II-Les zones de transitions en bordures du bassin versant de l'Oued Joumouaa

1- Contact entre le Rif et le Prérif

Le domaine rifain au Nord, représenté également par le Prérif, est caractérisé par un relief moins accentué. Il est constitué par un ensemble de collines marneuses et argileuses fréquemment ravinées. Le contact entre le Rif et le Prérif n'est pas aussi net comme nous pouvons le voir entre le Prérif et le Moyen-Atlas. Le passage entre le Rif et le Prérif se fait par l'intermédiaire d'une unité structurale et topographique bien individualisée dans la zone de contact. Cette partie représente un volume montagneux sous forme d'une suite de reliefs rocheux alignés (Sofs) (Fig.9). Ces Sofs ont une altitude variante entre 700 à 1200 m, et sont orientées généralement E-W avec un agencement

sous forme d'une bande étroite et légèrement entrecoupée du Prérif de Sidi Kacem à l'Ouest jusqu'à la région de M'Soun à l'Est au NE de Taza (Gartet et al, 2011).

Cette zone de transition entre le Rif et le Prérif est formée principalement par un relief collinaire façonné dans des terrains tendres du Miocène. Le relief de ces Sofs est composé par des roches carbonatées (calcaires et dolomies) massives avec des intercalations argileuses ou gréseuses.

La structure d'ensemble est liée au charriage de ce matériel, dont l'âge et la nature sont variés (marnes, gypse, calcaire et grès) ; d'où le nom de "complexe Prérifain" attribué à cette partie du Rif (Vidal, 1977). Les marnes sont très sensibles à l'érosion hydrique et était le siège de nombreuses instabilités dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. Cette entité morphologique correspond à une zone de production des sols lors de l'érosion hydrique. L'évolution de la production des sols érodables est liée à plusieurs facteurs comme la pente importante, le terrain dénudé du couvert végétal, le contraste climatique et les manifestations tectoniques.

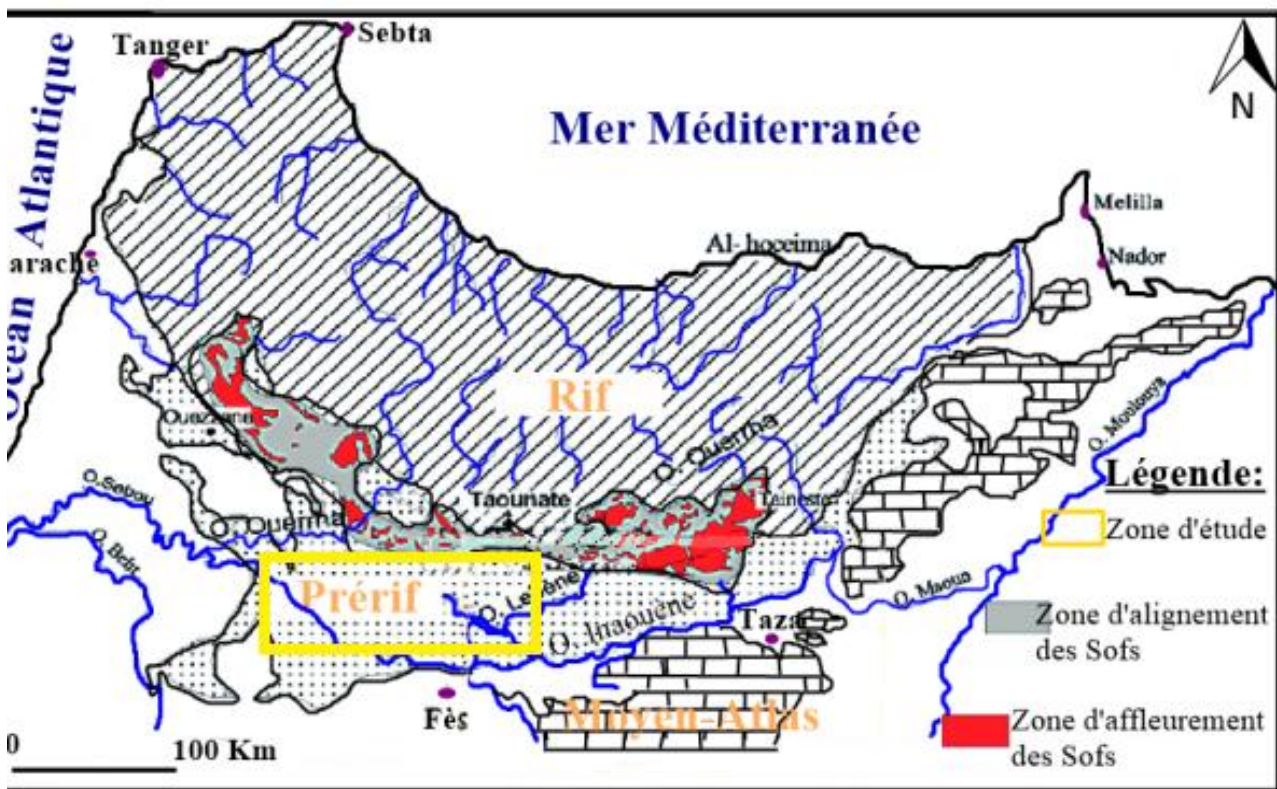


Figure 9 : Zones de contacts entre le Rif, Prérif et Moyen-Atlas (Gartet et al, 2011,modifié).

2-Contact entre le Prérif et le Moyen-Atlas

Le passage entre le Prérif et le Moyen-Atlas est bien marqué et net (Fig.9). Le Moyen Atlas occupe la rive gauche du bassin versant de l'Oued Joumouaa (zone d'étude). Il est subdivisé en deux parties : le causse moyen-atlasique peu tectonisé qui limite le bassin de Saïs au sud.

Cette bordure septentrionale orientée NE-SW, se relie vers l'est, au niveau du col de Touahar, au front sud du Prérif (Rachid 1997). Elle est représentée par le massif de Tazekka où affleurent le socle paléozoïque et le causse de Tahla. Ces deux unités structurales sont séparées par un accident nommé accident médian moyen-atlasique matérialisé par des failles NE-SW auxquelles s'associent des failles transverses et Est-Ouest. Dans le massif de Tazekka affleure un matériel varié (schistes, grès, pélites et microgranites) dont l'âge s'étend de l'Ordovicien inférieur jusqu'au Dévonien moyen (Sabaoui 1998). Il est caractérisé par des formations essentiellement carbonatés (calcaires et dolomies) (Fig.9). Les carbonates liasiques du causse de Tahla forment un monoclinal penté de 10° à 30° vers le Nord et le Nord-Ouest. Ces carbonates sont transgressés par les dépôts miocènes du Sillon sud-rifain et affectés par des failles subverticales de direction N45 et N130 séparant une multitude de horsts et grabens (Charrière 1990, Sabaoui 1998). Ces formations sont résistantes au risque d'érosion hydrique (Fig.9) et représentent l'origine des matériaux rencontrés dans le lit et les versants de l'Oued Joumouaa. La mise en place du relief au niveau du Moyen-Atlas et son évolution sont liées, principalement comme ailleurs dans l'ensemble de toute la chaîne moyenne-atlasique, aux activités tectoniques et aux processus morphogénétiques Miocène et Plio-Quaternaire (Martin, 1981). L'imagerie satellitaire de terrain permet également de décrire les environnements fluviaux et les processus qui les régissent. Les lits fluviaux sont caractérisés par des différentes formes et peuvent présenter un ou plusieurs chenaux en eau et des différents faciès d'écoulements. Chacun de ces éléments peut être caractérisé de manière individuelle. Il est par exemple possible d'étudier la profondeur des chenaux en eau, de caractériser la granulométrie des bancs de galets ou d'étudier les phénomènes thermiques qui affectent les dynamiques physiques et écologiques du cours d'eau.

III- Le bassin versant de l'Oued Joumouaa, un pays de basses collines

Sur le plan géomorphologique, le bassin versant de l'Oued Joumouaa est l'ensemble morphologique complexe (le Rif au Nord et le Moyen-Atlas au Sud), et la diversité géologique et structurale résultant du contraste entre le Moyen-Atlas et le Prérif (El Fellah, 1983). Il correspond à une dépression allongée selon une direction généralement N-S. Il présente une topographie variable avec un dénivelé important entre 92 et 800 m (Fig.9). Le paysage de ce bassin versant réunit les caractères complexes de trois domaines géographiques : le Rif, le Prérif et le Moyen-Atlas. Cette

dépression est encadrée par deux bordures montagneuses : au Nord le Rif, dont le front sud s'étend sur une région de collines marneuses et argileuses pré-rifaines. Au sud, le Moyen-Atlas se présente en plateaux étagés, les causses, dominés par des chaînes plissées (Martin, 1981). Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est caractérisé par des formations marneuses imperméables plus couvrant la totalité de la surface du bassin. Ces formations lithologiques tendres sont soumises à une forte érosion, contrairement aux formations carbonatées des plateaux de Tahla et de Tazekka (Sibari et al. 2013). Ce bassin est caractérisé par des altitudes assez élevées qui dépassent 800 m occupant la partie Nord du bassin, et les altitudes faibles occupent la région de Ain dorij (Fig.10).

L'évolution du relief du bassin versant est marquée par le changement de faciès des formations et l'apparition des formes topographiques façonnées. Ce façonnement est le témoin du risque d'érosion et dû aux facteurs favorables de leur genèse (contraste climatique de la zone, dégradation du couvert végétal, hydrodynamique du cours d'eau dans les plaines alluviales, morphodynamique du cours d'eau sur les versants (érosion et dépôt) et l'action anthropique). Cette dégradation du couvert végétal, a eu des conséquences géomorphologiques sur l'ensemble du bassin versant dont l'augmentation du ruissellement, l'accélération des processus d'érosion hydrique, les glissements des terrains, les inondations et les crues torrentielles (Benzougagh, 2019).

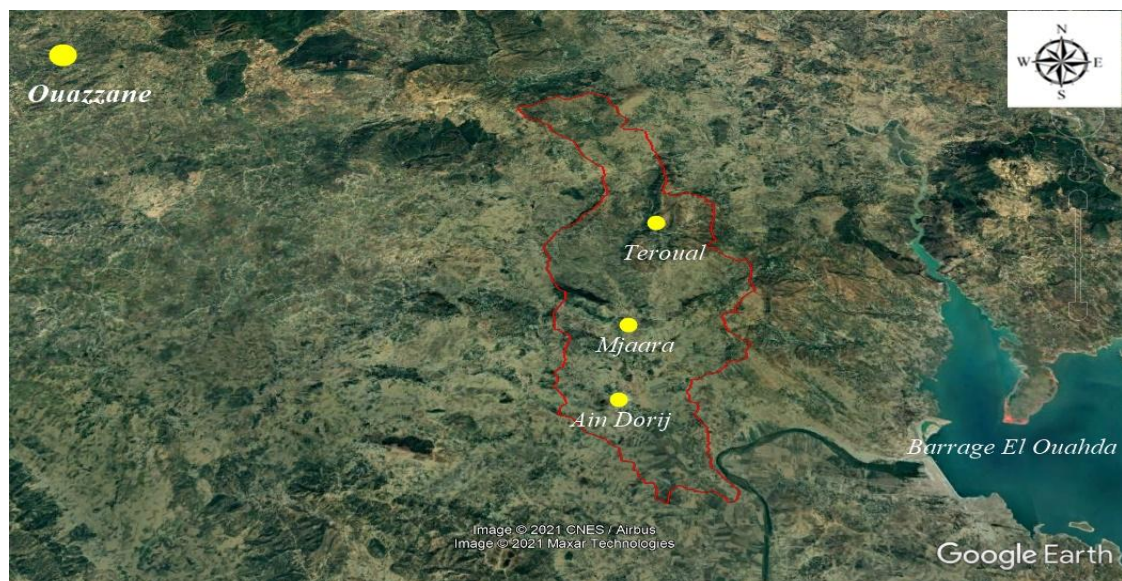


Figure 10: Cadre géomorphologique du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

IV- Contexte hydro-climatique du bassin versant

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est situé dans une région caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride (Fig.12), marqué par un hiver humide et un été chaud et sec. Ce climat est

marqué aussi par de forts contrastes saisonniers et des précipitations très irrégulières qui contribuent à la genèse des risques naturels.

La température moyenne annuelle enregistrée est de l'ordre de 19 °c (à partir 1982/1983).

Les plus fortes valeurs d'humidité sont enregistrées en décembre et janvier (80%), par contre elles ne dépassent pas 55% au mois de juillet et août. L'humidité moyenne annuelle est de 71.7% ce qui permet de classer le climat du bassin de l'Ouergha comme humide. L'évapotranspiration potentielle varie de 22 mm (janvier) à 162 mm (août). L'évapotranspiration mensuelle prend ses valeurs maximales de juin à septembre, alors qu'en décembre et en janvier les valeurs les plus faibles. (Boukrim,2011)

L'indice pluviométrique de Martonne est de l'ordre de 31 et l'indice pluviométrique de Moral est de l'ordre de 1.87 ce qui qualifie le bassin de l'Ouergha de zone subhumide à humide (Boukrim, 2011).

L'indice xérothermique de Gaussen (Fig.11) montre que la période humide s'étend de novembre à mars. Le mois le plus humide est décembre ou l'écart entre les deux pics est maximal (Boukrim ,2011).

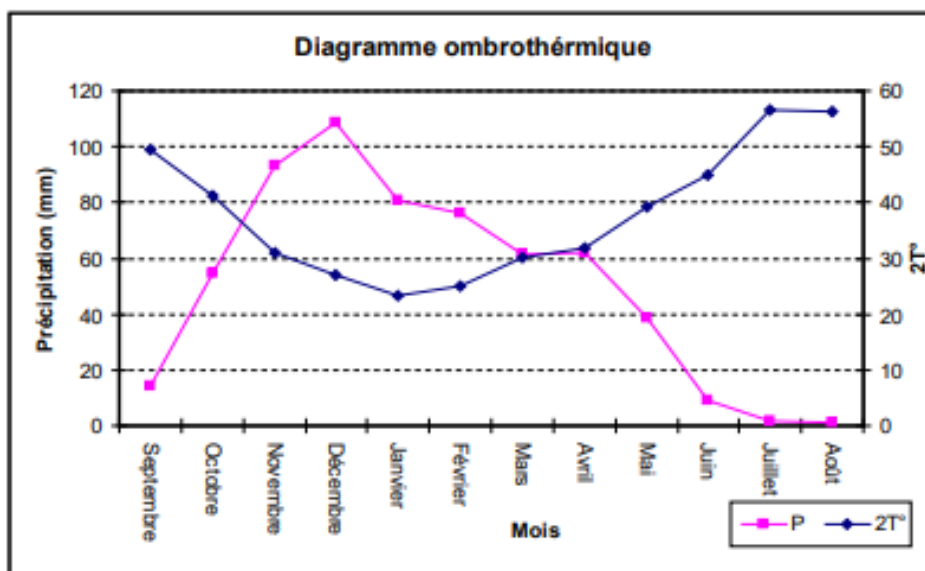


Figure 11: Diagramme Ombrothermique du bassin versant d'Ouergha (Boukrim,2011).

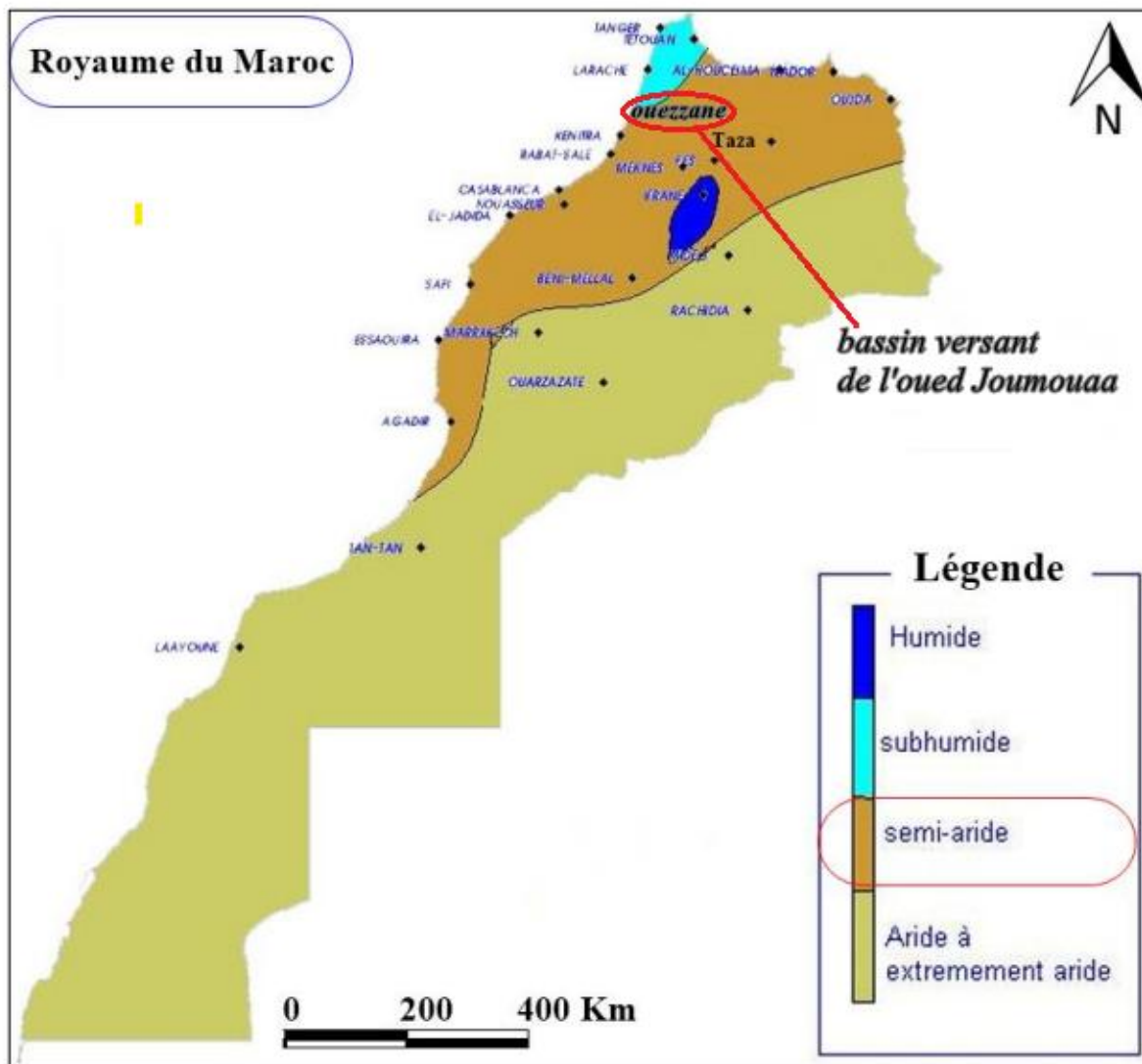


Figure 12: Carte du climat du Maroc. Source :(http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat_maroc).

1-Etude des précipitations

Les précipitations sont toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre sous forme liquide ou solide. Elles se caractérisent par une grande variabilité dans l'espace et dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux. La mesure des précipitations consiste à la détermination de la quantité d'eau tombée en temps donnée sur une surface horizontale donnée. La zone d'étude se situe dans une région qui est caractérisée par une variabilité pluviométrique (Fig.13).

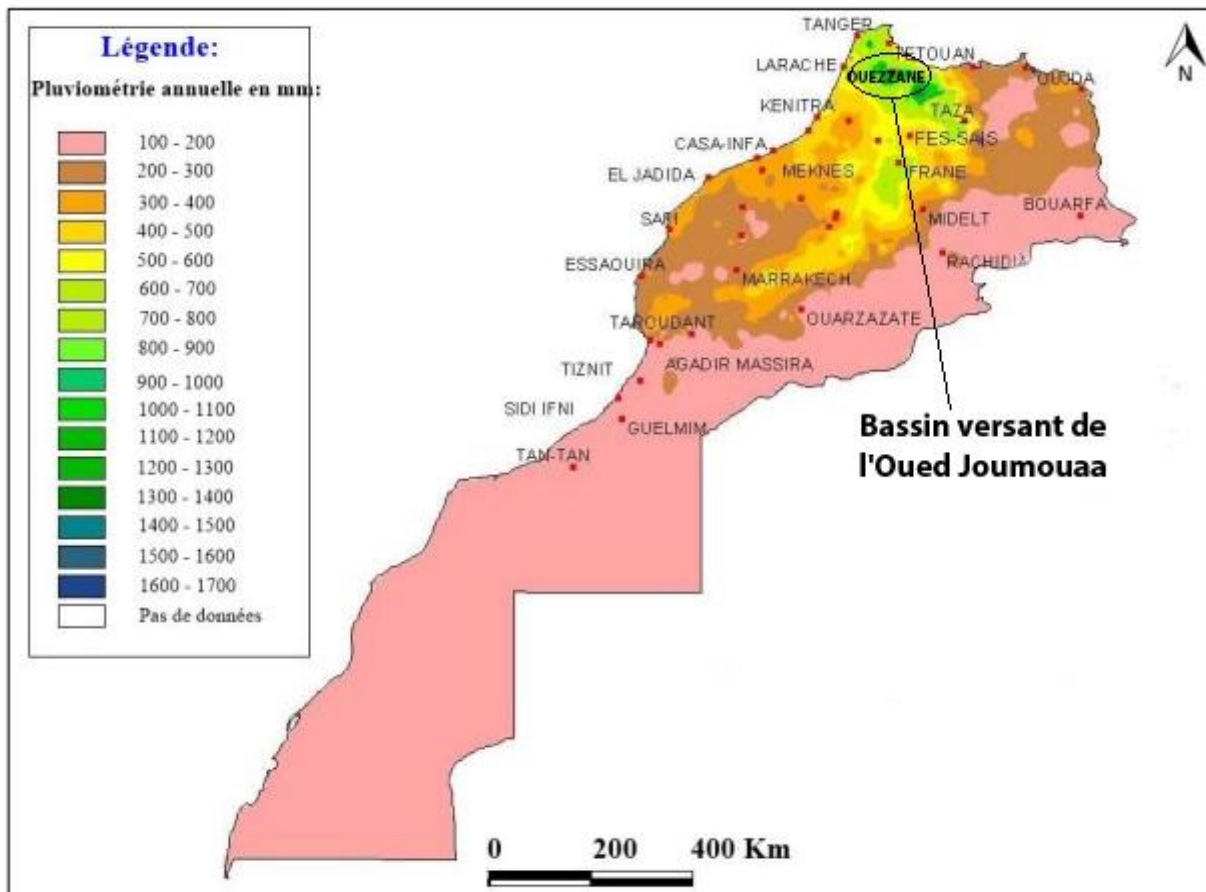


Figure 13: Carte de la Pluviométrie annuelle du Maroc. Source :([http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat Maroc](http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat%20Maroc)).

Conclusion

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa correspond à une dépression allongée selon une direction N-S au sein du Périf occidental, délimité par deux domaines structuraux distincts le Rif au nord et le Moyen-Atlas au sud. L'analyse géomorphologie a permis de mettre en évidence que ce bassin est caractérisé par des altitudes assez élevées qui dépassent 700 m notamment dans sa partie nord, et des altitudes faibles au sud au sein du Ain dorij.

L'évolution du relief est marquée par le changement de faciès lithologiques et l'apparition des formes topographiques façonnées (versants, terrasses alluviales, dépressions, cône de déjection, vallées sèches et les éboulements). Ce façonnement est le témoin du risque d'érosion en rapport avec plusieurs facteurs qui sont : le contraste climatique, l'hydrodynamique du cours d'eau dans les plaines alluviales, la morphodynamique du cours d'eau sur les versants (érosion et dépôt), l'action anthropique et la dégradation du couvert végétal. Ceci serait responsable de l'augmentation du ruissellement, l'accélération des processus d'érosion hydrique, les glissements des terrains, les inondations et les crues torrentielles sur l'ensemble du bassin versant.

Les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'Oued Joumouaa sont étroitement liées à sa position géographique, et à son relief. Il montre une transition climatique entre trois domines structuraux : les collines Préifaines, les montagnes du Rif et de Moyen-Atlas. Les précipitations et les températures connues par leurs irrégularités d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Cette irrégularité est marquée notamment par de fortes variabilités spatiales et temporelles.

Le bassin versant est placé dans un étage bioclimatique semi-aride qui se caractérise par des précipitations abondantes en hiver (saison la plus pluvieuse) et des températures très élevées en été (saison la plus sèche).

L'analyse des températures a permis de mettre en évidence que le mois de décembre est le plus froid, alors que le mois d'Août est le plus chaud avec ces indices climatiques (précipitations & températures) sont corrélés entre eux et contrôlent la nature des phénomènes naturels dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Enfin, on peut déduire que les facteurs climatiques du bassin versant de l'Oued Joumouaa sont favorables pour la genèse des risques naturels (l'érosion hydrique, glissement de terrain.).

***Chapitre III : Essai de quantification de
l'érosion hydrique***

Chapitre III : Essai de quantification de l'érosion hydrique

Introduction

Le phénomène de l'érosion hydrique constitue un risque naturel majeur pour l'environnement, agricole et social qui touche et menace la plupart des pays à l'échelon mondiale (Fig.14). C'est un risque naturel qui résulte des interactions entre plusieurs facteurs dont les principaux sont les précipitations, la lithologie des sols, la pente et l'occupation du sol. Ces éléments agissent sur le comportement hydrologique des sols qui détermine la vitesse et la nature de l'érosion. Ils concernent plusieurs agents comme les agronomes, les forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologues et les socio-économistes.

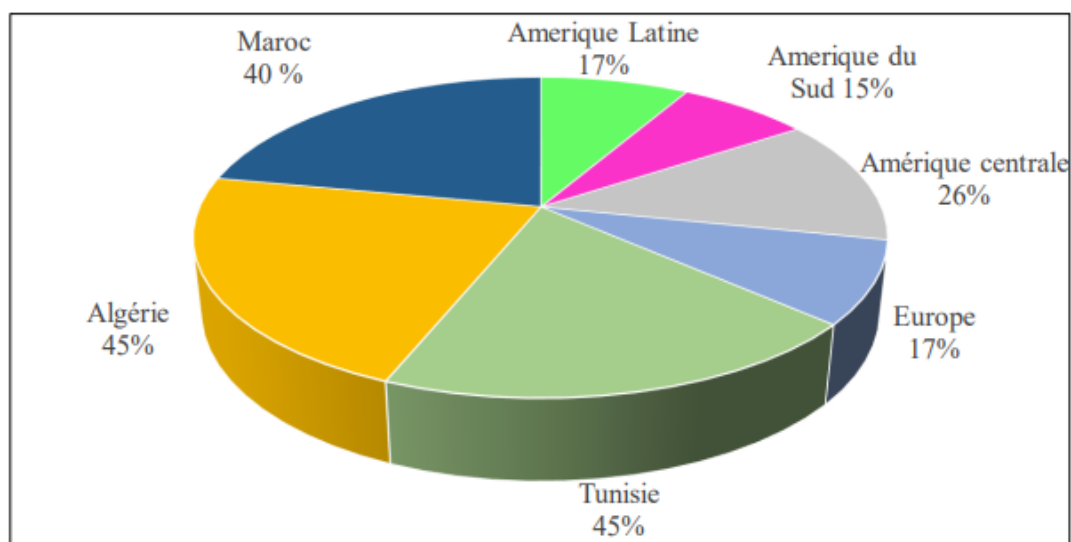


Figure 14: Ampleur du risque d'érosion hydrique à l'échelle mondiale.

Selon l'agence européenne pour l'environnement (AEE) dit que ce phénomène affecte environ 17% de la surface du territoire, l'érosion hydrique touche 15 % du territoire d'Amérique du sud et 26% de l'Amérique centrale (Yousef, 2011).

Les études récentes sur la vulnérabilité au changement climatique dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement à l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (Shabban et al, 1998). Ce fléau est largement répandu dans les pays de la Méditerranée (Bou Kheir, 2001). En Afrique du nord, ce phénomène est également très répandu dans les bassins versants dont la forte dégradation spécifique dépassent 2000T/Km²/an ce qui entraîne un envasement moyenne annuelle de retenue des barrages a raison 125 million de m³ (Remini W & Remini B, 2003). Au Maroc plus de 40 % des terres sont menacées par le risque d'érosion hydrique et la situation continue à se dégrader

(FAO, 1990). L'érosion hydrique qui constitue 75 millions de mètres cube par an et qui limite la durée de vie des barrages. Pour ce faire, 1,5 million d'ha constitue la tranche prioritaire et urgente à traiter d'ici à l'horizon 2020 (Eaux et Forêts, 2007). La dégradation des sols se situe entre 1000 et 2000 T/km²/an dans le Prérif, atteignant 6000 T/km²/an dans certaines régions du Rif. Cette dégradation est par contre moins forte dans les régions du Moyen Atlas 500 à 1000 T/km²/an (Rapport de ABHS, 2011). L'ampleur du phénomène est plus importante dans les collines du Prérif qui ne couvrent que 6 % du territoire Marocain, mais qui produisent 60 % de sédiments au niveau du bassin versant de l'Oued Inaouène (Heush et al, 1970). Cette situation est liée aux changements climatiques à l'échelle globale. Elle est favorisée par plusieurs facteurs, lithologiques (fragilité des terrains), climatiques (forte intensité pluviométrique), géomorphologiques (topographique : les pentes), hydrologiques (réseau hydrologique dense et ramifié) et anthropiques (déforestation, culture sur les pentes, construction des ouvrages d'art, ...), couvert végétal, et socio-économiques, sont toutes favorables à l'accélération du processus de l'érosion. Le bassin versant de l'Oued Joumouaa et ses sous bassins est confronté à un grave problème de dégradation du sol, et une menace pour l'infrastructure hydraulique et hydroagricole, comme pratiquement toute la région du Rif et Prérif. Le terme érosion vient du verbe latin « erodere » qui signifie ronger (FAO, 1990). Elle représente l'ensemble des phénomènes qui contribuent, sous l'action d'un agent climatique, notamment l'eau, à modifier les formes de relief. En réalité, c'est un processus naturel qui certes, écroule toutes les montagnes mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. L'érosion hydrique est un phénomène à l'origine de l'évolution des paysages et de la modification du relief terrestres. C'est aussi l'ensemble des actions chimique et organique qui aboutit à la destruction des roches et au nivellement progressif du terrain plus simplement ; l'érosion est l'usure de la partie superficielle de l'écorce terrestre, l'eau et le vent sont les principaux agents naturels (Greco, 1966).

Il est composé d'un ensemble de processus complexes interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol sous différentes formes. Elle se définit comme la perte de sol par arrachement et transport de la terre vers un lieu de dépôt (Roose, 1977). Le risque d'érosion hydrique est le résultat de l'action associée de plusieurs processus dont le détachement, le transport et le dépôt de particules du sol, sous l'action de la pluie et du ruissellement (Echeverria, 2006). L'érosion est au départ un défaut d'infiltration lié à une dégradation de la surface des sols sous l'action des pluies (Le Bissonnais, 2008). La pluie et le ruissellement agissent sur les sols, générant et exportant les fragments du sol. Au sein des terres agricoles, cette érosion entraîne une dégradation du potentiel de production des sols (Leguedois, 2003). La pluie est reconnue depuis longtemps comme un agent primordial de l'érosion des sols (Ellison, 1944). L'érosion hydrique est

un risque naturel qui affecte l'ensemble de la couverture terrestre géopédologique et c'est l'un des facteurs les plus importants de formation et l'évolution des milieux naturels (Dutil, 1984).

I- Les indicateurs du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant

Dans un bassin versant, les indicateurs du risque de l'érosion hydrique sont basés sur l'analyse des composantes du bassin en question et les enquêtes de terrain ont permis d'identifier les indicateurs suivants (Fig.15) :

- La lithologie des terrains : elle est dominée par des sols peu évolués non climatique d'érosion avec l'alternance des marnes qui occupent la totalité du bassin.
- Le couvert végétal : le couvert végétal dans le bassin est réduit ce qui génère la genèse du risque d'érosion hydrique dans les zones non protégées.
- La pente : la surface du bassin de risque est occupée par des pentes longitudinales en tenant compte de l'effet de la pente qui favorise les ruissellements. Le bassin versant de l'Oued Joumouaa montre une forte susceptibilité à l'érosion.
- Le climat : il est soumis à une variabilité spatiale. Le bassin est caractérisé par un climat semi-aride avec des précipitations irrégulières, et violentes, ce qui favorise l'érosion hydrique.
- L'envasement du barrage : les sols détachés puis transportées par ruissellement ont tendance à se déposer sur les dépressions notamment au niveau du barrage El ouahda.
- L'action anthropique : les cultures humaines ont l'impact sur l'érosion.



Figure 15: Ravins et ravinement généralisés : quelques indicateurs d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa(Teroual), (FARTAS le 22/12/2018).

II- Le seuil tolérable du risque de l'érosion hydrique

On appelle la perte en terre tolérée la perte car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches, le seuil de tolérance dans le domaine de l'érosion hydrique. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de ~ 155 ~ l'épaisseur des sols.

III- Processus de l'érosion hydrique

Le risque de l'érosion hydrique résulte de la combinaison de plusieurs processus au niveau des trois phases successives qui sont le détachement des particules du sol, leur transport et en fin leur sédimentation (Fig.16). Sans oublier qu'il y'a plusieurs types d'érosion : éolienne, chimique,

gravitaire, agraire et hydrique. Mais Le type qui nous intéresse dans cette étude, c'est l'érosion hydrique sur le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

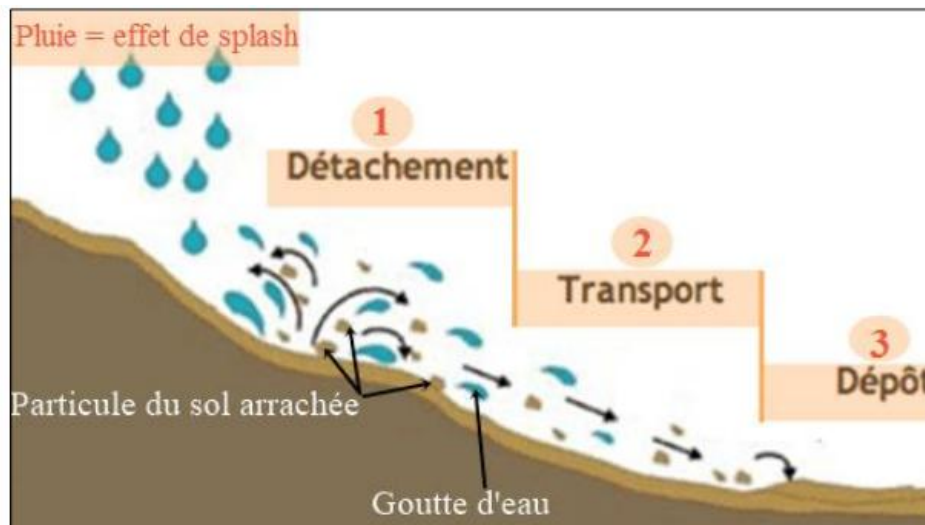


Figure 16: Processus de l'érosion hydrique dans un bassin versant Joumouaa.

L'érosion hydrique se distingue en deux processus : l'érosion de surface et l'érosion en masse et glissement de terrain. L'érosion de surface commence à l'impact de la goutte de pluie qui provoque un détachement des micro-agrégats qui en se redéposant affectent les processus d'infiltration, provoquent le développement de la croûte de battance qui favorise à son tour le ruissellement (Legout et al., 2005).

Le risque d'érosion se développe lorsque les eaux des précipitations, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol c'est ce qu'on appelle un ruissellement Hortonien (Horton, 1933), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe on parle de ruissellement par saturation. Ces deux types de ruissellement naissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une association des deux (Al Ali, 2007 ; Séguis et al, 2002 ; Cros-Cayot, 1996).

1-Détachement des particules

La première phase des processus de l'érosion hydrique est le détachement des particules. Ces derniers se produisent à la surface du sol, sous l'action de pluie, des agrégats s'éclaboussent ou lorsque la force de cisaillement du ruissellement devient supérieure à la résistance au détachement du sol

(LTHE, 2007) au détachement. Donc la pluie et le ruissellement sont les deux mécanismes qui résultent du détachement des particules du sol.

- Détachement par la pluie : les gouttes de pluie ont l'effet de véritables petites bombes. Chaque goutte qui tombe est érosive. Sa force brise les agrégats et disperse les particules du sol. On appelle ce phénomène l'effet de Splash. Les particules deviennent facilement transportées sous l'effet de la pluie pour se déposer loin.

Les caractéristiques du sol : texture, taux de matière organique, état de surface et de l'humidité du sol influencent directement sur l'importance du Splash.

Il faut noter que toutes les pluies n'ont pas la même force érosive. Ainsi, on note que l'intensité d'une pluie est un facteur important. En effet, une faible pluie pendant une longue durée aura peu d'impact qu'une forte pluie de quelques instants.

2- Détachement par ruissellement

L'érosion par le ruissellement est faite en deux niveaux distincts : d'une part, il y'a l'érosion due à l'écoulement en nappe sur les versants et d'autre part il y'a l'érosion due à la concentration des écoulements dans les ruisseaux et dans les ravines (Borges, 1993). Le ruissellement a une forte relation à la circulation de l'eau à la surface du sol. Il peut se produire dans plusieurs cas. Lorsque le sol est saturé d'eau, l'eau ne peut plus s'y infiltrer et va donc ruisseler à la surface. Au lors d'une pluie, les gouttes de pluie influe sur le sol. Le ruissellement peut à son tour éroder le sol. En effet, la vitesse d'écoulement de l'eau agit comme une force qui arrache les particules du sol.

3-Transport des particules

Les particules issues de la dissociation sont ultérieurement déplacées vers l'aval sous l'action de la gravité. C'est ce qu'on appelle le transport des particules, une deuxième phase des processus de l'érosion hydrique. On distingue entre deux types de particules : les grossiers et les fines. Les premières comme les cailloux d'éboulis, les blocs d'éboulement, tombent directement. Alors les seconds, sont transportés sur de longues distances même lorsque les vitesses de ruissellement sont faibles. A noter que les moyens éléments à grossiers (limons grossiers et sables) sont véhiculés par saltation et/ou reptation et constituent le charriage de fond (Mounirou, 2012).

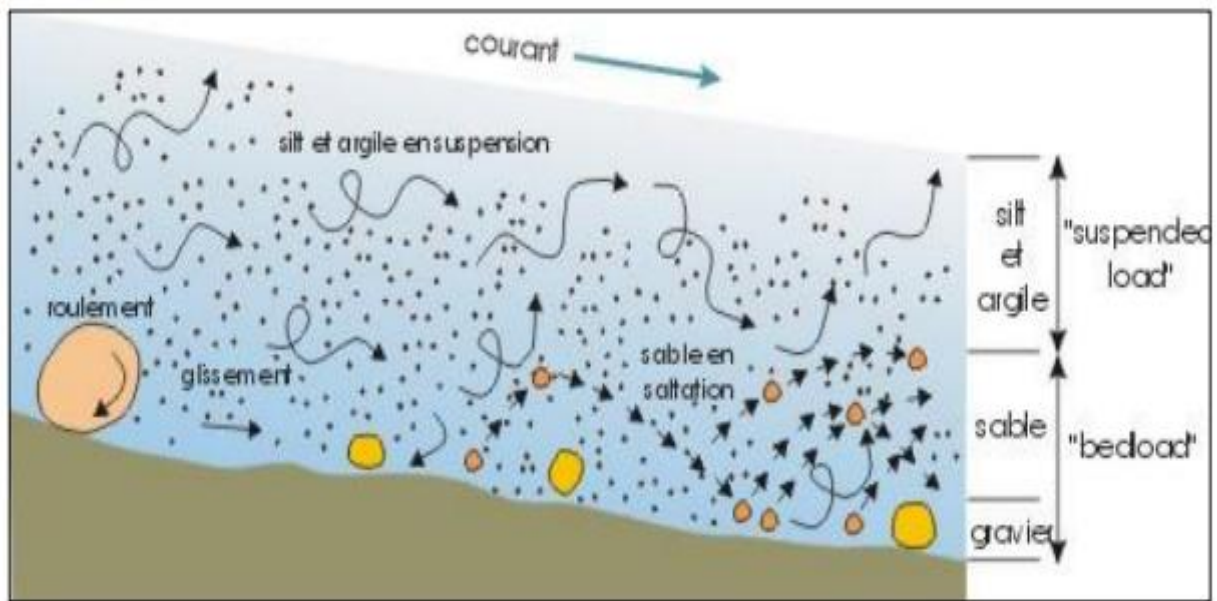


Figure 17: Processus de transport des particules érodées (dans un cours d'eau).

4-Dépôt des particules

La dernière phase des processus de l'érosion hydrique s'appelle le dépôt ou sédimentation. Il s'effectue lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement, diminue ou s'annule (Demangeot, 2009). Le dépôt des matériaux véhiculés s'effectue au fur et à mesure que la vitesse de ruissellement décroît. Ils sont déposés dans l'ordre suivant : les matériaux grossiers sont déposés les premiers, puis les sédiments moyens et enfin les particules fines.

IV- Facteur d'érosion hydrique dans le bassin versant Oued Joumouaa

L'eau est à l'origine du risque de l'érosion hydrique. Il est le résultat d'un processus complexe dont plusieurs variables contribuent à la perte du sol. On distingue deux principaux types de facteurs d'érosion hydrique, dans lesquels interviennent plusieurs variables contribuant à la perte du sol. Dans la littérature on différencie deux principaux types de facteurs d'érosion hydrique sont évoqués : facteurs naturels et anthropiques (Fig.18). Ces facteurs d'érosion influencent l'intensité des processus de détachement, de transport et de dépôt, ainsi ils influencent les formes et types d'érosion.

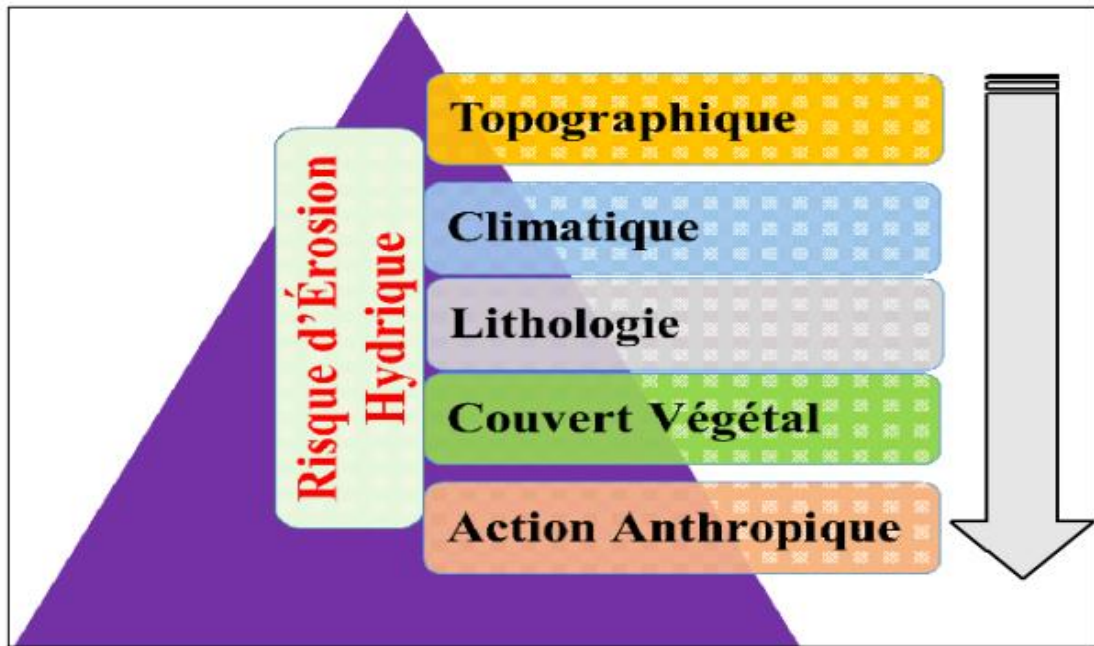


Figure 18: Facteurs responsables de la genèse des risques d'érosion hydrique dans un bassin versant (Benzougagh, 2019).

1-Facteurs naturels

Les particules sédimentaires sont constamment soit érodées, soit déplacées ou déposées selon les interactions des caractéristiques du bassin versant déterminées par les processus d'érosion, les paramètres climatiques, les facteurs géologiques, topographiques et pédologiques, par le couvert végétal et l'occupation des sols.

1-1 Facteur climatique

Le climat est un facteur primordial de l'érosion hydrique. L'intensité et la hauteur de précipitation, les changements des températures ainsi que le vent ont des effets prépondérants sur la désintégration de la roche. Par ailleurs les variations saisonnières des orages, leur fréquence, leur localisation et le régime des vents exercent une influence sur l'érosion des sols. Le Maroc appartient du point de vue climatique à la zone méditerranéenne qui caractérise par des précipitations limitées et irrégulières, des orages violents de courtes durées et de fortes intensités (Zahar, 1997). Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est caractérisé par un climat semi-aride qui constitue une source d'énergie érosive, et une zone vulnérable au risque d'érosion hydrique.

1-2 La topographie collinaire favorise l'écoulement

Plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'effet de la topographie sur l'érosion hydrique. Nombreux sont ceux qui ont montré que la topographie agit sur le ruissellement et les pertes en sol par deux composantes (Borst et Woodbrun, 1940 ; Wischmeier et Smith, 1978), la longueur de la pente car plus la pente est longue, plus les eaux ont tendance à se concentrer graduellement dans les fissures ou rainures, ce qui entraîne un apport considérable en eau et en sédiments. Le degré de la pente car plus le degré de l'inclinaison des versants est important, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et le détachement des particules du sol sont importantes. Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, sur les pentes fortes l'eau de pluie ruisselle vite et cause une érosion grave. L'augmentation de la pente développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe (Roose, 1993). Les effets de longueur de pente sur les risques d'érosion hydrique sont considérables, si bien que les eaux de ruissellement ont tendance à s'accumuler sur une pente longue, le temps d'absorption par le sol est plus grand, l'écoulement prend de la vitesse et de l'énergie et l'érosion s'intensifie (Megnounif, 2007).

1-3 Formations de marnes imperméables

La nature géologique des terrains notamment la lithologie influence le processus d'érosion hydrique dans le bassin versant. On se basant sur les résultats d'une étude réalisée à l'échelle du Maroc (Lahlou, 1986), pour déterminer les dégradations spécifiques potentielles érosifs des différentes natures de lithologie (Tab.1) : I, J et K exprimée en t/km²/an. Les sols se caractérisent par leur vulnérabilité à l'érosion (érodabilité). L'érodabilité d'un sol représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent sous l'action des gouttes de pluies et/ou de l'écoulement (Le Bissonnais et al. 2002) L'érodabilité est définie par deux caractéristiques principales : la résistance au splash (déplacement local des particules du sol sous l'impact des gouttes de pluie, et la résistance au cisaillement (lié au ruissellement). La sensibilité d'un sol à l'érosion est en fonction de plusieurs paramètres qui sont la capacité d'infiltration, la stabilité structurale, la texture et la teneur en matière organique.

Tableau 1: Dégradations spécifiques potentielles érosifs d'un bassin versant en fonction de la nature lithologique (Benzougagh,2019).

| Type de lithologie | Degré d'érodabilité | Nature de lithologie | Potentiel érosif t/km ² /an |
|------------------------------------|--|--|--|
| Formations lithologiques de type I | Formations à fort taux d'érodabilité. | Marnes, schistes, limons et flyschs. | $D = 17 \times 10^3 \times A^{-0,329}$ |
| Formations lithologiques de type J | Formations à taux d'érodabilité moyenne. | Calcaires, marno-calcaires et shales-calcaires | $D = 7 \times 10^2 \times A^{0,012}$ |
| Formations lithologiques de type K | Formations à faible taux d'érodabilité. | Grès, marno-gréseuse, quartzites, granites et pélites. | $D = 5 \times 10^2 \times A^{-0,026}$ |

1-4 Facteur pédologique

Les principales caractéristiques des sols qui permettent de déterminer le degré de sensibilité à l'érosion hydrique sont les suivantes : la profondeur, la porosité, la granulométrie, la teneur en matière organique (Roose, 1993 ; FAO, 1996), la nature minéralogique des argiles (Auzet, 1987 ; Le Bissonnais et al, 1995), l'infiltrabilité (Papy et al ,1995) et la cohésion (Mériaux ,1961). Les sols méditerranéens à texture limoneuse sont parmi les plus sensibles à l'érosion hydrique (Osborn et al,1976 ; Poesen,1983), et cela malgré leur forte capacité de rétention en eau liée à la distribution favorable de leur porosité. De même les conditions climatiques en méditerranée engendrent une teneur en matière organique relativement faible ce qui augmente la susceptibilité à l'érosion hydrique (Ryan,1982 ; Ozden et Sonmez ,1998). Tous les chercheurs ont mis en évidence les trois propriétés essentielles des sols pour déterminer le degré de l'érodabilité : la teneur en limon et en argile, la matière organique qui assure la cohésion du sol et les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion du sol.

1-5 L'occupation du sol se résume dans un espace cultivé

L'un des facteurs du risque d'érosion hydrique est Le facteur d'occupation du sol. Il détient de l'influence directe l'écoulement par conséquent sur l'érosion hydrique. La végétation vivante

protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie, et donc du détachement par le splash. Les tiges et les troncs forment des obstacles qui ralentissent la vitesse du ruissellement, ce qui réduit le détachement par le ruissellement ainsi que sa capacité de transport. Les racines forment un réseau près de la surface qui tient le sol en place, augmentant ainsi sa résistance au détachement. Les feuilles mortes et débris végétaux protègent la surface de l'impact des gouttes, ralentissent le ruissellement, et ajoutent de la matière organique au sol, ce qui le rend plus résistant à l'érosion hydrique.

1-6 Le couvert végétal est menacé et dégradé

Un couvert végétal limite l'érosion hydrique en dissipant l'énergie de la pluie, favorise l'infiltration et s'oppose à toutes formes d'érosion, que ce soit celle de l'eau, celle de vent ou celle due à la gravité. La couverture végétale contribue à réduire plus de 50% l'énergie cinétique de la pluviométrie, et à atténuer 75% de la puissance du ruissellement (Martinez Mena et al ,1999 ; Rachman et al. ,2003). Les végétaux permettent également de diminuer l'effet du vent sur la mobilisation des sédiments érodés (Morgan, 1990). La production de matière organique par la biomasse en milieu méditerranéen aride est très réduite, ce qui rend les terres très susceptibles à l'érosion hydrique (Thomes, 1995).

1-7 Facteurs anthropiques

Parmi les causes d'une grave érosion, on peut citer Les pratiques culturales, la pression démographique, et le régime foncier. Le risque d'érosion est devenu principalement un résultat direct de l'activité humaine qui représente maintenant un facteur de dégradation des sols. En effet, La pression démographique constitue la source dû à la naissance et de l'accélération de l'érosion par ses pratiques inadaptées sur les versants, ses actions de déboisement puis de défrichement des forêts, ses incendies et surpâturages et techniques culturales. Le sol est donc constamment mis à nu et fragilisé par les labours et les sarclages successifs. Les cultures vivrières sont beaucoup moins efficaces que les formations naturelles qu'elles remplacent après défrichement. De même, les aménagements urbains augmentent les surfaces imperméables ce qui favorise l'intensité du ruissellement, et contribuent par la suite à l'entraînement du sol.

V- Formes d'érosions hydriques

Il existe plusieurs formes d'érosion hydrique : érosion en nappe, érosion en rigole, érosion linéaire, érosion par ravinement, érosion en masse et érosion par sapement des berges.

1- Érosion en nappe ou érosion diffuse

L'érosion en nappe est le premier stade de la dégradation des sols sous l'effet de l'érosion hydrique. Elle cause la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. De ce fait, elle est peu visible d'une année à l'autre. Cette forme est très observée sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer. Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en sont : l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décupés et la remontée des cailloux à la surface du sol. Il s'agit d'une fonte de l'horizon humifère superficiel combiné à la remontée en surface des cailloux par un travail profond du sol. Cette situation peut, par conséquent, causer des problèmes de recolonisation végétale des milieux dégradés (Sherbrooke, 1999). L'importance de l'érosion en nappe dépend de de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement, de l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer et de la durée des pluies et de l'humidité du sol avant les pluies (Mokhtari, 2009 et 2017).

L'érosion en nappe (érosion diffuse) transporte les particules du sol à courte distance par effet de splash et à plus longue distance par le ruissellement en nappe (Roose, 1994). La battance des gouttes de pluies envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions (éclaboussure) à partir des points d'impact au sol des gouttes de pluie. En fait, ce n'est qu'après la formation des flaques et le débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étale à la surface du sol et conserve une vitesse faible, même sur des pentes de 5 à 10 %, à cause de la rugosité du sol, qui l'empêche de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde. Au-delà de 25 cm/seconde, le ruissellement peut transporter des sédiments fins et attaquer le sol et creuser des rigoles hiérarchisées où la vitesse de l'eau augmente rapidement. Les conséquences de l'érosion en nappe sont : Le nivellement de la surface du sol, la squelettisation des horizons superficiels, le décapage entraînant l'apparition de taches claires.

2- Érosion linéaire

Lorsque l'intensité des pluies devient beaucoup plus élevée que la capacité d'infiltration de la surface du sol, elle compose les flaques, qui communiquent par des filets d'eau. Lorsque ces filets d'eau atteignent une certaine vitesse de 25 à 50 cm/s (Hjulström, 1935), ils possèdent une énergie

propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace au niveau de lignes d'écoulement. Ainsi, lorsque le ruissellement est également concentré, la vitesse augmente et donc l'érosion n'est plus sélective et creuse des rigoles (Fig, 19).



Figure 19: Erosion pelliculaire du bassin versant de l'Oued Joumouaa (Ain Dorij), (FARTAS le 22/12/2018).

L'érosion linéaire est un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et a pris une énergie cinétique capable d'éroder le sol à un rythme plus rapide que l'érosion en nappe (Blanco & Lal, 2008). L'érosion linéaire cause un décapage total de l'horizon humifère et de l'ensemble des matériaux meubles sur la largeur concernée par les chemins de l'eau. L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes (Fig.19) et dimensions on parle des griffes, rigoles, ravines, etc.. Après, l'érosion en nappe voit l'érosion en rigoles.

3- Érosion en rigole

L'érosion en rigoles se trouve généralement dans les régions aux conditions pluviométriques et topographiques modérées, mises en valeur de façon intensive par des systèmes d'agriculture à base

de plantes annuelles (Monnier et Boiffin, 1986). Ces conditions sont propices dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa, par conséquent l'érosion en rigole est généralisée dans tout le bassin (Fig.20).



Figure 20: Erosion en rigole sur le flanc des collines dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa (Teroual), (FARTAS, 2018).

4- Érosion par ravinement

Les ravins suivent la ligne de plus grande pente des versants. Puisque le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80% durant les averses exceptionnelles tombant sur les terres battus ou compactées (Fig.21), l'essentiel du transport solide provient des ravines et des Oueds (Heush, 1970). Les formes de ravinement peuvent être observées suite au surcreusement des rigoles ou lorsque plusieurs rigoles se réunissent pour former un seul canal plus large et plus profond. Le ravinement est souvent la principale source de sédiments dans les cours d'eau (De Vente et al., 2005). En effet, une pluie importante peut transformer une petite rigole en un ravin considérable en quelques heures. Lorsque le ravinement est enclenché, il est très difficile de l'empêcher de s'agrandir et les correctifs peuvent être coûteux. Gray et al., (1982) précisent cependant que si le

ravinement est plus spectaculaire et plus difficile à contrôler, l'érosion en rigoles demeure plus néfaste en termes de quantité de sédiments transportés.

On parle de ravinement généralisé ou badlands lorsque l'approfondissement des ravins remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands" (Fig.21). Ce terme géomorphologique est employé pour caractériser des zones érodées, montrant une dissection très accentuée du relief et qui sont la source de sédiments.



Figure 21: Formation de "badlands" par érosion régressive dans les marnes miocènes (Teroual), (FARTAS, 2018)

5- Érosion en masse

L'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. L'érosion en masse marquent souvent une évolution très avancée, voire irréversible, en effet, ils sont particulièrement fréquents dans les terrains marneux et argileux très humides. Les formes d'érosion en masse sont très répandues dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa. Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux mais on peut les regrouper en six groupes principaux (Roose, 1994).

5-1- Glissements de terrain

5-1-1- Glissements lents

C'est un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans dislocation, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes. (Moeyersons, 1989).

5-1-2- Glissements rapides

Les glissements de terrain en planches 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. Ce phénomène est très courant sur les schistes dont le pendage est parallèle à la topographie (pendage conforme) sur les gneiss et sur les marnes en voie d'altération.

5-1-3- Glissements rotationnels

C'est un glissement où la surface du sol est une partie de la masse glissant en faisant une rotation (Fig.22). Il s'agit d'un mouvement caractérisé par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal plus ou moins marqué ; le changement interne dépend de la nature des terrains et de l'importance du déplacement. Il se produit en particulier en terrains meubles dans les roches homogènes à faible cohésion ou très divisées (Benzougagh, 2019).

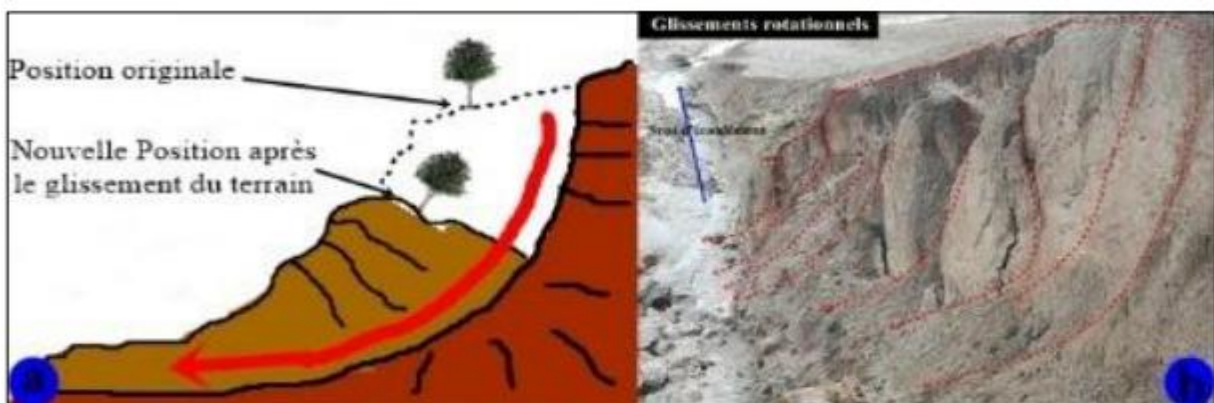


Figure 22: Glissement rotationnel : a : Schéma générale ; b : glissement rotationnel dans le bassin versant de l'Oued Inaouène (Benzougagh 2019).

5-1-4-Coulées boueuses

On considère une coulée boueuse comme étant un écoulement fortement chargé en sédiments, provenant des surfaces cultivées et entraînant des particules de sol (Le Bissonnais et al., 2002). La teneur en eau des coulées boueuses est supérieure à celle des glissements de terrain, moins compactes que les glissements, les coulées de boue se déplacent plus rapidement vers l'aval et peuvent donc avoir des conséquences dévastatrices subites. Sur les bords de la coulée, la vitesse de glissement est moindre, ce qui entraîne parfois la formation de petites levées. Parvenue au bas de la pente, la coulée de boue ralentit sa course et s'étale dans le sens de la largeur avant de s'immobiliser.

5.2- Éboulements

Ils entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine : ils enlèvent l'éboulement de la partie supérieure d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. Les éboulements sont des effondrements de masses rocheuses (Fig.23) et ont des mouvements rapides, brutaux et discontinus et résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que grès, calcaires, roches cristallines.

Ces glissements se produisent par basculement, rupture de pied, glissement banc sur banc, à partir de falaises, escarpements rocheux, formations meubles (marnes imperméables), blocs provisoirement immobilisés dans une pente.



Figure 23: Erosion remontante par ravinement au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa (FARTAS, 2019).

6-Érosion par sapement des berges

Elle due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et les rivières. L'énergie de ces dernières régulière ou accidentelle d'emporter une partie des berges, on appelle ce processus le sapement des berges. Tout comme les confluences, les berges de cours d'eau sont des zones où le risque d'érosion hydrique est élevé, en raison de la concentration du ruissellement et de la différence d'élévation entre les champs et les cours d'eau. Elle résulte de l'attaque par l'eau des matériaux du sol au niveau des berges et du lit d'Oued (Fig.24). Ces eaux de pluie provoquent une chute en une masse des sols importants et un recul des rives. Les zones de sapement et de déposition de sédiments dans les cours d'eau sont facilement repérables et permettent d'identifier les sections à stabiliser.



Figure 24 : Érosion par sapement des berges du cours d'eau de l'Oued Joumouaa (FARTAS, 2019).

VI- Évolution de l'érosion hydrique

IL est difficile de quantifier l'évolution de l'érosion hydrique dans le temps et l'espace. Elle est mesurée directement sur le terrain ou elle est estimée suivante des analyses des sols ou des modèles physiques ou empiriques qui tiennent compte de l'impact de toutes les variables de l'érosion hydrique (Cheggour, 2008). Elle est liée à l'influence directe de la pente et de la lithologie sur la nature des processus morphogénétiques des versants. Ceci a été démontré par plusieurs auteurs dans différents pays. En effet, ces deux facteurs sont directement liés à la dynamique des milieux, car ils entrent en action comme facteurs primordiaux pour expliquer certaines formes d'érosion (Merzouk et al.1996). Selon ces facteurs et d'autre l'évolution de l'érosion hydrique allant de faible ou nulle jusqu'à érosion très grave.

-Érosion faible ou nulle : on appelle aussi érosion non apparente c'est-à-dire pas d'érosion visible sur le terrain. Ce type d'érosion est observé dans des sites protégés par un couvert végétal.

- Érosion moyenne : ce type d'érosion est appelé érosion en nappe dans le décapage est lent avec ruissellement diffus. On rencontre des formes des rigoles et ravinements superficiels sur versants.
- Érosion grave : ce type est caractérisé par de mouvement de masse, solifluxion avec niche d'arrachement, sur matériel hétérogène. Éboulement ou épandage pierreux, sur versant et en fin on trouve des importants sapements de berge localisé.
- Érosion très grave : on a deux types érosion très grave localisée et généralisée. Pour le type localisé est caractérisé par des incisions linéaires (ravins moyennement profonds à fond étroit et à évolution linéaire ; ravins à évolution latéral en forme de sapement et ravins profonds avec tassement des bordures). Pour le type généralisé est caractérisé par des badlands (ravinement généralisé et concentré sur matériel tendre ou moyennement dur).

1- Ordres de grandeurs de pertes de sol par type d'érosion

Le tableau suivant (Tab.2) montre l'importance des pertes en sols par type d'érosion hydrique, récapitule les ordres de grandeurs rencontrés dans la littérature. Signalons qu'une simple rigole de 2 cm de profondeur et 5 cm de large, créée pendant un orage, correspond à une perte en sols de 120 kg/100 m de rigole (Benzougagh, 2019).

Tableau 2: L'importance des pertes en sols par type d'érosion (Benzougagh, 2019)

| Type d'érosion hydrique | Taux de perte en sol (t/ha/an) | Extension |
|-------------------------|--------------------------------|-------------|
| Érosion en nappe | 1 | Généralisée |
| Érosion en rigole | 10 – 50 | Localisée |
| Érosion ravine | 100 - 250 | Localisée |
| Érosion en badlands | 1000 | Généralisée |
| Sapement des berges | 10 000 | Localisée |

2-Forme d'accumulation de l'érosion hydrique

La cause de la sédimentation est une diminution plus ou moins progressive de la capacité de transport du ruissellement liée à celle de la vitesse de celui-ci, c'est-à-dire à la fin de l'alimentation en eau, la rencontre d'un obstacle ou aux ruptures de pente.

Il y a dépôt selon les lois de la sédimentation en milieu liquide. L'endroit peut être proche (dépôts locaux), ou très éloigné (dépôts à l'aval). Les produits les plus lourds se déposent les premiers le plus près de leur point de départ et inversement pour les plus légers. Lorsque les particules arrachées arrivent dans des pentes plus faibles, les matériaux lourds (cailloux graviers, sables) se déposent dans le lit des cours d'eau, en arrière des barrages, sur les terres basses fertiles. Les particules fines sont entraînées jusqu'à la mer ou se déposent en partie dans les deltas des fleuves (Hennebert, 1992).

VII- Conséquence d'érosion hydrique dans un bassin versant

L'érosion hydrique cause des dégâts aux terres agricoles, et entraîne aussi une dégradation de la qualité des eaux en déplaçant de sédiments. Les dégâts générés par l'érosion hydrique dans une zone agricole, le premier problème est celui de pertes en sols provoquant par la suite l'envasement des barrages et leur confère une durée de vie limitée. Différentes études réalisées dans la ceinture de Méditerranée ont permis d'évaluer les pertes annuelles en terre :

-Au Maroc une étude conduite, sur le bassin versant de l'Oued Martil d'une superficie d'ordre de 1129 km². La dégradation spécifique des terres y est très élevée 2400 à 5000 tonnes/km²/an, contribuant ainsi à l'envasement précoce des retenues des grands barrages et le rythme des études de diagnostic sur la dégradation des bassins versants n'a pas suivi celui de la dégradation des terres en amont, de l'envasement des barrages en aval (El ouadini et al., 2001).

-En Tunisie une étude a été réalisée à l'exutoire d'un bassin versant de 541 ha situé dans la Dorsale tunisienne, une sédimentation moyenne a été évaluée à 24 tonnes/ha/an en 1996 et 25,6 tonnes/ha/an en 1998 (Benchikha, 2010). Une autre étude a été effectuée également en Tunisie, où les scientifiques ont analysé l'évolution du ravinement dans deux bassins versants : Oueds Rmel et El Hammam ayant des superficies respectives de 1534 ha et 198 ha. Les résultats ont permis d'identifier une densité du ravinement dans le premier bassin est d'ordre de 132,4 m/ha et dans le deuxième, varie entre 273,8 m/ha et 594,2 m/ha, Cela a permis de comprendre l'accroissement de formation de badlands et la réduction de la superficie des terres cultivables dans les deux bassins (Bouchnak et al., 2004).

-En Algérie, l'envasement des barrages, l'affouillement et le comblement des lits d'Oueds sont spectaculaires. La vitesse de colmatage des ouvrages d'art est variable d'un barrage à un autre selon la force de l'érosion et de la lame ruisselée.

-En Turquie, qui connaît des zones humides et des zones sèches, en plus d'un climat acceptant la culture de toutes sortes de plantes, le pays se trouve sur des sols très sensibles à l'érosion hydrique. À cause de la dégradation des sols, d'après les mesures faites, la quantité de sédiments dû à l'érosion hydrique et transportés par les cours d'eau est d'ordre de 500 millions tonnes /an pour toute la Turquie. Selon les données de 26 bassins des cours d'eau existant, la teneur en sédiments de la surface unitaire est d'ordre de 626 tonnes/an/km (Dogan, 1992).

-En Italie, selon le programme d'actions prioritaires du 1998 montrent que l'érosion spécifique moyenne de 0,15 mm/an, la plus élevée étant dans les bassins de Marecchia et Savio (tous les deux en Emilie-Romagne), avec une perte annuelle en sol d'ordre de 1,4 mm (environ 23 tonnes/ha/an). Selon les résultats des travaux mentionnés ci-dessus, le taux d'érosion hydrique annuel varie d'un bassin à autre et d'un pays à l'autre et les retenues d'eau continuent à être envasées engendrant de sérieux problèmes à la production agricole. Cependant, le sol étant une ressource non renouvelable, et la perte en sol peut être préjudiciable pour les générations futures. Sur les terres agricoles le ruissellement érosif peut également engendrer des dégâts au niveau des dépressions, des obstacles, ou des pentes. S'il n'y a pas d'érosion, mais seulement du ruissellement, celui-ci entraînera arrêt d'eau dans les dépressions sur des périodes plus ou moins longues susceptibles d'altérer le rendement de cultures. Les dégâts occasionnés sur le territoire agricole sont donc de grande ampleur, car l'effet du ruissellement et de l'érosion hydrique est largement rependu dans la zone méditerranéenne et ont également des incidences négatives sur l'eau souterraine et superficielle.

Les dégâts sur les ressources hydriques

Les inondations dérivent à partir de l'accumulation du ruissellement du territoire agricole, si l'eau est chargée en terre. Ces inondations peuvent être fortes et engendrent plusieurs dégâts matériels. Lors de nombreux épisodes pluvieux, des dépôts de terre se forment sur les routes ce qui nécessite un nettoyage régulier de la voirie, les sédiments ferment également les fossés et réseaux d'évacuation des eaux pluviales ce qui limite leur efficacité. La dégradation de la qualité d'eau est un grand problème auquel est confrontée la population, surtout les scientifiques. En effet, la concentration du ruissellement qui entraîne le déplacement des particules du sol après la dissociation de la structure de l'horizon superficiel et une activité sélective des éléments nutritifs, des colloïdes organiques et minéraux vers nos réserves d'eau, cela engendre de nombreux problèmes de gestion au sens large : gaspillages, traitements aléatoires, pertes, dégradations et manque de protection de la ressource, qui s'ajoutent aux conditions naturelles défavorables. A défaut, la sanction serait la non satisfaction des besoins en eaux potable, d'irrigation et industrielle.

Cette menace est encore plus grave lorsqu'on sait que les zones du méditerranée sud (Maroc, Tunisie et Algérie) disposent actuellement de plus de 230 barrages d'une capacité totale de stockage d'environ 23 milliards m³, l'envasement des retenues (Tab.3), a permis d'évaluer près de 125 millions de m³ la capacité perdue par envasement en moyenne annuelle, dont l'Algérie perd annuellement une capacité totale de stockage des eaux, estimée à 20 millions de m³ (Remini et Remini , 2003), outre les pertes en sol fertiles constatées chaque année au sud et à l'est de la Méditerranée, compte tenu de la croissance démographique, 290 millions de personnes de la population des pays qui se trouveraient en situation de carence d'eau en 2050 (la Fédération des clubs UNESCO-ALECSO de Tunisie (2010).

Tableau 3: Etat des barrages des pays sud de la Méditerranée (Remini et Remini, 2003).

| Pays | Nombre de barrages | Capacité de stockage | Taux d'envasement |
|---------|--------------------|--------------------------------------|---|
| Maroc | 90 | 14 x 10 ⁹ m ³ | 65 x 10 ⁶ m ³ /an |
| Tunisie | 30 | 3,5 x 10 ⁹ m ³ | 30 x 10 ⁶ m ³ /an |
| Algérie | 114 | 5,2 x 10 ⁹ m ³ | 32 x 10 ⁶ m ³ /an |

Selon les travaux de Walling (1984), le Maghreb est considéré comme le plus touché par le problème d'érosion hydrique et d'envasement des barrages en Afrique. Il a lancé une fourchette de l'érosion spécifique de 10 à 50 t/ha/an. Les trois pays du Maghreb sont les plus touchés, dont 61% reviennent au Maroc, 23 % à l'Algérie et 16% à la Tunisie (Remini&Remini, 2003) (Fig.25). Ces barrages enregistrent une perte annuelle dans la capacité est de 125 Hm³ répartie comme suit.

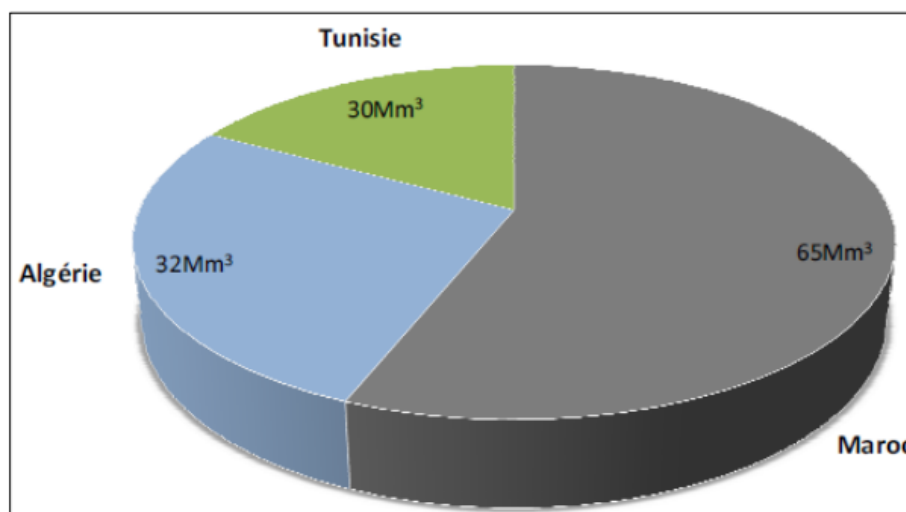


Figure 25: Taux d'envasement des barrages des pays du Maghreb (Remini&Remini 2003).

Le risque d'envasement moyen au Maroc varie entre 0,11% à 1,6% par an suivant les régions (Fox et al, 1997). Selon le rapport des ressources en eau au Maghreb (2009), l'envasement moyen en Algérie est 0,6 % de la capacité de stockage qui disparaît chaque année sous la vase. Ces chiffres sont en augmentation pour atteindre 45 Hm³/an avec un volume envasé global de 1,1 Milliards de m³, ce qui représente 17% du volume total de stockage. Ces valeurs révèlent assez réduites, mais leurs conséquences économiques et aussi environnementales sont étendues, en plus des risques sur la stabilité de l'ouvrage hydraulique et les infrastructures.

Cette situation constitue un facteur augmentant la difficulté d'une appréhension correcte aussi bien des besoins que des différentes projections sur l'avenir. Les données présentées dans cette synthèse indiquent qu'il est désormais impératif que l'aménagement du territoire tienne compte des quantités disponibles afin de rationaliser l'utilisation, la protection de la qualité et la récupération par le recyclage.

Conclusion

L'apparition de l'érosion, au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa, est déterminée par la réunion de plusieurs facteurs et notamment les précipitations, la topographie, la lithologie le couvert végétal, et le type d'utilisation des sols (action anthropique). En effet, il apparaît que les zones les plus touchées par le risque d'érosion hydrique sont les sols situés sur des formations marneuses, sur fortes pentes, sans couvert végétal permanent et en fin lorsque les sols sont soumis à des pratiques culturales qui labourent les sols et enlèvent leur protection végétale. Ces conditions se trouvent réunis le plus souvent dans presque tout le bassin versant.

L'arboriculture et notamment l'olivier occupent une partie importante de cet intervalle. L'olivier joue un rôle important dans la protection contre l'érosion hydrique. Ce rôle est différent selon la pente et l'âge des oliviers. L'olivier se trouve dans des situations très variables en raison notamment de son âge et du degré de pente où il est planté. A cause de la faible densité de plantation des oliviers et de leur faible croissance, la protection offerte par le couvert des oliviers est très variable.

A cause de cette situation l'érosion sous oliviers peut aller de l'érosion pluviale ou en nappe sous pente modérée et vieille oliveraie à une érosion linéaire dans les situations à pentes fortes et faible couvert du la jeunesse des oliviers. Le type d'occupation des sols demeure donc un facteur intéressant d'apparition des processus érosifs. A l'échelle de la parcelle des mesures effectuées par Heusch (1969) ont démontré que sous forêts la perte en sédiment est nulle alors que sous cultures cette perte est d'ordre de 154 t/km².

***Chapitre IV : Analyse morphométrique
du bassin versant de l'Oued Joumouaa***

Chapitre IV : Analyse morphométrique du bassin versant de l'Oued

Joumouaa

Résumé

Ce chapitre vise à évaluer l'adéquation des paramètres morphométriques (linéaire, de forme et de relief) pour la gestion du bassin versant. Les principaux objectifs de cette étude comprennent l'estimation et la hiérarchisation des sous bassins versants du bassin de l'Oued Joumouaa en utilisant des méthodes fiables. La morphométrie du bassin versant donne image apparente du bassin et également de son évolution. Une analyse morphométrique a été tentée pour priorisation de douze sous bassins versants l'Oued Joumouaa qui est un affluent de l'Oued Ouergha.

Le réseau hydrographique a été divisé en douze sous bassins qui ont été délimités à partir d'un MNT en se basant sur le logiciel open source. Les paramètres suivants ont été calculés pour chaque sous bassin : la longueur de flux (lu) est sa longueur moyenne (Lsm), le rapport de longueur de flux (RI), Constante d'entretien du canal (C), le rapport de bifurcation, la texture de drainage (Dd), la densité de drainage (T), la fréquence de flux (Fs), le taux d'allongement (Re), le rapport de circularité (Rc), le facteur de forme (Ff), le relief et le rapport de relief. En combinant les valeurs de ces paramètres nous avons classé les sous bassins versants en trois classes de priorisation : la classe élevée (SBV02, SBV03, SBV05, SBV08 et SBV10) est susceptible à une érosion maximale du sol, la classe moyenne (SBV04, SBV06, SBV07, SBV09 et SBV12) et la classe faible (SBV01 et SBV11).

Introduction

Le bassin versant est une entité idéale pour la planification et la gestion des ressources en terre et en eau (Gajbhiye et al. 2013). C'est une entité hydrologique naturelle qui permet le ruissellement de surface à un canal, drain, ruisseau ou rivière défini en un point particulier (Chopra et al 2005). La physiographie, le drainage, la géomorphologie, le sol, l'utilisation des terres et l'occupation des sols sont quelques paramètres qui jouent un rôle important dans la planification des bassins versants (Javed et al 2011).

La gestion des bassins versants implique une bonne utilisation des ressources en terre, en eau, en forêt et en sol. Ainsi, une évaluation réaliste du comportement hydrologique d'un bassin versant est importante pour développer une gestion efficace.

L'étude des risques naturels dans un bassin versant exige une bonne compréhension hydrologique, climatique, géologique, écologique, et géomorphologique pour déterminer les facteurs qui agissent sur la naissance des risques naturels (occupation du sol, pente, couvert végétal et réseau hydrographique). Ces facteurs sont nécessaires pour déterminer la priorisation des bassins versants et ainsi organiser un programme pour lutter contre les risques naturels (Benzougagh et al. 2016 & 2017).

La bonne gestion d'un bassin versant et l'étude de la hiérarchisation des sous bassins versants nécessite l'utilisation des techniques des systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles numériques du terrain (MNT) de type SRTM, pour une meilleure évaluation de la zone d'étude en termes de pente, système de drainage, topographie, géomorphologie et la lithologie à partir des cartes géologiques. Ces données ont été utilisées dans l'analyse des paramètres morphométriques du bassin versant et les sous bassins ce qui a permis une priorisation des bassins versants dans le but d'une éventuelle protection contre les risques d'inondation et glissement des terrains.

I-Caractéristiques physiques du bassin versant de l'Oued Joumouaa

1-Forme du bassin

La forme du bassin versant est définie comme étant l'aspect géométrique tel qu'elle est sur un plan horizontal. La forme du bassin influence directement le temps de la réponse du bassin, c'est-à-dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent sur l'hydrogramme de crue (Liamas, 1992).

La forme du bassin versant peut-être déterminée à partir des caractéristiques de forme qui sont calculées à partir de l'indice de Gravelius ou de compacité KG et du rectangle équivalent. Elle a un effet sur l'écoulement et par conséquent l'influence sur l'allure d'hydrogramme résultant d'une crue.

1-1-l'indice de compacité ou de Gravius KG

L'étude des paramètres géométriques, dite aussi orométrie, vise à donner une expression quantitative du relief. La morphométrie vise à analyser plusieurs indices (forme, périmètre, surface,) plus au moins pertinents (André /Christophe, 2003).

Dans la littérature plusieurs indices de forme proposés pour comparer les bassins versants et estimer certains caractéristiques hydrologiques (Boughalem, 2013). Le principal indice de référence est celui de compacité dit aussi L'indice de Gravelius (1914). Ce dernier est défini comme étant le rapport du périmètre du bassin et celui d'un cercle de la même surface que le bassin. Il est exprimé par la formule suivante (Roche, 1963).

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{\pi} \cdot A} = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

KG : Coefficient de compacité de Gravelius,

P : périmètre du bassin versant en Km ;

A : surface du bassin versant en Km² ;

π : constant ~ 3,14.

Plus le coefficient est proche de 1 plus le bassin versant sera circulaire, et donc le temps de circulation des eaux sera court. Elle sera allongée dans le cas contraire. Un bassin versant circulaire est mieux draine qu'un bassin allongé.

La surface (**A**) du bassin versant d l'Oued Joumouaa calculée à l'aide de Qgis et Global Mapper, est de l'ordre de 60km².le périmètre (**P**)est d'environ 59 km. Ces deux indices nous ont aidé de calculer les autres paramètres.

Le coefficient de compacité pour le bassin versant de l'Oued Joumouaa est **KG=2.17**. Le coefficient de Gravius KG est supérieur à 1 donc la forme du bassin est allongée.

1-2-rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent a été introduite pour comparer l'influence des caractéristiques des bassins versants sur l'écoulement (Roche, 1963). Le bassin rectangulaire provient d'une variation géométrique du bassin existant en gardant la même superficie, le même périmètre et le même coefficient de compacité. C'est à dire la même répartition hypsométrique (Amlil,1992 ; André&Christophe,2003).

Donc les courbes de niveau soient des lignes parallèles aux petits côtés de rectangle et l'exutoire est le côté aval du rectangle. A partir du coefficient de compacité on peut calculer la largeur et la longueur du rectangle équivalent en utilisant l'expression suivante :

$$\left. \begin{aligned} S &= L \times l \\ P &= 2 \times (L + l) \end{aligned} \right\}$$

$$l = \frac{KG\sqrt{A}}{112} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2} \right]$$

$$L = \frac{KG\sqrt{A}}{112} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2} \right]$$

Donc le bassin versant de l'Oued Joumouaa est un rectangle ayant une longueur d'ordre de 27.7 km et une largeur de 2.086 km. Ces indices affirment la forme allongée du bassin versant.

2-Relief du bassin versant

Le relief d'un bassin versant est un paramètre principal qui donne des renseignements sur leur comportement hydrologique. Il a une grande influence sur l'écoulement car beaucoup de principes hydrométéorologiques changent en fonction de l'altitude (précipitations, température,) et aussi de la morphologie du bassin.

Le relief s'exprime par la pente et l'hypsométrie d'un bassin et apporte des bonnes indications sur les risques naturels à savoir l'érosion hydrique, inondation, crues.

2-1-Hypsométrie du bassin

L'hypsométrie du bassin versant est définie comme étant la répartition des altitudes. Les courbes hypsométriques montrent la répartition des altitudes en fonction de leurs surfaces cumulées (Fig 26). Ces courbes donnent une vue générale sur la pente du bassin. Elles sont intéressantes car elles permettent de déterminer : l'âge et le degré d'évolution de l'érosion hydrique du bassin, l'état de son potentiel érosif, et de faire une comparaison entre les sous bassins versants. Ainsi elles indiquent l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin versant (Schumm,1956).

Dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa, l'altitude varie entre de 92m à 760m. Cette altitude est établie sur le modèle numérique du terrain de la région d'étude (MNT) obtenu à partir d'un fichier ASTER/GDEM (30m de résolution).

La répartition des altitudes (Tab.4) du bassin montre que les hautes altitudes qui dépassent 700 m occupent la partie Nord (l'amont du bassin) et les faibles altitudes se mettent dans la partie Sud. la partie centrale du bassin est caractérisé par des altitudes moyennes.

On distingue que 69% des surfaces du bassin ont des altitudes plus que 300 m d'altitude et 30%du surface ont des altitudes moins que 300m.

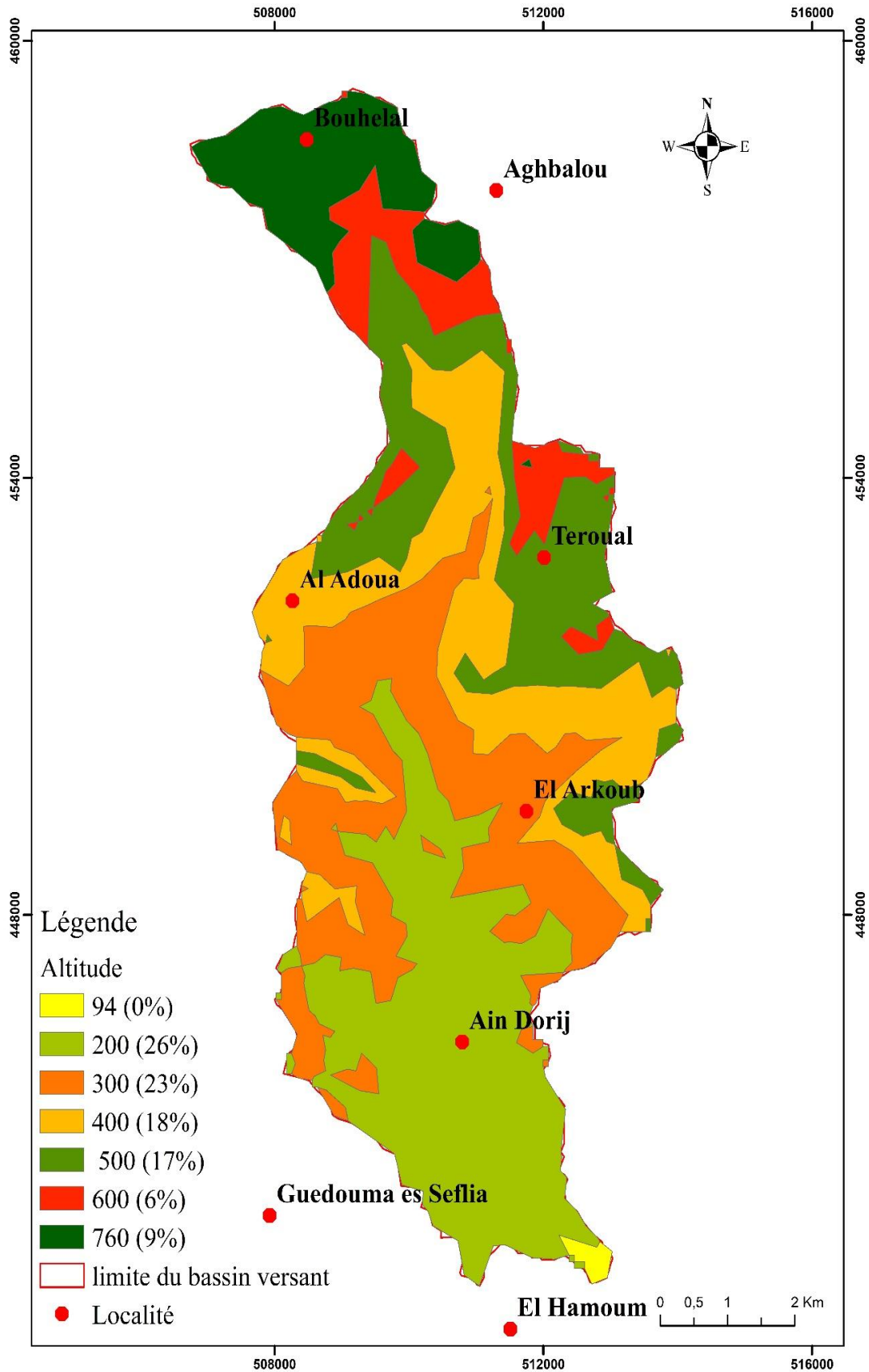


Figure 26 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Tableau 4: Répartition des superficies selon les tranches d'altitude du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

| Altitude | surface en km | surface cumulée en km | surface en % | cumulée en % |
|----------|---------------|-----------------------|--------------|--------------|
| 760-600 | 17,52585598 | 17,52 | 28 | 28,48 |
| 600-500 | 14,19760556 | 31,72 | 23 | 51,55 |
| 500-400 | 11,37680176 | 43,10 | 18 | 70,04 |
| 400-300 | 9,94153921 | 53,04 | 16 | 86,19 |
| 300-200 | 3,770739562 | 56,81 | 6 | 92,32 |
| 200-92 | 4,722759945 | 61,53 | 8 | 100 |

La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique s'obtient en portant en abscisse les surfaces cumulées et en ordonnées les altitudes cumulées correspondant. Nous avons établi la courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa, dont son aspect renferme une pente forte vers les plus hautes altitudes (760-300), choses qui sont prouvée par la faible fréquence de cette tranche d'altitude. Elle indique l'état allant vers l'équilibre du bassin avec un potentiel érosif assez important (Fig.27)

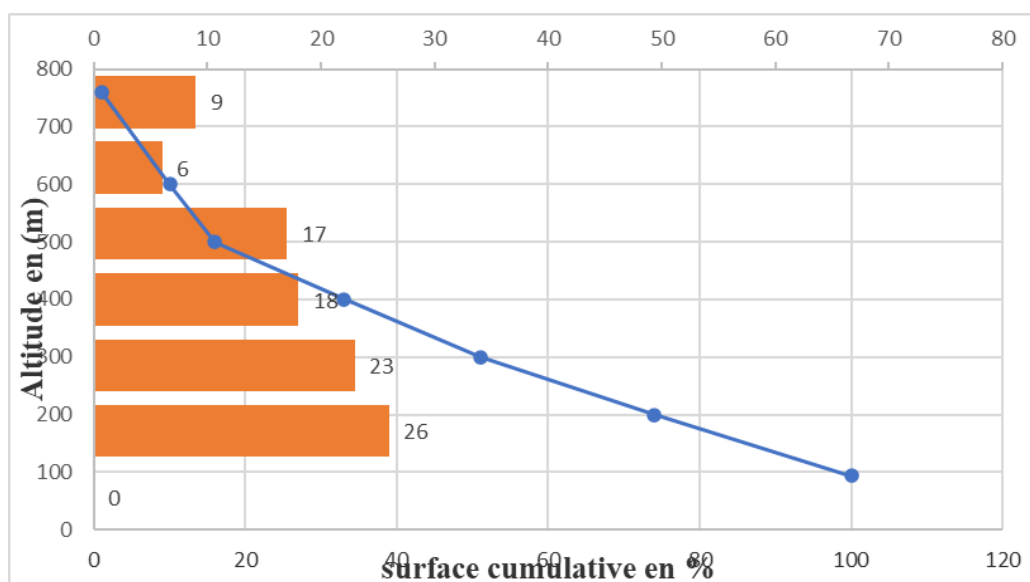


Figure 27: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

La description détaillée de l'élévation d'un bassin est donnée par les courbes hypsométriques. A partir de celles-ci, on peut déduire les caractéristiques de relief (Hmin) en l'occurrence : l'altitude minimale (Hmin) et l'altitude maximale (Hmax), l'altitude médiane correspond à 50% de la surface (H50%), l'altitude moyenne (Hmoy) déterminée par l'expression 2.6, l'altitude correspond à 5 % de la surface (H5%), l'altitude correspond à 95%de la surface (H95%) et la dénivelée ($D=H5\%-H95\%$).

Altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir du MNT, des cartes topographiques et de la courbe hypsométrique. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale (Hmin correspond au point le plus bas qui est généralement l'exutoire. L'altitude maximale du bassin est d'environ 760 m et l'altitude minimale est de l'ordre de 94 m (Fig 28). Ainsi on constate que le dénivelé est important dans notre zone d'étude, et par conséquent on a des variations considérables dans les facteurs climatiques.

2-2-Les pentes du bassin

La pente est un paramètre intéressant pour l'étude des risques naturels (crues, inondation, érosion hydrique,). Elle favorise bien le ruissellement.

La carte des pentes (Fig.29) est régénérée à partir du modèle numérique de terrain. Afin de faire une bonne interprétation visuelle il faut faire une classification des pentes. On est basé sur cette classification.

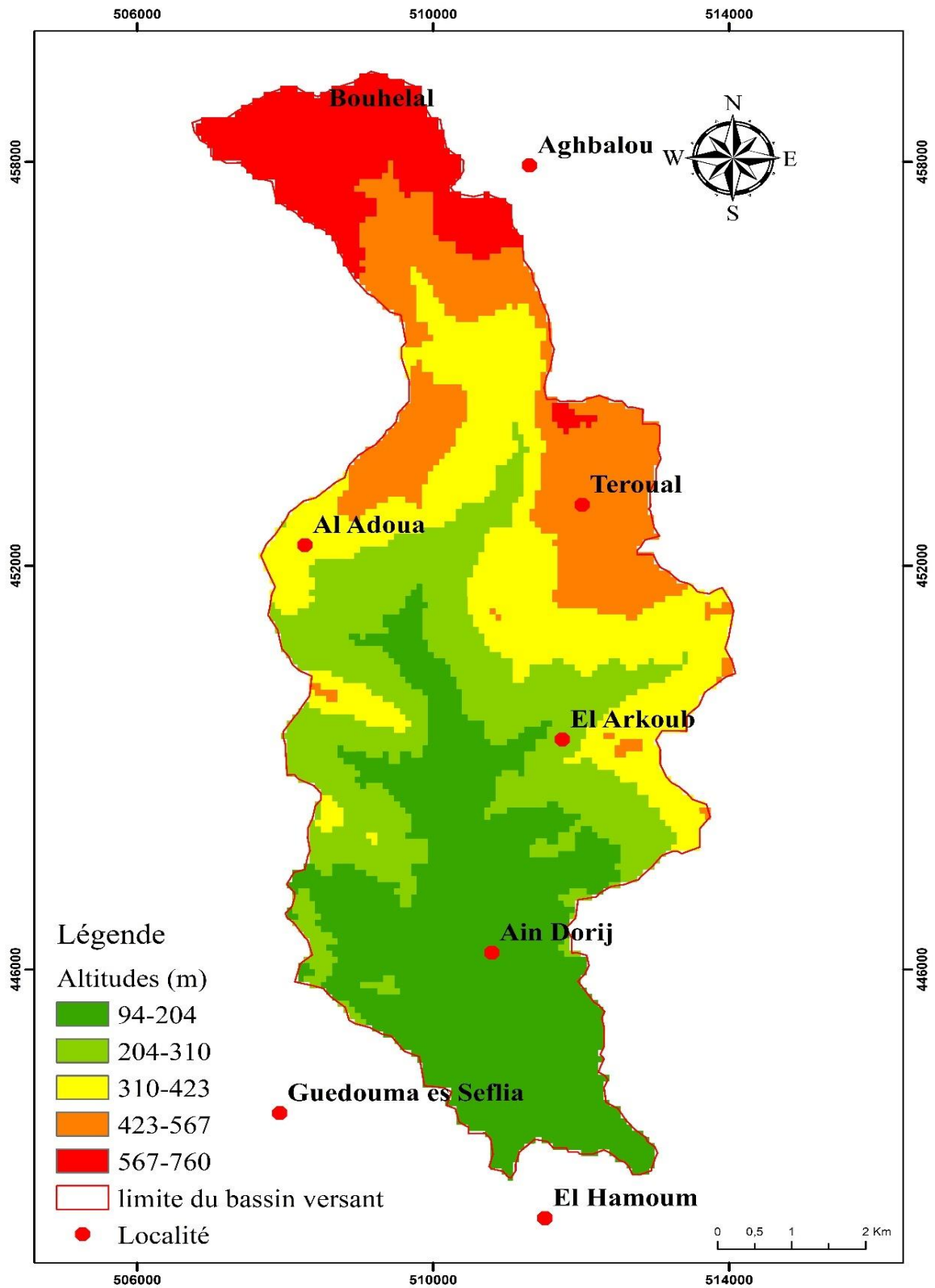


Figure 28 : Carte des altitudes du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Altitude moyenne

L'altitude moyenne s'établit à partir de la lecture d'une carte topographique ou bien de la courbe hypsométrique. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \times h_i}{A}$$

Avec :

- **H_{moy}**: altitude moyenne du bassin versant en (m),
- **A_i** : aire comprise entre deux courbes de niveau en (Km²),
- **h_i** : altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m).
- **A** : superficie totale du bassin versant en (Km²).

Dans le cas du bassin versant de l'Oued Joumouaa, nous pouvons calculer l'altitude moyenne à partir du tableau de répartition des altitudes (tab) pour toutes les surfaces comprises entre les courbes de niveaux et donc H_{moy} est de l'ordre de 385 m.

Altitude médiane

L'altitude médiane représente l'altitude lue au point de 50 % de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique (**Dubreuil §guiscafre, 1971**).

En appliquant cette notion sur notre bassin on trouve que l'altitude médiane est de l'ordre de 300 m. cette valeur est proche de celle de la moyenne 385. l'écart résulte de la courbe hypsométrique qui a une pente régulière.

3-Les pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa

Les pentes conditionnent fortement le ruissellement au niveau d'un bassin versant. L'étude de ce problème est importante pour aborder les problèmes des risques naturels (érosion hydrique, transport solide inondation...). Il est nécessaire de commencer d'abord par une classification des pentes à partir du modèle numérique du terrain nous avons dérivé la carte des pentes. Pour une meilleure interprétation visuelle, nous avons adopté le classement suivant (Tab5).

Tableau 5: Classification des pentes et répartition des classes et dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

| Classes des pentes | Degré de pentes | Type de pente | Surface en km ² | Surface en % |
|--------------------|-----------------|---------------|----------------------------|--------------|
| 1 | 0-4 | Faible | 13.14 | 23 |
| 2 | 04_8 | Modéré | 18,10 | 32 |
| 3 | 08_12 | Abrupte | 17.10 | 30 |
| 4 | 12_20 | Très abrupte | 6,4 | 11 |
| 5 | >33 | Extrême | 1,97 | 3 |

Les pentes supérieures (>20%) sont concentrées dans la partie Nord, région Bouhlal (Fig 29) la pente décroît progressivement en allant vers la partie centrale du bassin ou elle devient modérée (3%-12%), cette pente se rencontre dans la région de Teroual. Le tableau ci-dessus donne la répartition des superficies par classe de pente au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa (Tab 5).

Le tableau ci-dessus résultant de la carte des pentes, met en évidence le partage du bassin versant en trois grandes zones :

- Zone à pente très faible (moins de 4%) représentant 23% de la surface du bassin.
- Zone à pente moyenne (de 4% à 12%) occupent 62% de la surface du bassin
- Zone à pente forte (plus de 20 %) occupant 14 % de la surface du bassin.

Le relief est assez contrasté avec des pentes fortes et moyennes qui occupent 77% de la surface totale du bassin versant. En tenant compte de l'effet de la pente, le bassin versant de l'Oued Joumouaa monte une forte susceptibilité à l'érosion.

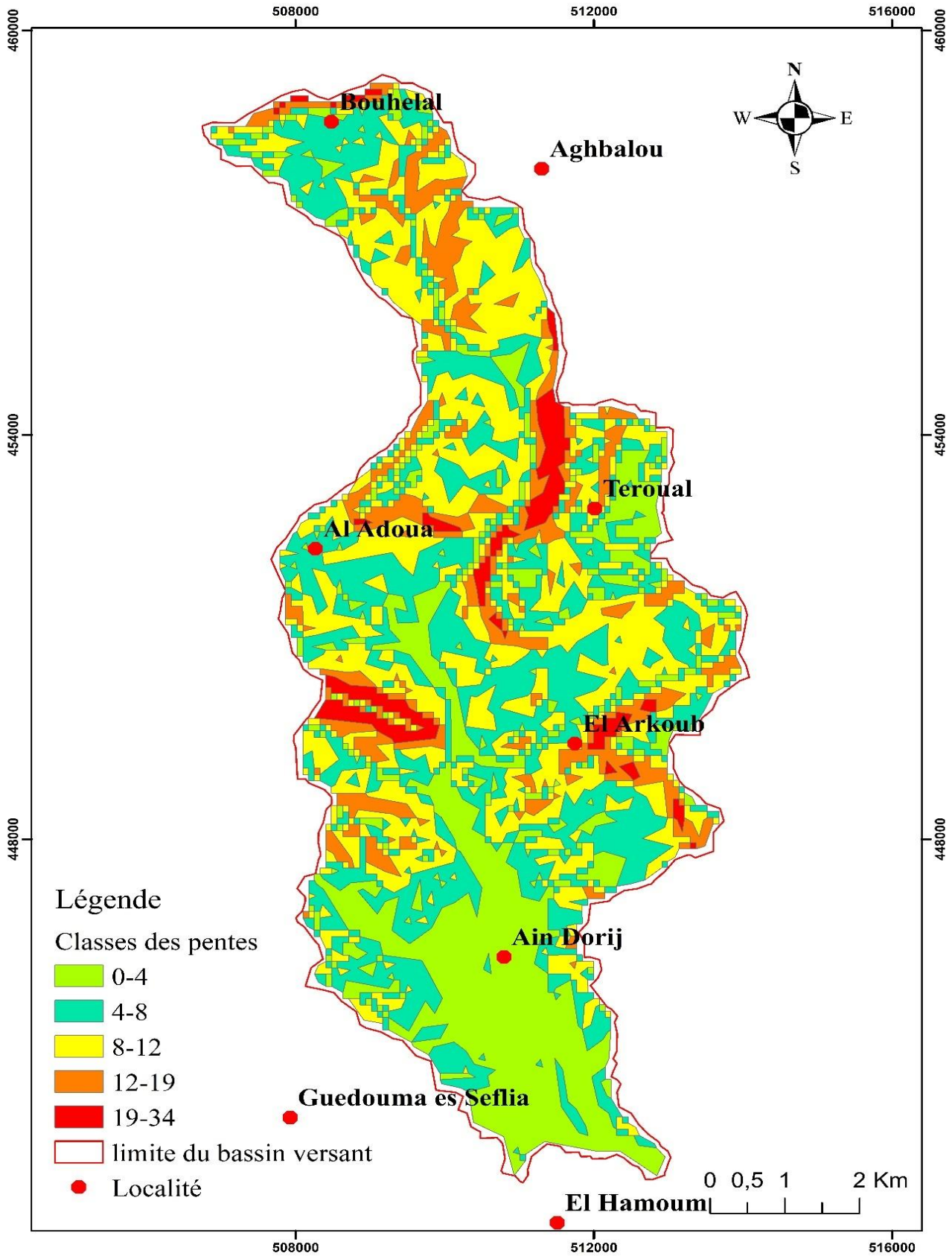


Figure 29: Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

3-1-Pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne d'un bassin versant est un facteur primordial pour l'évaluation du temps de parcours de ruissellement c'est-à-dire le temps de concentration.

Elle s'exprime par le rapport entre les hauteurs extrêmes par la longueur du rectangle équivalent.

On estime La pente moyenne est déterminée à partir de la courbe hypsométrique du bassin.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L}$$

Avec :

- P_{moy}: pente moyenne [m/km ou %],
- ΔH : l'altitude moyenne en (m).
- L : longueur de rectangle équivalent en (Km).

Dans Le bassin versant de l'Oued Joumouaa la pente moyenne est : $P_{moy} = \frac{H_{max}-H_{min}}{L}$

$$P_{moy} = \frac{760-94}{27.7} = 24\%$$

3-2-Indices de pente global

L'influence du relief sur le bassin est déterminée par l'indice global. De dernier est calculé à partir du rectangle équivalent. On peut calculer cet indice à partir de la dénivellation (D) et la longueur de rectangle équivalent en utilisant la formule suivante (Tab 6) :

$$IG = \frac{D}{L}$$

Avec IG : indice de pente globale

D : H_{5%}-H_{95%} (dénivellation)

H_{95%} : altitude correspondante à 95% de la superficie totale du bassin versant

H_{5%} : l'altitude correspondante à 5% de la superficie totale du bassin versant

L : Longueur du rectangle équivalent.

ORSTM (Office Régional Scientifique et Technique d’Outre-Mer : office français) a réalisé une classification du relief selon les valeurs de IG (Tab6).

Tableau 6 : Classification ORSTM du relief à partir de l’indice de pente globale.

| Classe | Nature de relief | Valeur d’IG |
|--------|---------------------|-------------------------|
| R1 | Relief très faible | $Ig < 0.002$ |
| R2 | Relief faible | $0,002 \leq Ig < 0,005$ |
| R3 | Relief assez faible | $0,005 \leq Ig < 0,01$ |
| R4 | Relief modéré | $0,01 \leq Ig < 0,02$ |
| R5 | Relief assez fort | $0,02 \leq Ig < 0,05$ |
| R6 | Relief fort | $0,05 \leq Ig < 0,5$ |
| R7 | Relief très fort | $Ig > 0,5$ |

La courbe hypsométrique du bassin versant de l’Oued Joumouaa permet de calculer la dénivelée : **$D = H5\% - H95\% = 700 - 120 = 680\text{m}$** ; **$L = 27.7$** km donc on constate la valeur de l’indice globale du bassin versant de l’Oued Joumouaa qui est **$IG = 680/27.7 = 24.54$**

Donc cette valeur est très élevée, par conséquent le relief de l’Oued Joumouaa est très fort.

3-3-Exposition

L’exposition provient à partir du model numérique de terrain (MNT), le tableau suivant montre la répartition des expositions au niveau du bassin versant de l’Oued Joumouaa.

Tableau 7 : Répartition des classes d'exposition du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

| Sens d'exposition | Surfaces en Km ² | Surfaces en % |
|-------------------|-----------------------------|---------------|
| Zone plate | 3,84 | 7 |
| Nord | 8.32 | 15 |
| Nord-Est | 5.91 | 10 |
| Est | 5,59 | 10 |
| Sud-Est | 8,94 | 16 |
| Sud | 8.08 | 14 |
| Sud-Ouest | 6.84 | 12 |
| Ouest | 4..98 | 9 |
| Nord-Ouest | 4.28 | 8 |
| Total | 59,38 | 100 |

On constate que le bassin versant de l'Oued Joumouaa est presque réparti, également sur toutes les expositions. Cette répartition des classes d'exposition (Fig.30) nous a permis de localiser, dans l'espace, les zones les plus vulnérables et sensibles à l'érosion et qui sont généralement défavorables à l'installation de la végétation.

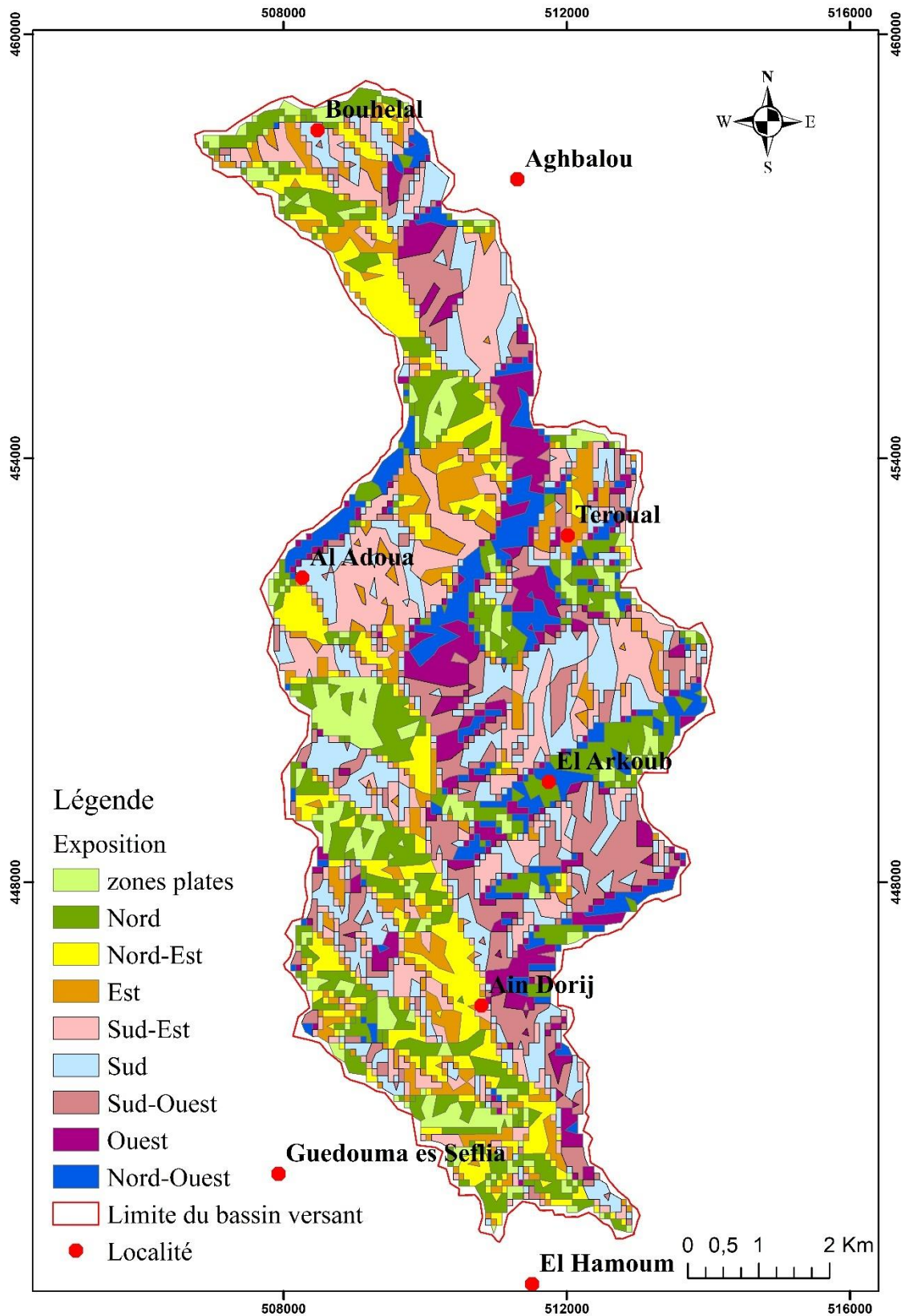


Figure 30: Carte d'exposition du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

II- Analyse morphométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa

1-L'analyse morphométrique

Beaucoup d'auteurs et organismes dont l'ORSTM ont réalisé des indices morphométriques, ces derniers permettent de comparer entre les différents bassins versants et de soutenir les éléments explicatifs des changements hydrologiques. Les outils mathématiques permettent l'analyse d'un milieu physique pour éviter d'avoir recours à des évaluations qui seront, forcément, subjectives (Dubreuil,1974).

Les caractéristiques des écoulements sont influencés par les éléments physiques des bassins versants dont celles liés à la topographie et à la forme du bassin versant (Roche,1963 ; Strahler,1964 et Dubreuil,1974).

Les indices morphométriques doivent être finis par l'analyse à partir des cartes. L'échelle des cartes utilisés, le model numérique de terrain (MNT) et le model numérique d'altitude (MNA) permettent d'évaluer le degré de signification des indices morphométriques.

Le model numérique du terrain permet de donner les différents indices morphométriques de nature linéaire (réseau hydrographiques) ou surfaciques (pente, forme).

Les hydrologues de l'ORSTOM font l'étude de la pente transversale et les cours d'eau qui sont des facteurs morphométriques primordiaux.

L'étude des indices morphométriques du bassin versant de l'Oued Joumouaa a été élaborée pour les sous bassins versants pour déterminer la priorisation et le degré du risque d'érosion. Ceci est en fonction des indices physiques spécifiques des sites géographiques différenciés du bassin.

2- les paramètres morphométriques

Le réseau de drainage est un facteur hydrologique important d'un bassin versant qui définit son organisation. Il représente la masse d'eau produite par les pluies. Plusieurs classifications ont donné la structure du réseau de drainage : Gravelius (1914), Horton (1945), Strahler (1950), Shiver (1960) et Schideggar (1970). On suit Le système Strahler, légèrement changé par Horton, car il est clair et simple, son principe de la classification permet d'ordonner les parties d'un réseau de drainage.

L'analyse morphométriques d'un réseau de drainage oblige la délimitation de toutes les lignes hydrographiques existantes.

Les systèmes d'information SIG (Quantum gis Qgis 2.18.2) a permis la délimitation des flux en se basant sur une image satellitaire type ASTER GDEM de 30 m de résolution et la méthode de Strahler(1957). Les cours d'eau ayant pour extrémité amont une source d'ordre (1), la confluence de deux cours d'eau d'ordre (n) donne un ordre (n+1) et la confluence d'un cours d'eau d'ordre n avec un ordre (n+1) donne un cours d'eau d'ordre (n+1). L'ordre du tronçon arrivant à l'exutoire est donc l'ordre maximum du bassin.

Tous les affluents d'extensions et de modèles différents ont été numérisés et la limite du bassin versant a également été déterminée pour le bassin de l'Oued Joumouaa. De même, douze sous bassins versants ont également été délimités et mesurés pour cette étude. (Fig31).

Des travaux de numérisation ont été effectués pour l'analyse complète de la morphométrie de drainage. Pour déterminer l'ordre de priorisation des sous-bassins versants de la zone d'étude on va calculer les paramètres morphométriques qui se composent en trois types : les paramètres géométriques, les paramètres de relief et les paramètres linéaires (Tab.8).

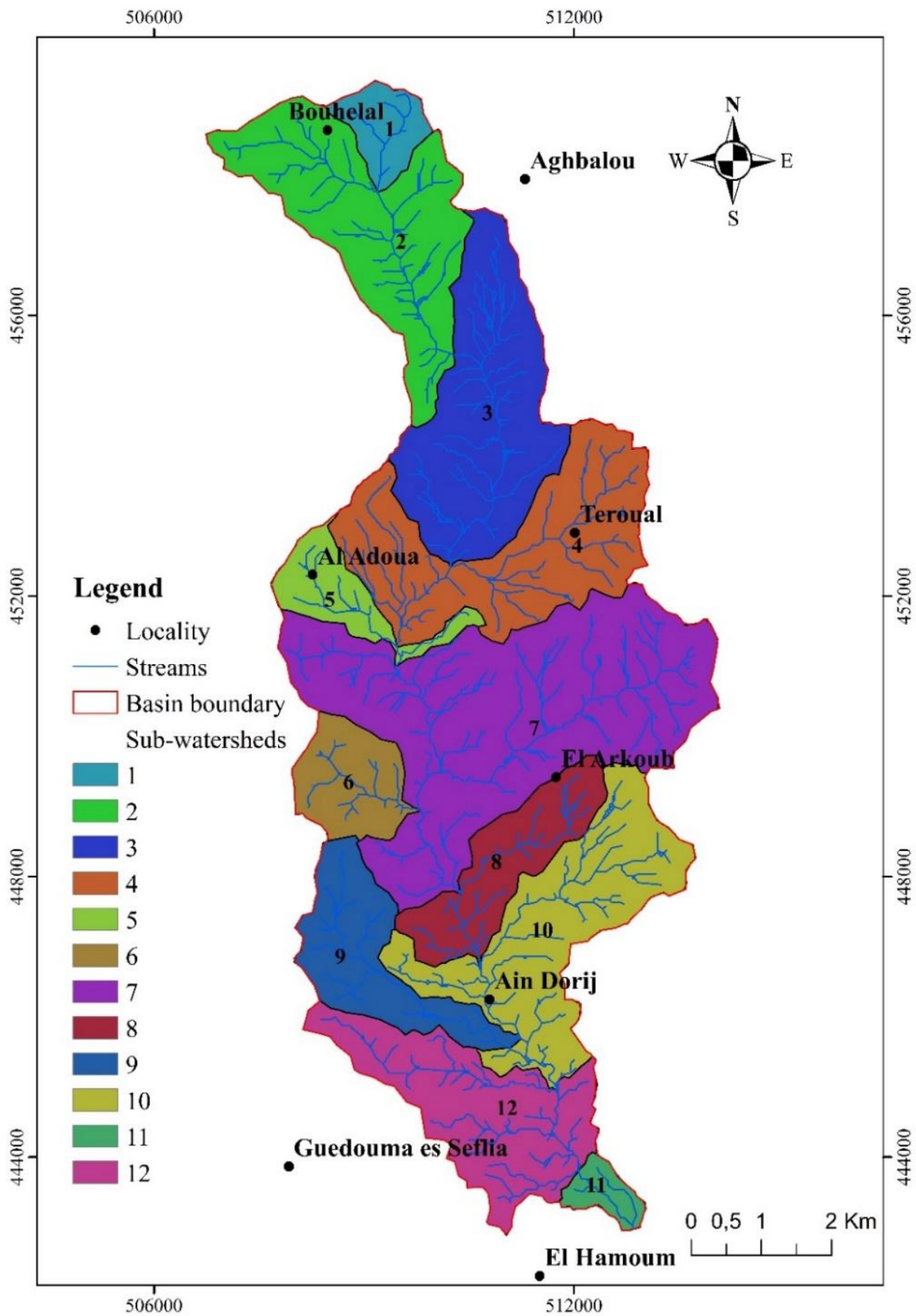


Figure 31: Les douze sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

Tableau 8: Méthode de calcul de paramètres morphométrique.

| Paramètres morphométriques | Formules | Références |
|--|--|----------------------------|
| Paramètres de base | | |
| surface du bassin (A) | Superficie du bassin versant (Km ²) | Horton (1945) |
| périmètre du bassin (P) | Perimeter of watershed (Km) | Horton (1945) |
| Paramètres linéaires | | |
| ordre de flux (U) | Ordre hiérarchique du flux | Horton (1945) |
| nombre de flux (Nu) | Nombre total du flux | Strahler (1957) |
| Longueur du bassin (Lb) | Longueur du flux | Nooka Ratnam et al, (2005) |
| longuer de flux (Lu) | gis softoware | Horton (1945) |
| moyenne de longuer de flux(LSM) | Lsm=Lu/Nu | Horton (1945) |
| rapport de bifurcation (Rb) | Rb=Nu/Nu+1 Nu+1=Nombre des segments de flux d'ordre superieur | Schumm (1956) |
| Paramètres de forme | | |
| Densité de drainage (Dd) (Km/km ²) | Dd=Lu /A Lu= longuer totale des ordres de flux(Km), A=surface du bassin en km ² | Horton (1945) |
| Fréquence de flux(Fu) (no/km ²) | Fu = Nu /A Nu = nombre total des differents ordre, A = surface du bassin | Horton (1945) |
| Moyenne du rapport de bifurcation (Rbm) | Moyenne du rapport de bifurcation de tous les ordres | Strahler, 1964 |
| Texture de drainage (T) (no/km ²) | T = Nu/P Nu: nombre total des flux d'ordre p: périmètre (km) | Horton (1945) |
| Longueur d'écoulement (lo) (km) | Lo = 1/Dd Dd densité de drainage | Horton (1945) |
| Facteur de forme (Ff) | Ff =A /Lb ² A= surface du bassin (km ²) carré de longueur du bassin | Horton (1945) |
| Forme du bassin (Bs) | Bs = Lb ² / A | Nooka Ratnam et al, (2005) |
| Rapport dallongement (Re) | $Re = 1,128\sqrt{A/Lb}$ A= surface du bassin Lb= Longueur du bassin (Km) | Schumm (1956) |

| Paramètres de Relief | | |
|---------------------------|---|-------------------|
| Relief du bassin (Bh) | $Bh = H - h1$ H = altitude maximale H1 = altitude minimale | Horton (1945) |
| Rapport de relief | R/L | Schumm (1963) |
| Relief relatif (Rh) | $Rh = Bh / Lb$ Bh = relief du bassin Lb = longueur du bassin | Schumm (1956) |
| Nombre de robustesse (Rn) | $Rn = Dd * (Bh / 1000)$ Bh = relief du bassin, Dd = densité de drainage | Moore et al ,1991 |

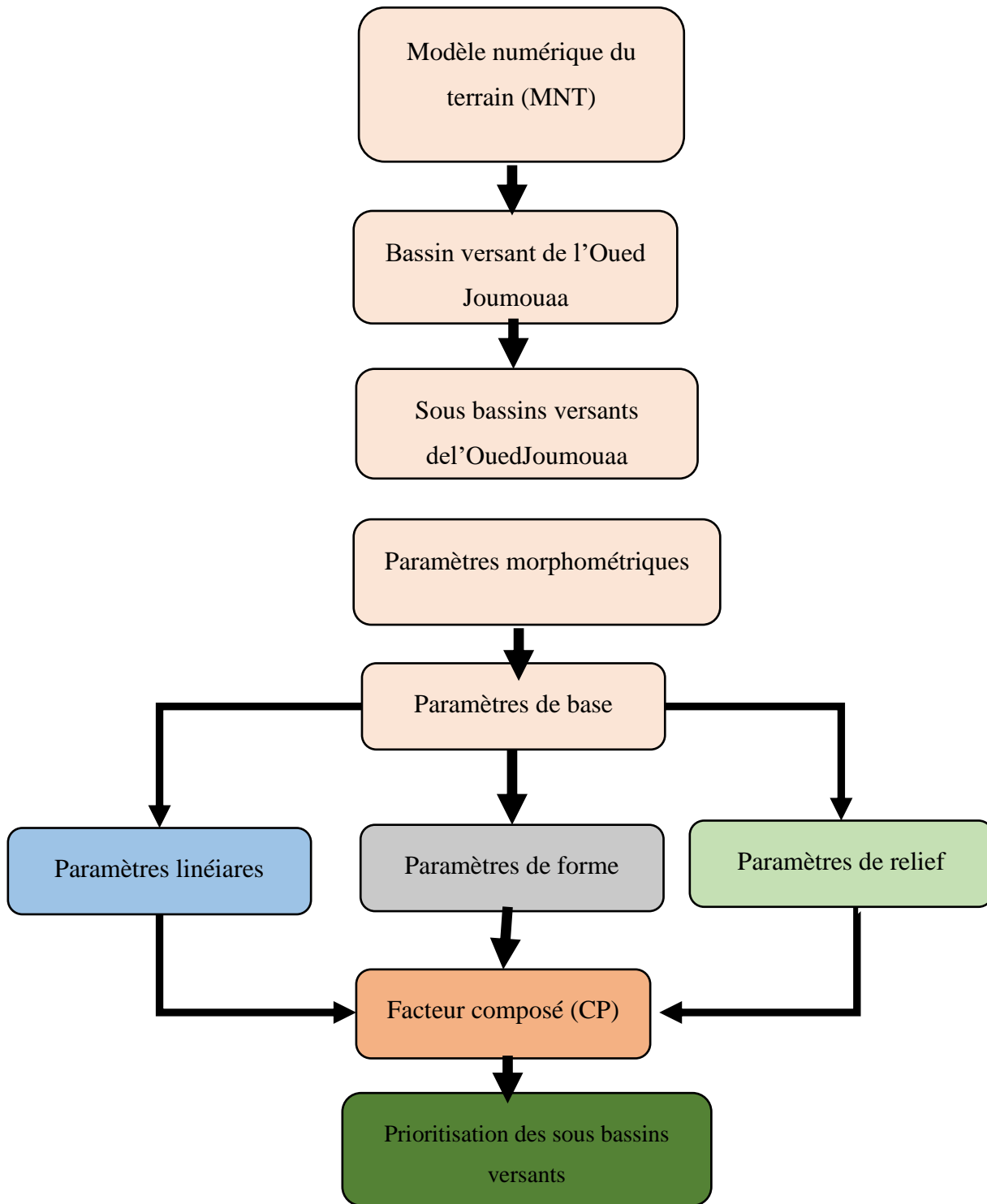


Figure 32 : Méthodologie d'analyse morphométrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

2-1-Les paramètres de base

Les paramètres de base de l'analyse morphométrique sont indispensables pour le calcul des autres paramètres, notamment : la superficie du bassin(A), le périmètre du bassin (P) et la longueur du bassin (Lb) (Tab.8). Le calcul de ces paramètres se fait en se basant sur le modèle numérique du terrain (MNT) de type SRTM de 30 m de résolution, téléchargeable à partir du site <http://ersdac.or.jp/gdem/e/3.html> et le logiciel (Quantum Gis 2.18.2) (logiciel open source).

a- Superficie et périmètre :

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa couvre une superficie de 60km² et un périmètre de 59 km (Fig.33).

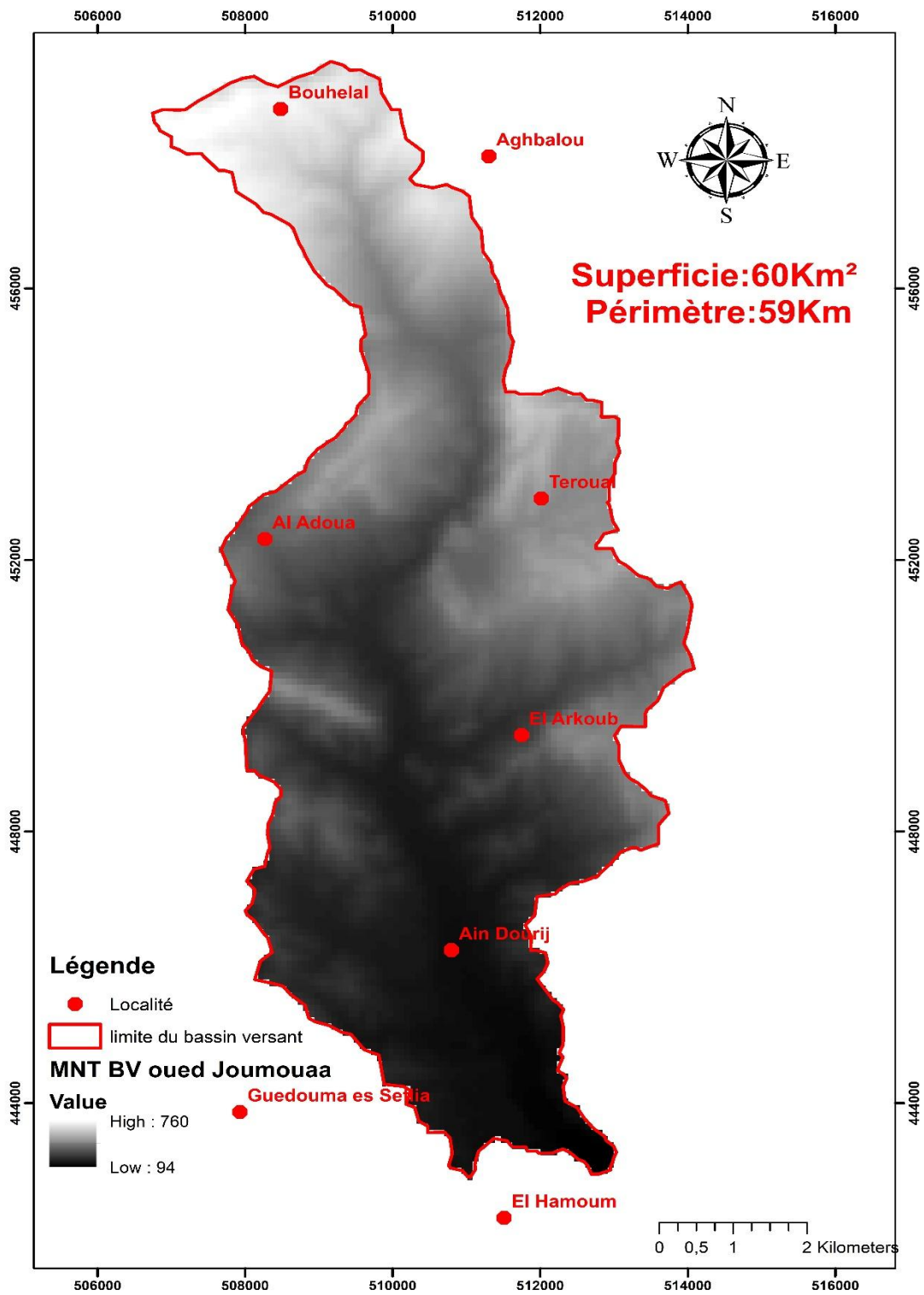


Figure 33 : Modèle numérique du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

2-2-Les paramètres linéaires

Les paramètres linéaires du système de drainage du bassin versant sont : l'ordre de flux (u), le nombre de flux de chaque ordre (Nu), la longueur de flux, la longueur de flux moyenne (Lsm), le rapport de longueur de flux (Rl), le rapport de bifurcation (Rb) et le rapport d'écoulement (Fig09).

Tableau 9: Analyse des courants des douze sous-bassins versants de l'Oued Joumouaa.

| sous bassins versants | Nombre du flux ($\sum Nu$) | Nombre de flux (Nu) | | | | | Rapport de bifurcation (Rb) | | | | | |
|-----------------------|------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----|------|------|---------------------|-------|
| | | flux d'ordre 1 | flux d'ordre 2 | flux d'ordre 3 | flux d'ordre 4 | flux d'ordre 5 | Rb1 | Rb2 | Rb3 | Rb4 | Moyenne de Rb (Rbm) | |
| SBV01 | 13 | 6 | 5 | 2 | 0 | 0 | 1,2 | 0 | 2,50 | 0,00 | 0,00 | 1,85 |
| SBV02 | 211 | 127 | 45 | 13 | 26 | 0 | 2,8 | 2 | 3,46 | 0,50 | 0,00 | 2,26 |
| SBV03 | 260 | 146 | 55 | 10 | 48 | 1 | 2,6 | 5 | 5,50 | 0,21 | 48,0 | 14,09 |
| SBV04 | 131 | 62 | 25 | 19 | 12 | 13 | 2,4 | 8 | 1,32 | 1,58 | 0,92 | 1,58 |
| SBV05 | 49 | 31 | 6 | 9 | 0 | 3 | 5,1 | 7 | 0,67 | 0,00 | 0,00 | 1,94 |
| SBV06 | 44 | 18 | 13 | 11 | 0 | 2 | 1,3 | 8 | 1,18 | 0,00 | 0,00 | 0,86 |
| SBV07 | 388 | 207 | 87 | 29 | 23 | 42 | 2,3 | 8 | 3,00 | 1,26 | 0,55 | 1,80 |
| SBV08 | 106 | 51 | 16 | 19 | 1 | 19 | 3,1 | 9 | 0,84 | 19,0 | 0,05 | 5,77 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|----|----|----|----|----------|-----------|------|------|------|
| SBV09 | 83 | 39 | 18 | 24 | 0 | 2 | 2,1 7 | 0,75 | 0,00 | 0,00 | 0,97 |
| SBV10 | 192 | 100 | 44 | 10 | 10 | 28 | 2,2 7 | 4,40 | 1,00 | 0,36 | 2,01 |
| SBV11 | 8 | 3 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0,0 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SBV12 | 136 | 66 | 49 | 3 | 0 | 18 | 1,3 5 | 16,3 3 | 0,00 | 0,00 | 5,89 |

Tableau 10: rapport de longueur d'ordre et moyenne de rapport d'ordre

| sous bassins versants | Moyenne Lu (Lsm en km) dans les différents ordre de flux u (Lu/Nu) | | | | | Rapport de longueur d'ordre (RL) | | | | Moyenne du rapport d'ordre(R _{Lm}) |
|-----------------------|---|------|------|------|------|----------------------------------|------|------|------|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 2/1 | 3/2 | 4/3 | 5/4 | |
| SBV01 | 0,30 | 0,26 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,71 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,36 |
| SBV02 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,10 | 0,00 | 0,50 | 0,35 | 1,29 | 0,00 | 0,71 |
| SBV03 | 0,11 | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,17 | 0,34 | 0,19 | 4,57 | 0,04 | 1,28 |
| SBV04 | 0,22 | 0,27 | 0,12 | 0,17 | 0,13 | 0,51 | 0,33 | 0,90 | 0,85 | 0,65 |
| SBV05 | 0,12 | 0,20 | 0,21 | 0,00 | 0,13 | 0,32 | 1,62 | 0,00 | 0,00 | 0,97 |
| SBV06 | 0,13 | 0,12 | 0,15 | 0,00 | 0,23 | 0,68 | 1,01 | 0,00 | 0,00 | 0,84 |
| SBV07 | 0,12 | 0,14 | 0,10 | 0,16 | 0,12 | 0,49 | 0,25 | 1,23 | 1,32 | 0,82 |
| SBV08 | 0,14 | 0,15 | 0,12 | 0,42 | 0,08 | 0,33 | 0,99 | 0,18 | 3,42 | 1,23 |
| SBV09 | 0,13 | 0,13 | 0,17 | 0,00 | 0,16 | 0,48 | 1,74 | 0,00 | 0,00 | 1,11 |
| SBV10 | 0,12 | 0,16 | 0,18 | 0,22 | 0,11 | 0,60 | 0,25 | 1,19 | 1,38 | 0,86 |
| SBV11 | 0,48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SBV12 | 0,17 | 0,13 | 0,23 | 0,00 | 0,11 | 0,55 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,33 |

a-Ordre de flux

La détermination des ordres de flux (d'écoulement) de cours d'eau est la première étape pour faire une analyse géomorphologique, hydrologique et morphométrique.

Afin de décrire quantitativement le réseau de drainage d'un bassin versant, Horton (1945) et Stahlé (1957 ; 1964 ; 1952) ont réalisé l'ordre de flux.

L'ordre de flux est défini comme étant une mesure de la subdivision des lignes d'eau dans les bassins versants. Il représente la relation organisée entre les parties de flux. Selon la loi Horton, Le flux non subdivisé est désigné comme étant un flux de premier ordre. Le flux de deuxième ordre est la jointure de deux flux de premiers ordres. Le flux de troisième ordre est l'assemblage de deux flux de deuxièmes ordres.ect.

La zone d'étude contient 1621 cours d'eau : 856 de premier ordre, 363 de deuxième ordre, 149 de troisième ordre, 120 de quatrième ordre et 133 de cinquième ordre. Ce grand nombre de ravins entraîne l'érosion hydrique du sol (Fig 34).

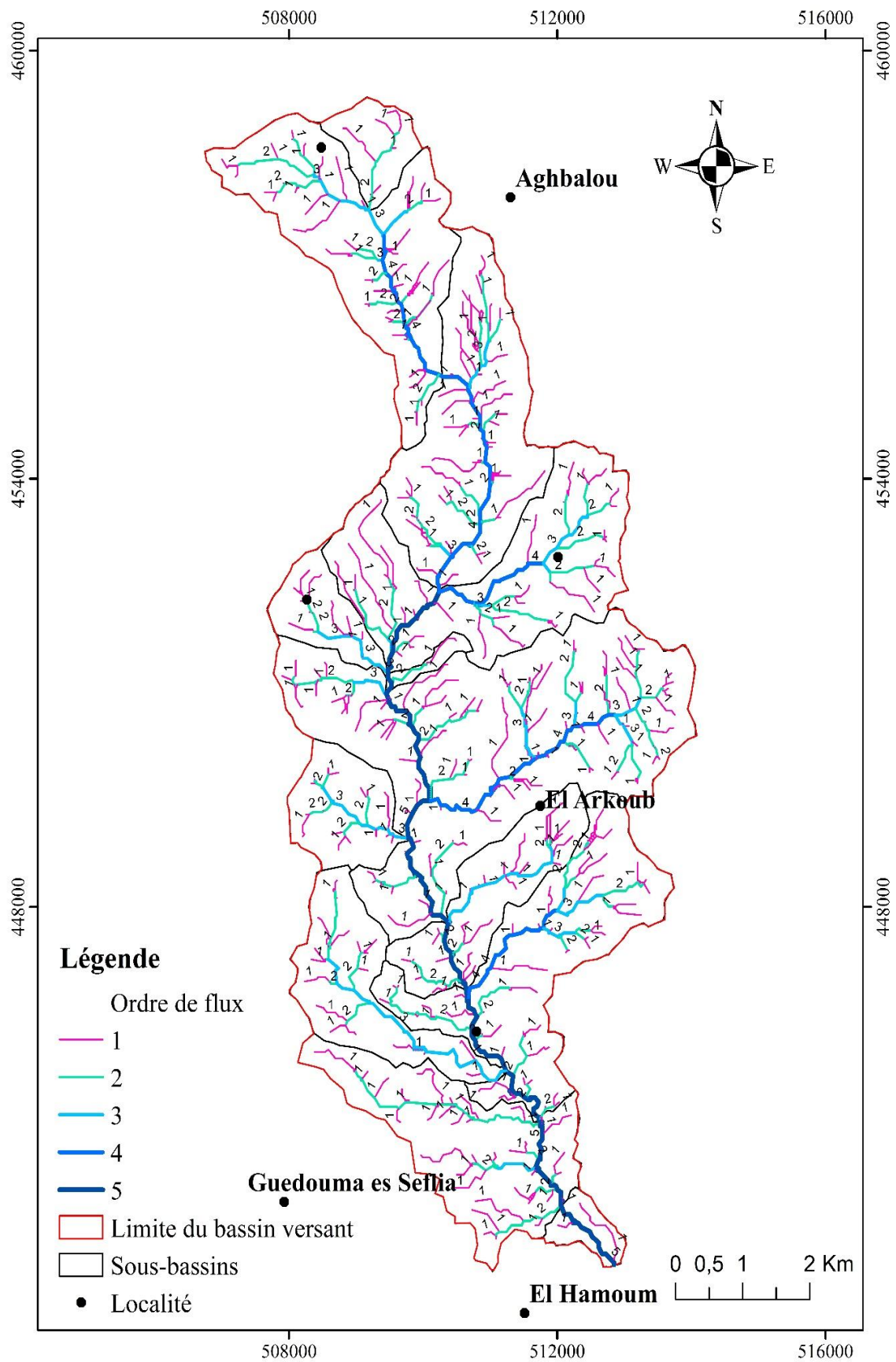


Figure 34 : Réseaux hydrographique détaillé du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Tableau 11: Nombre de cours d'eau, longueur du cours d'eau et rapport des longueurs des douze sous bassins versants.

| sous-bassins versants | Surface bassin en km ² | Périmètre du bassin km | Longueur du bassin en km | Longueurs des flux (Lu) en Km | | | | | Longueur du flux en Km (ΣLu) |
|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------|------|------|------|--|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| SBV01 | 1,27 | 4,78 | 1,59 | 1,83 | 1,30 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 3,15 |
| SBV02 | 6,95 | 15,56 | 5,19 | 12,10 | 6,02 | 2,09 | 2,69 | 0,00 | 22,89 |
| SBV03 | 7,06 | 13,47 | 5,15 | 16,46 | 5,51 | 1,06 | 4,85 | 0,17 | 28,06 |
| SBV04 | 7,26 | 16,68 | 4,70 | 13,48 | 6,87 | 2,26 | 2,04 | 1,73 | 26,38 |
| SBV05 | 1,80 | 9,41 | 3,13 | 3,74 | 1,19 | 1,93 | 0,00 | 0,39 | 7,25 |
| SBV06 | 2,24 | 6,23 | 2,10 | 2,40 | 1,62 | 1,64 | 0,00 | 0,45 | 6,12 |
| SBV07 | 14,01 | 22,71 | 6,39 | 24,33 | 11,98 | 2,99 | 3,67 | 4,85 | 47,81 |
| SBV08 | 3,23 | 10,08 | 3,89 | 7,14 | 2,36 | 2,34 | 0,42 | 1,43 | 13,70 |
| SBV09 | 3,50 | 11,08 | 3,98 | 5,00 | 2,39 | 4,16 | 0,00 | 0,32 | 11,87 |
| SBV10 | 6,81 | 18,38 | 4,85 | 11,89 | 7,13 | 1,81 | 2,16 | 2,97 | 25,96 |
| SBV11 | 0,69 | 3,80 | 1,27 | 1,43 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,31 | 1,31 |
| SBV12 | 5,55 | 14,04 | 4,60 | 11,48 | 6,34 | 0,69 | 0,00 | 1,90 | 20,42 |

b- nombre de flux

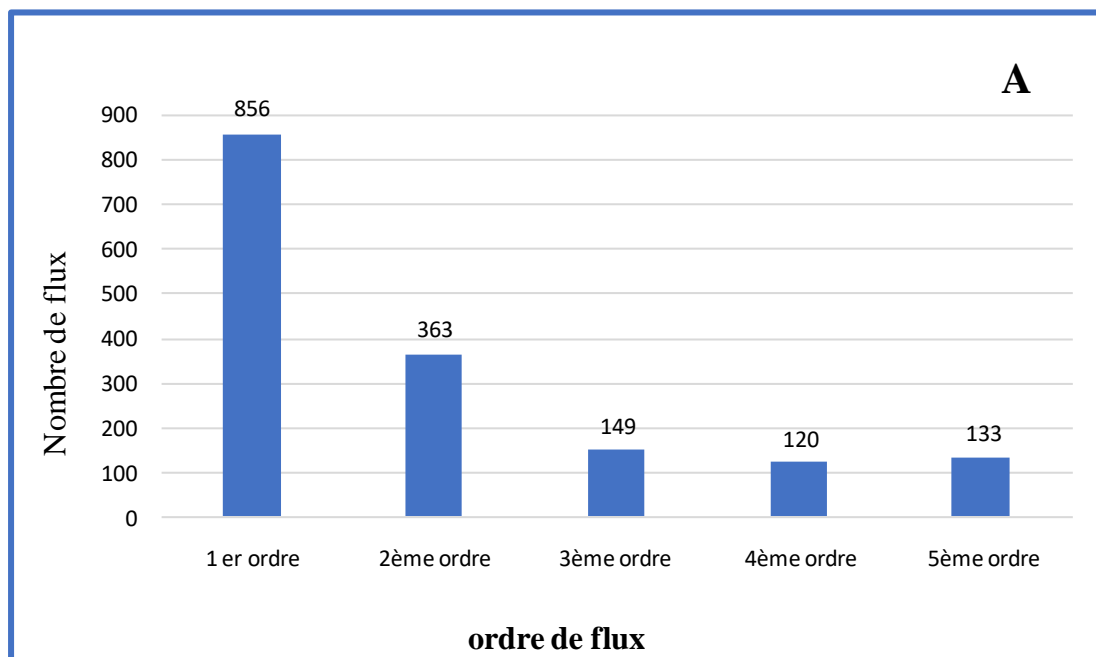
Selon Horton (1945) et Strahler (1964), le nombre de flux (Nu) est un nombre total des segments de flux d'ordre (U). L'analyse du réseau hydrographique hiérarchisé du bassin versant de l'Oued Joumouaa montre que le nombre total de flux est d'ordre 1621. On constate que le nombre des flux

diminuait au fur et à mesure que l'ordre du flux augmentait dans tous les sous bassins versants (Tab 12).

Les flux de premier ordre représentent presque la moitié du nombre total des ruisseaux dans tout le bassin versant 52.81%. par contre les flux de deuxième ordre représentent 22.39% du nombre total des flux du bassin versant. Les autres ordres représentent respectivement 9.19% (3ème ordre), 7.40% (4ème ordre) et 8.20% (5ème ordre).

Les variations observées dans l'ordre et la taille des lignes d'eau peuvent être dues aux conditions géomorphologiques, physiographiques, topographiques et structurelles de la région et à la capacité d'infiltration du sol (Iqbal & Sajjad, 2014 ; Umair et Syed, 2014 ; Aher et al, 2014 ; Benzougagh et al, 2016).

Les valeurs élevées des flux de premier ordre indiquent la possibilité d'inondations soudaines imprévues après forte précipitations dans les avals (Chitra et al, 2011 ; Chaitanya & Kanak, 2017). On constate fréquemment ce phénomène dans notre zone d'étude (Fig 35).



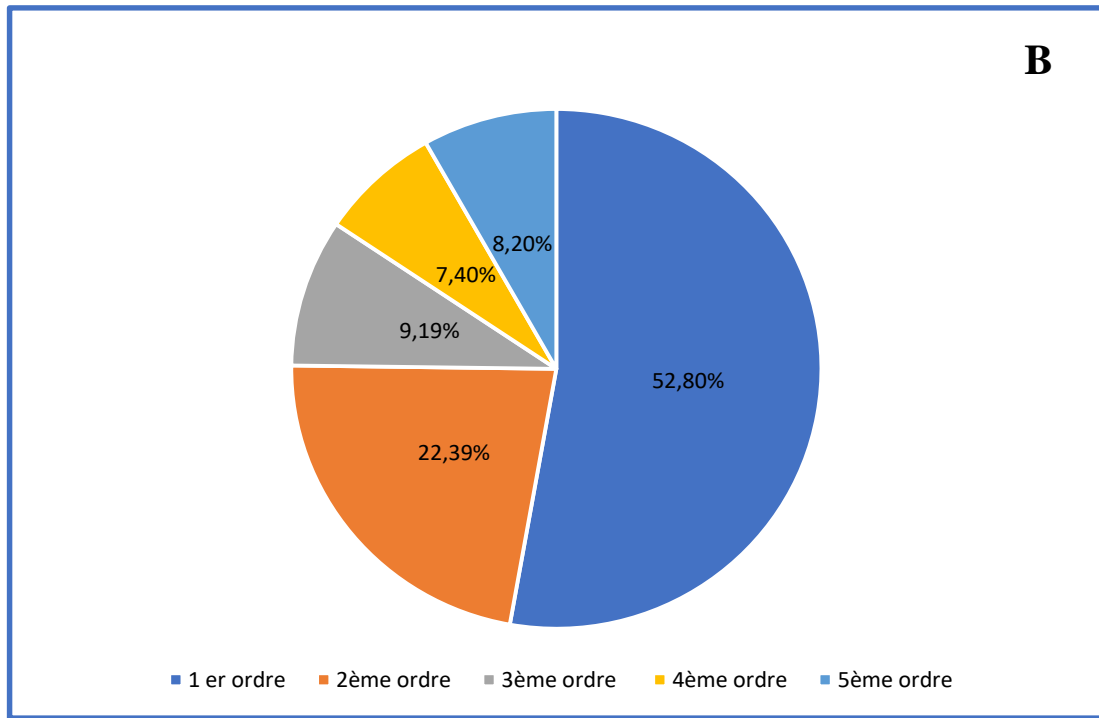


Figure 35: Nombre de flux au niveau de chaque ordre de flux ;B :pourcentage du chaque ordre du flux du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

c-Longueur du flux

D'après Horton (1945) le calcul des longueurs de flux se fait en mesurant la longueur totale des segments de ruisseaux de différents ordres du flux. La longueur de flux est le facteur le plus important dans un drainage du bassin, en se basant sur la loi proposée par Horton (1945). Nous avons calculé les longueurs des cours d'eau des deux sous bassins versants. Selon la deuxième loi de Horton (1945) qui a suggéré que tant l'ordre de flux diminue la longueur augmente. Cela désigne que la longueur du flux de premier ordre est maximale. Dans notre zone d'étude la longueur totale des cours d'eau est de 216.34 km. Les totaux des nombres et longueur du flux de chaque ordre diminuent pour les ordres 1 à 5 et restent presque les mêmes pour les ordres 4 et 5 (Fig.36).

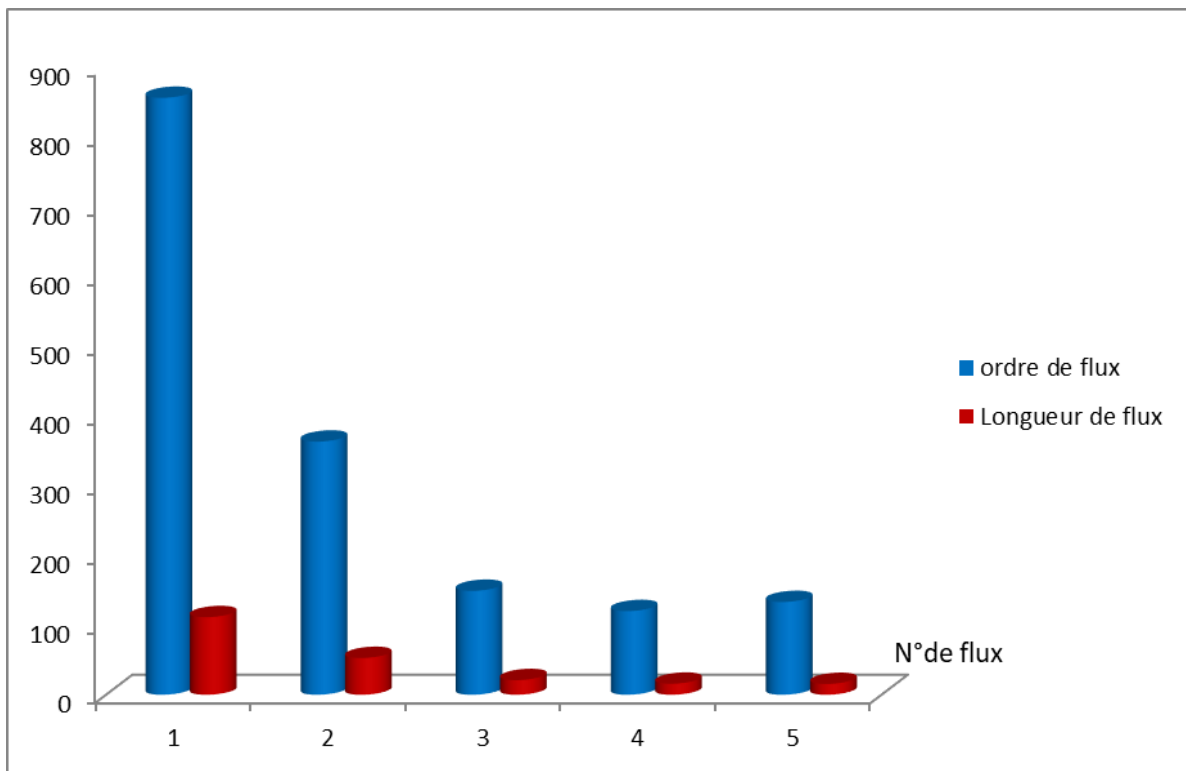


Figure 36: Nombre et longueur de courant de chaque ordre du bassin versant de l'Oued Joumouaa

d-Rapport de longueur du flux (RL)

Le rapport de longueur de flux est le rapport entre la longueur moyenne de flux (L_u) de n'importe quel ordre donné (u), et la longueur moyenne de flux d'ordre inférieur (L_{u-1}), (Horton, 1945) qui indique la différence entre la pente et la topographie. Le rapport de longueur (RL) a un contrôle significatif de la capacité de décharge et des stades d'érosion, il est utile de déterminer le débit de l'écoulement et la phase d'érosion du bassin (Horton, 1945 ; Sreedevi et coll. 2004 ; Magesh et coll. 2013). Les valeurs calculées du RL (Tab. 12) varient entre 0,00 dans le SBV11 et 1,28 dans le SBV03. Ce dernier présente un degré de développement de drainage. Le RL entre les ordres successifs varie généralement avec la variation topographique, aussi il y a une forte relation entre l'écoulement superficiel et les stades d'érosion des sous bassins versant.

E-Rapport de bifurcation (Rb).

Le rapport de bifurcation est déterminé par le nombre de flux d'un ordre à l'ordre suivant (Schumm, 1956), il est exprimé par la formule suivante :

$$R_b = N_u / N_{u+1}$$

Avec :

Rb : Rapport de Bifurcation,

Nu : Nombre total de segments de flux d'ordre,

Nu+1 : Nombre de segments du flux de l'ordre supérieur suivant (U+1).

Selon, Horton (1945), le rapport de bifurcation est considéré comme un indice de relief et de dissection. Le rapport de bifurcation est un paramètre important qui articule le degré de ramification de drainage et un indicateur de la complexité et du degré de dissection d'un bassin versant (Bharadwaj et al,2014). Stahler (1957) a montré que dans les régions qui ont des environnements différents, le rapport de bifurcation présente une faible variation, sauf dans les sites géologiques résistants. Les faibles valeurs du rapport de bifurcation sont les caractéristiques des bassins versants structurellement moins perturbés sans aucune distorsion du réseau de drainage (Nag,1998).

Le rapport de bifurcation pour une densité donnée de lignes de drainage, est très fortement contrôlé par la forme du bassin et montre une très faible variation (comprise entre 3 et 5) dans le substrat rocheux homogène d'une région à l'autre (Chorley et al, 1984). Généralement la valeur moyenne de Rb varie entre 3.0 et 5.0 pour un bassin versant ou l'influence des structures géologiques sur le réseau de drainage est négligeable (Yestappen, 1983).

Tableau 12 : Classement de rapport de bifurcation dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

| Rapport de bifurcation | Classes | Sous bassins versants |
|------------------------|---------|--|
| <3 | Faible | SBV02, SBV04, SBV05 ; SBV06, , SBV07, SBV09,SBV10, SBV11 |
| [3-5] | Médium | ----- |
| >5 | Élevé | SBV03 ; SBV08.SBV12 |

Les valeurs du rapport de bifurcation de la zone d'étude varient de 0 à 14.09 (Tab.9). Les sous bassins de l'Oued Joumouaa qui présentent des rapports de bifurcation à faibles valeurs (SBV02, SBV04, SBV05, SBV06, SBV07, SBV09, SBV10, SBV11) sont plus stables et non affectés par des perturbations structurelles. Par contre les autres sous bassins (SBV03, SBV08, SBV12) (Fig.37) ayant des valeurs élevées de Rb, ils montrent un contrôle structural résistant sur le réseau de

drainage. Le réseau hydrographique de l'Oued Joumouaa présente 1621 (Tab.09). Le nombre élevé de flux se trouve dans le SBV 07 (388) et le nombre minimum dans le SBV 11 (8). Ainsi la longueur du flux suit le nombre d'ordre des cours d'eau dans la hiérarchie des sous bassins versants, le SBV07 est le premier avec une longueur de 47.81 km et le dernier sous bassin versant est le SBV11 avec 2.73 km. On constate aussi que les dimensions des sous bassins versants et la variation de l'ordre sont en relation avec les conditions lithologiques, en effet le SBV07 possède des formations marneuses par contre le SBV11 recouvre des formations calcaires. Il est à noter aussi que la zone d'étude est caractérisée par des pentes importantes qui augmentent la vitesse de ruissellement et des conditions climatiques sévères Cela favorise le processus de l'érosion hydrique et la formation des Badlands.

F-Rapport d'écoulement (Lo)

Il dépend du relief, de la nature de roches, de la perméabilité, des facteurs climatiques, du couvert végétal et de l'érosion hydrique. Généralement, un écoulement lent désigne que la valeur de Lo est plus élevée. On le trouve dans les zones à faibles pentes ou l'érosion est faible. La longueur de l'écoulement dans un terrain plat est plus élevée par rapport à un terrain plus accidenté (Kumar, 2017). Cet indice est lié à la période de développement d'un bassin. De ce fait, il affecte l'évolution hydrologique, topographique et physiographique d'un bassin versant.

La longueur de l'écoulement de surface des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa varie de 0.95 à 2.12. La faible valeur de l'écoulement est marquée dans le SBV11 (0.95) ce qui désigne un mouvement de ruissellement rapide. Tandis que la valeur la plus élevée de la longueur de l'écoulement est enregistrée dans le SBV08 ce qui montre un processus de ruissellement lent.

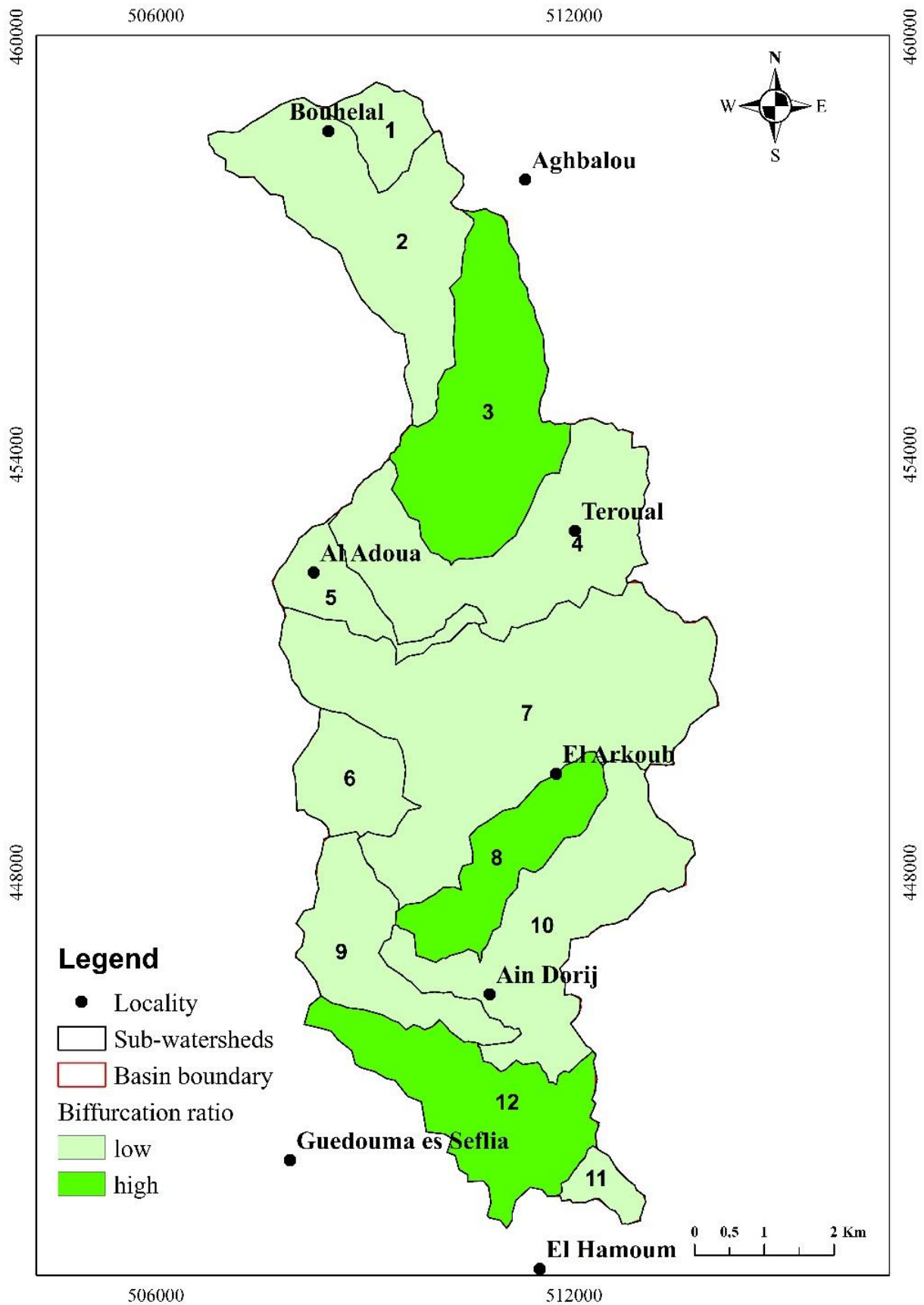


Figure 37: Classification du rapport de bifurcation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

2-3-Paramètre de forme

Les paramètres de forme d'un bassin versant est un attribut morphométrique très important, car ils sont liés à la distribution spatiale de plusieurs facteurs (Tab 13) notamment la densité (Dd) et la texture de drainage (Td), la fréquence du flux (Fu), le facteur de la forme (Ff), le rapport de circularité (Rc), le rapport d'élongation (Re), la longueur d'écoulement de surface (Lo), le coefficient de compacité (Cc) et le numéro de maintenance et d'infiltration du canal constant. (Benzgough,2019).

Tableau 13: Résultats des paramètres de forme dans le bassin de l'Oued Joumouaa.

| Sous-bassins versants | Densité de drainage (Dd) | Fréquence de flux (Fu) | Texture de drainage (Td) | Longueur de l'écoulement (Lo) | Infiltration (In) | Intensité de drainage (Din) | constante d'entretien du canal(C) |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| SBV01 | 2,47 | 10,22 | 0,66 | 1,24 | 25,30 | 4,13 | 0,40 |
| SBV02 | 3,29 | 30,36 | 1,47 | 1,65 | 100,03 | 9,22 | 0,30 |
| SBV03 | 3,97 | 36,82 | 2,08 | 1,99 | 146,27 | 9,27 | 0,25 |
| SBV04 | 3,63 | 18,04 | 1,58 | 1,82 | 65,52 | 4,96 | 0,28 |
| SBV05 | 4,04 | 27,27 | 0,77 | 2,02 | 110,10 | 6,76 | 0,25 |
| SBV06 | 2,73 | 19,62 | 0,98 | 1,36 | 53,52 | 7,19 | 0,37 |
| SBV07 | 3,41 | 27,70 | 2,11 | 1,71 | 94,55 | 8,12 | 0,29 |
| SBV08 | 4,25 | 32,86 | 1,36 | 2,12 | 139,60 | 7,74 | 0,24 |
| SBV09 | 3,40 | 23,74 | 1,07 | 1,70 | 80,63 | 6,99 | 0,29 |
| SBV10 | 3,81 | 28,18 | 1,41 | 1,90 | 107,34 | 7,40 | 0,26 |
| SBV11 | 1,89 | 11,61 | 0,34 | 0,95 | 22,00 | 6,13 | 0,53 |
| SBV12 | 3,68 | 24,51 | 1,45 | 1,84 | 90,20 | 6,66 | 0,27 |

Tableau 14: Apport de circularité, coefficient de compacité, rapport d'allongement et facteur de forme dans le bassin de l'Oued Joumouaa.

| Sous-bassins versants | Forme du bassin (Bs) | Rapport de circularité (Rc) | Coefficient de compacité (Cc) | Rapport d'allongement (Re) | Factor de forme (Ff) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------|
| SBV01 | 1,99 | 0,70 | 1,20 | 0,25 | 0,50 |
| SBV02 | 3,88 | 0,36 | 1,66 | 0,43 | 0,26 |
| SBV03 | 3,76 | 0,49 | 1,43 | 0,44 | 0,27 |
| SBV04 | 3,04 | 0,33 | 1,75 | 0,49 | 0,33 |
| SBV05 | 5,45 | 0,26 | 1,98 | 0,18 | 0,18 |
| SBV06 | 1,97 | 0,73 | 1,17 | 0,34 | 0,51 |
| SBV07 | 2,92 | 0,34 | 1,71 | 0,70 | 0,34 |
| SBV08 | 4,69 | 0,40 | 1,58 | 0,26 | 0,21 |
| SBV09 | 4,53 | 0,36 | 1,67 | 0,28 | 0,22 |
| SBV10 | 3,45 | 0,25 | 1,99 | 0,45 | 0,29 |
| SBV11 | 2,34 | 0,60 | 1,29 | 0,17 | 0,43 |
| SBV12 | 3,81 | 0,35 | 1,68 | 0,38 | 0,26 |

a-Densité de drainage

D'après Horton (1932), la densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface d'un bassin versant. Cette densité est contrôlée par la végétation, le climat, la nature du sol et du sous-sol, et la nature géologique des terrains (humbert ,1990).

Les travaux de (Melton, 1957 ; Strahler, 1964 ; Nag, 1998 ; Mesa 2006 ; Thomas et al. 2011 et Benzougagh et al, 2016 &2017) ont montré que les valeurs élevées de densité de drainage ($Dd > 3.50$) correspondent à des les terrains imperméables, les valeurs modérées de la densité de drainage [1.75-3.50] montrent que le sol et le sous-sol occupent une couverture végétale hautement perméables. Les faibles valeurs de densité de drainage [0-1.75] désignent que le sol et le sous-sol sont très perméables.

La densité de drainage des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa varie de 1.89 à 4.25. Les ensembles SBV01, SBV02, SBV06, SBV07, SBV09, SBV11 ont des valeurs de densité de drainage entre 1.75-3.50. (Tab.14) Ceci peut être expliqué par la présence d'une couverture végétale hautement perméable. Par contre les sous bassins SBV03, SBV04, SBV05, SBV08, SBV10, SBV12 ont une densité de drainage supérieure à 3.50 (Fig 37), ils sont caractérisés par des terrains marneux imperméables et une couverture végétale faible, le taux d'érosion du terrain se trouve ainsi élevé.

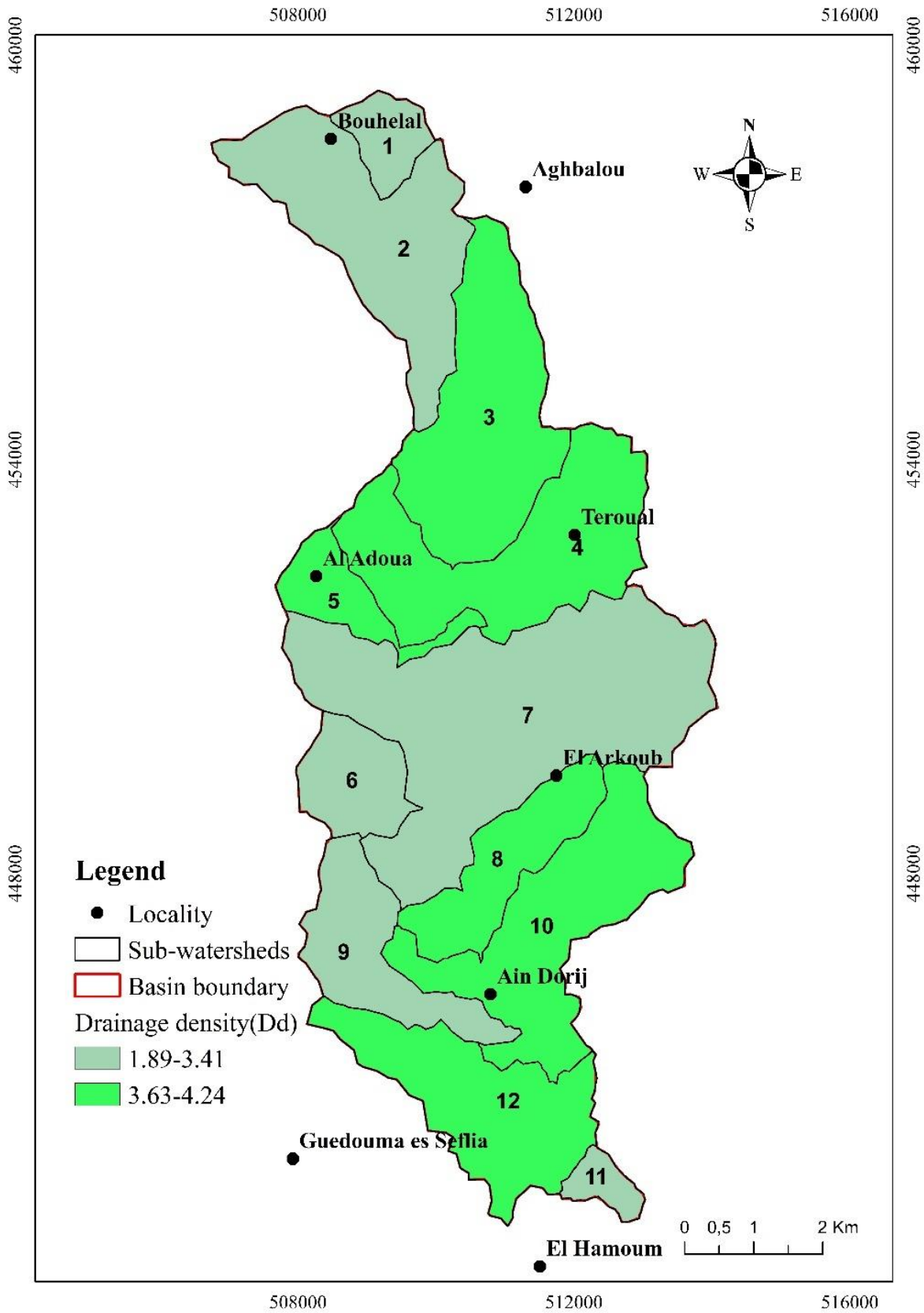


Figure 38: Densité de drainage du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

b-Fréquence de flux (Fs) :

Le flux de drainage est défini comme le nombre total des segments de tous les ordres du flux par unité de surface (Horton, 1932).

D'après Horton (1945) le calcul de la fréquence de flux se fait par la formule suivante

$$**Fs = Nu/A**$$

Avec :

-**Nu** : Nombre total des flux

- **A** : Surface du bassin

Dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa la valeur de la fréquence de flux est maximale dans le sous bassin versant (SBV03) et atteint 36,82 par contre dans le SBV01 la fréquence de flux est minimale et couvre 10.22. En général la zone d'étude présente des valeurs élevées de fréquence de flux cela est lié à des formations imperméables.

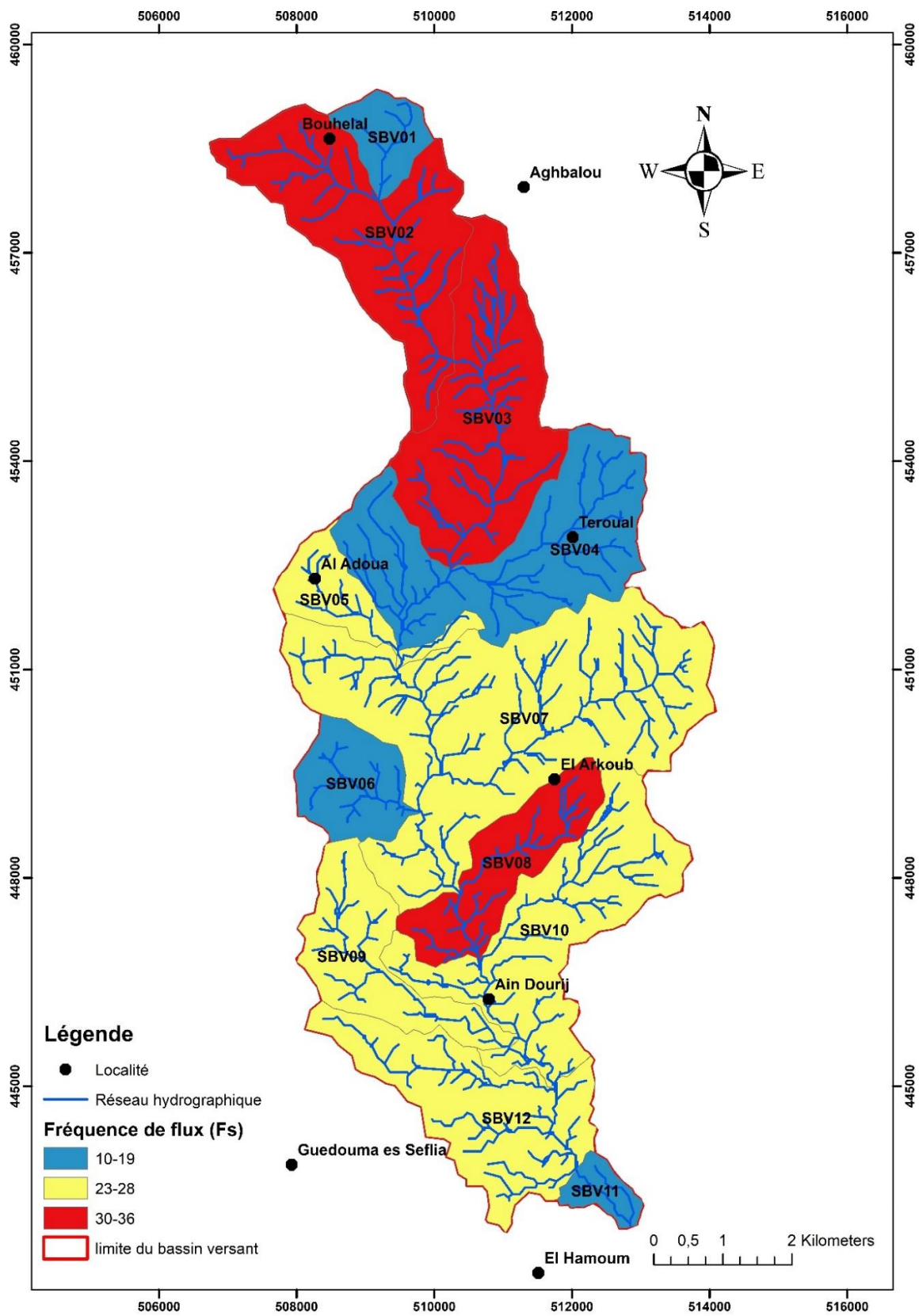


Figure 39: Fréquence de flux du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Nous observons que, F_u diminue avec l'augmentation du nombre de cours d'eau et est positivement corrélé avec les valeurs de densité de drainage du bassin versant (Fig 40)

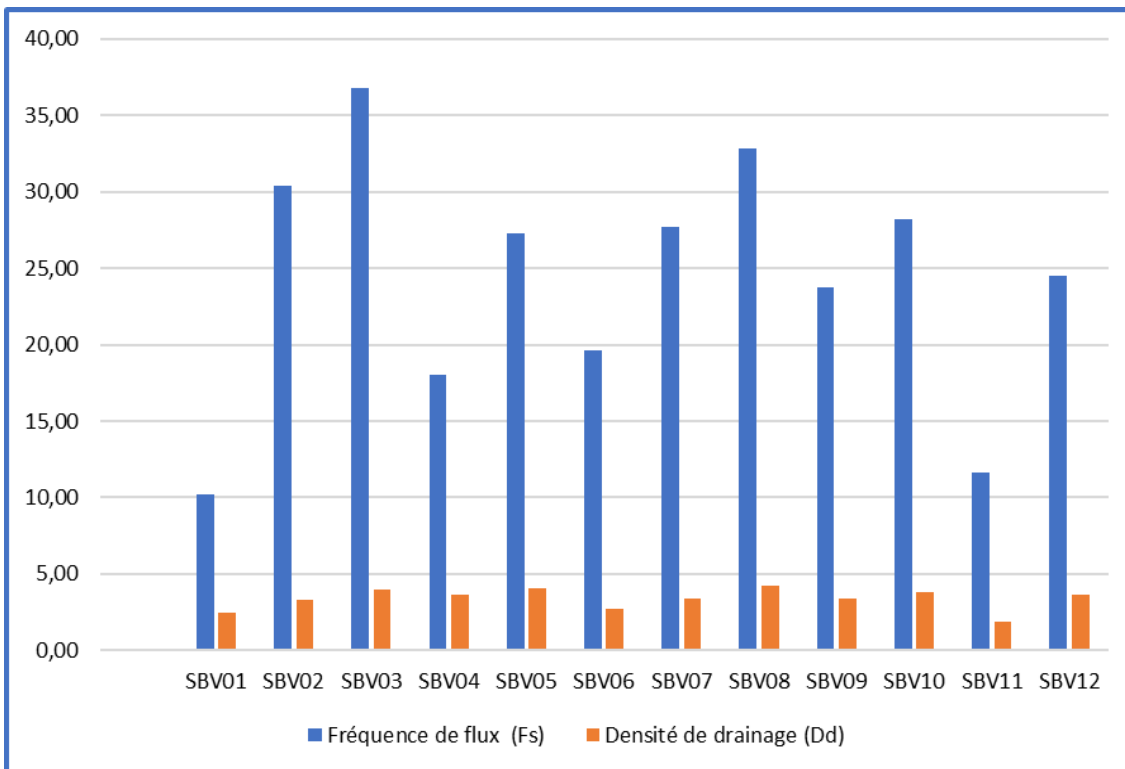


Figure 40: relation entre fréquence de flux et densité de drainage des 12 sous bassins versant de l'Oued Joumouaa.

Dans cette présente étude, la fréquence du flux a une valeur élevée de 36 dans le sous-bassin versant n°3, ce qui peut être attribué à un relief élevé et à une faible capacité d'infiltration. La faible valeur 10,22 dans le sous-bassin versant n°1 indique une faible valeur de ruissellement et une augmentation des segments des flux au fur et à mesure avec la densité de drainage.

c-Texture de drainage (Td)

La texture de drainage est le nombre total de segments de courant de tous les ordres dans le périmètre de la zone (Horton, 1945). Elle présente l'espacement des canaux dans un terrain fluviatile divisé et dépend de nombreux facteurs naturels tels que le climat, la végétation, les précipitations, le type du sol, la lithologie, le relief, la capacité d'infiltration (Smith, 1950 ; Vincy et al. 2012). D'après Smith 1950 cinq classes de texture de drainage ont été désignées (Tab 16).

Tableau 15: Classification de texture de drainage (Benzougagh,2019).

| Classe | Valeur de texture de drainage | Type de texture |
|--------|-------------------------------|-----------------|
| 01 | <2 | Très élevée |
| 02 | [2-4] | Elevée |
| 03 | [4-6] | Modérée |
| 04 | [6-8] | Fine |
| 05 | >8 | Très fine |

Les sous bassins versants de l'Oued Joumouaa présentent une texture de drainage qui varie de 0.34 à 2.11 (Tab.15). Deux catégories de texture de drainage y sont reconnues, très élevée pour tous les sous bassins (<2) sauf les SBV03 (2.08) et SBV07 (2.11) qui ont une texture de drainage élevée (Fig.41).

d-Intensité de drainage

L'intensité de drainage (Din) est le rapport entre la fréquence de flux et la densité de drainage (Faniran 1968). La valeur faible de densité de drainage signifie un faible impact de densité et de fréquence de flux sur les agents d'érosion du sol et vice versa (Fainiran 1968). Les valeurs de densité de drainage varient de 4.13 (sbv01) à 9.27 (sbv03). Généralement les valeurs de densité de drainage dans la zone d'étude sont plus élevées ce qui révèlent que la fréquence de flux (Fs) et la densité de drainage (Dd) ont un impact important sur la mesure dans laquelle l'écoulement de surface est élevé et la surface du sol a été érodée ceci rend le bassin sensible à l'érosion des ravines ainsi qu'à l'inondation.

e-La longueur de l'écoulement

La longueur de l'écoulement (Lo) de surface est définie comme étant la longueur de l'eau à la surface du sol avant qu'elle ne s'accumule dans les canaux des lignes d'eau définies (Horton, 1945). Cet indice est la moitié de densité de drainage Dd, $Lo=1/2Dd$. Il est inversement proportionnel à la pente moyenne du canal (Sunil et al, 2010 ; Shiva &Dharanirajan, 2014 ; Umair et Syed, 2014 ; Waikar et Nilawar, 2014), (Fig.42).

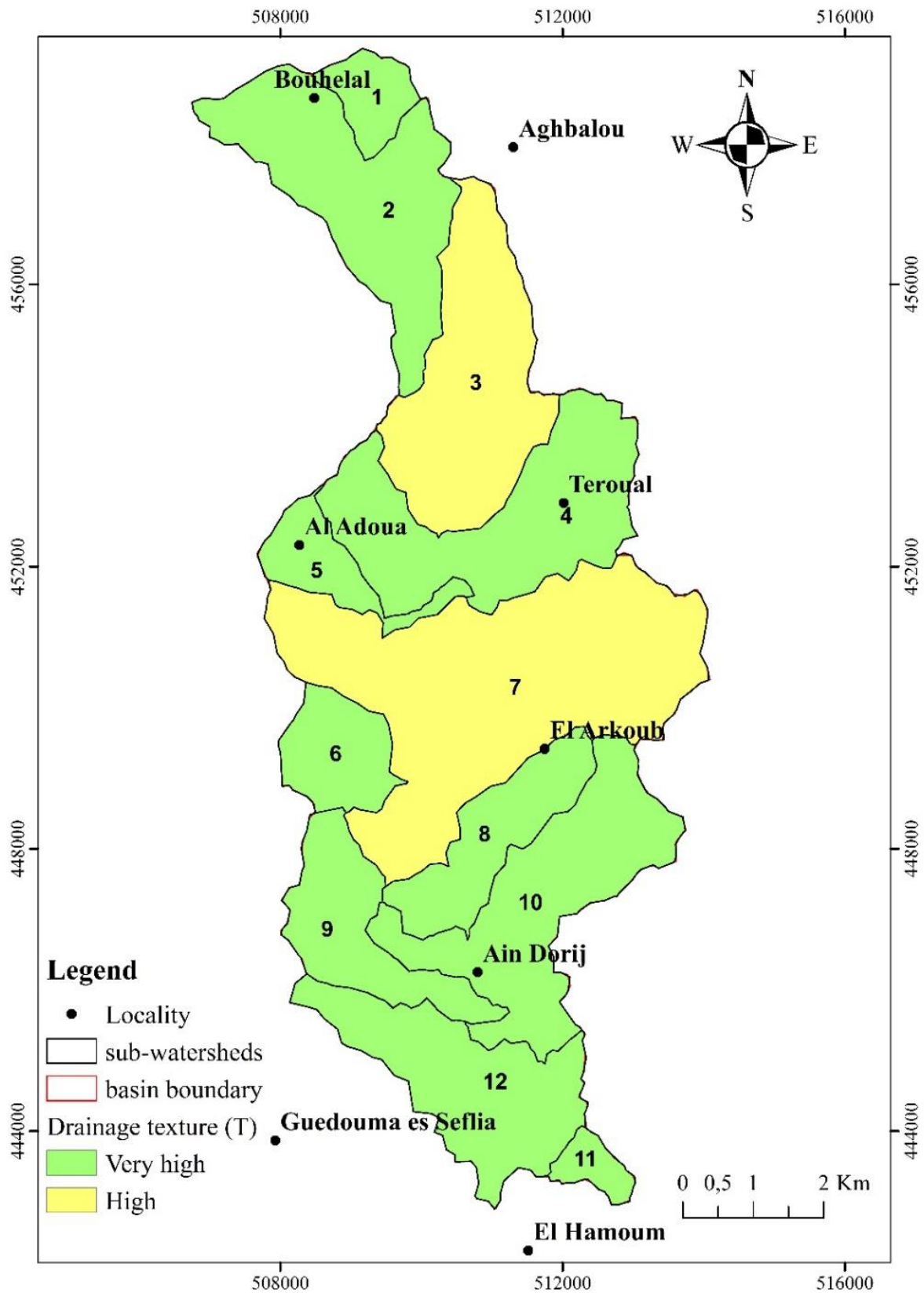


Figure 41: Carte de texture de drainage des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

F-Facteur de forme (Ff)

Le facteur de forme indique l'intensité du débit d'un bassin dans une zone définie, Horton (1932-1945) a présenté le facteur de forme comme étant le rapport entre la superficie du bassin et le carré de la longueur du bassin.

$$\mathbf{Ff=A/Lb^2}$$

Avec :

Ff : facteur de forme

A : superficie du bassin en km²

Lb : le carré de la longueur du bassin en km

Sa valeur varie de 0 à 1, plus la valeur du factor de forme est petite plus la forme du bassin est allongée. Le facteur de forme élevé dans un bassin correspond à un écoulement de plus courte durée, ainsi que la valeur moyenne de facteur de forme dans un sous bassin allongé correspond à un faible écoulement avec une longue durée. (Umak et al, 2017). Dans la zone d'étude le facteur de forme varie de 0.18 à 0.51 (Tab 14). On ne constate que les sous bassins versant étudiés allongés avec une durée de drainage plus longue (Fig 43).

G-Rapport d'allongement (Ra)

Le rapport d'allongement est défini comme étant le rapport entre le diamètre du cercle de même surface que le bassin de drainage et la longueur maximale du bassin (Schumm, 1956). En général, d'après Strahler (1964), les valeurs proches de 1 sont typiques des régions de très faible relief, alors que les valeurs dans la gamme de 0.6 à 0.8 sont généralement associées à de hauts reliefs et de forte pente. Les pentes variables du bassin versant peuvent être classé en se basant sur l'indice d'allongement, c'est-à-dire plus allongé (<0.5), allongé (0.5-0.7), moins allongé (0.7-0.8), ovale (0.8-0.9) et circulaire (0.9-1). Les valeurs du rapport d'allongement dans les douze sous bassins versants de l'Oued Joumouaa varient de 0.17 à 0.7. (Tab.14) Ce qui montre que tous les sous bassins ont une forme plus allongée sauf le SBV07 qui est allongé.

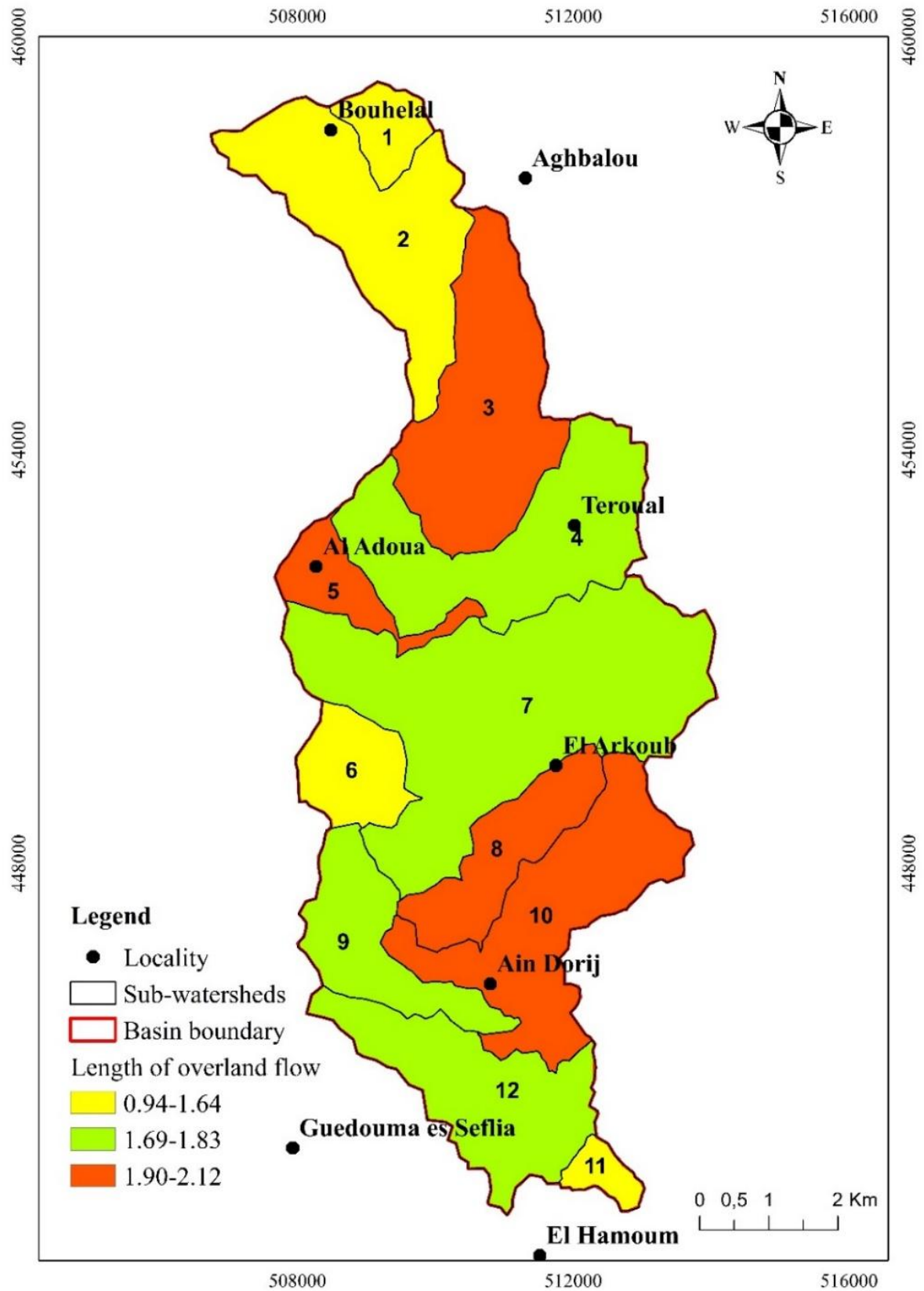


Figure 42: Carte de longueur d'écoulement du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

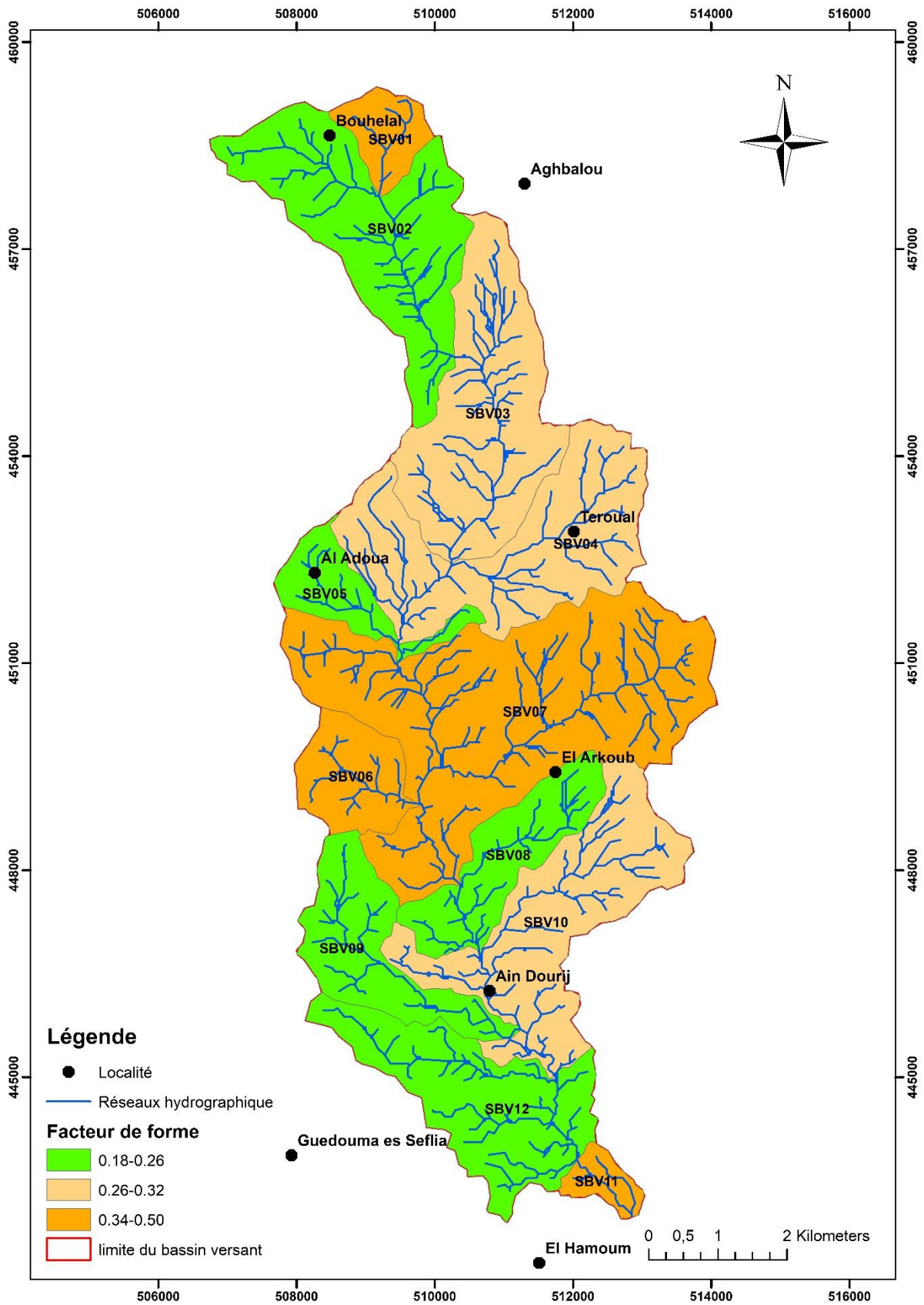


Figure 43: Carte de facteur de forme des sous bassins versant de l'Oued Joumouaa.

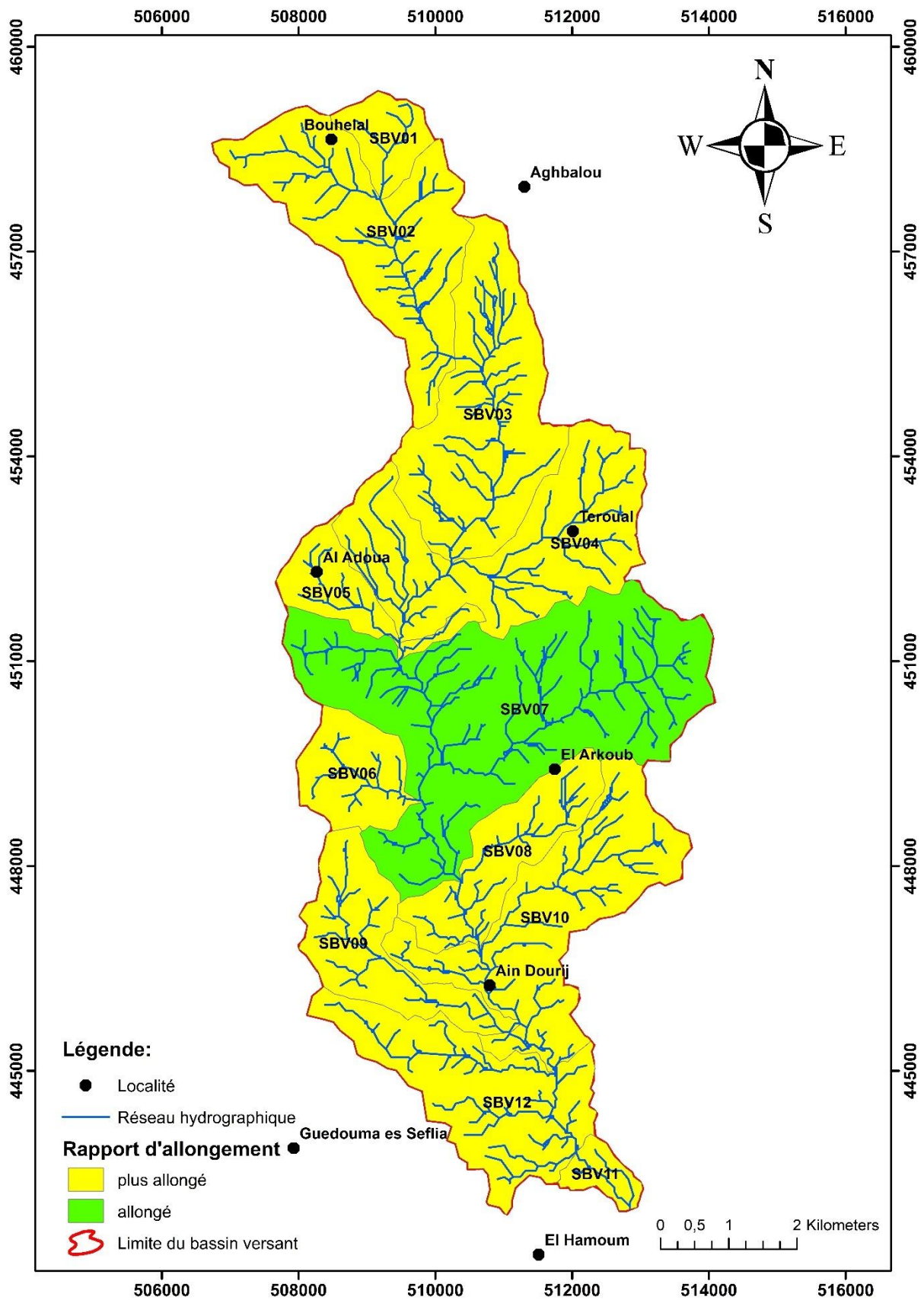


Figure 44: Carte du rapport d'allongement des sous bassins versant de l'Oued Joumouaa.

H-Coefficient de compacité (Cc)

Le coefficient de compacité est défini comme étant le rapport entre le périmètre d'un bassin et la circonférence d'un cercle au même bassin (Gravelius, 1914). Il est utile pour exprimer la relation d'un bassin circulaire et le bassin hydrologique. Cet indice est directement relatif à l'estimation du risque d'érosion c'est à dire que les grandes valeurs désignent une augmentation et une grande vulnérabilité du risque d'érosion et montrent le besoin de faire des mesures anti érosives de conservation. Mais les faibles valeurs indiquent une érosion faible (Umak et al, 2017). Dans la région étudiée la valeur du coefficient de compacité varie entre 1.17 et 1.99. La valeur la plus faible est marquée dans le SBV06 tandis que la valeur la plus élevée est notée dans le SBV 10 (Cc=1.99). D'après ce coefficient les SBV05 et SBV10 sont les plus exposés au risque d'érosion.

i-Constante d'entretien du canal (C)

Constante d'entretien du canal représente l'inverse de la densité de drainage (Dd) (Schumm, 1956). En fait, il s'agit d'une mesure de la surface de drainage requise pour maintenir une longueur unitaire de canal ou une cohérence de canal (Ritter et al.1995). Ce paramètre est contrôlé par plusieurs facteurs tels que le facteur de relief, de géologie, de climat, ect....

Dans cette étude les valeurs de constante d'entretien de canal varient de 0.24 (SBV08) à 0.53 (SBV11) (Fig.14). Ceci désigne que le sous bassin versant contient des formations rocheuses moins perméables, moins de maturité, moins de perturbations structurelles et un écoulement plus élevé que le sous bassin 11.

j-Infiltration (In)

L'indice d'infiltration est le résultat combiné de densité de drainage et la fréquence de flux et inversement proportionnelle à la capacité d'infiltration du bassin (Romshoo et al.2012). C'est –à dire plus le nombre d'infiltration est élevé plus la capacité d'infiltration est faible et par conséquent le ruissellement de surface sera plus élevé (Umrikar, 2017). Dans la zone d'étude les valeurs du nombre d'infiltration varient de 22 (SBV11) à 146 (SBV 03). Généralement le nombre d'infiltration est élevé dans tous les sous bassins versants. Ceci désigne que la capacité d'infiltration est plus faible au niveau du bassin versant (Fig.46).

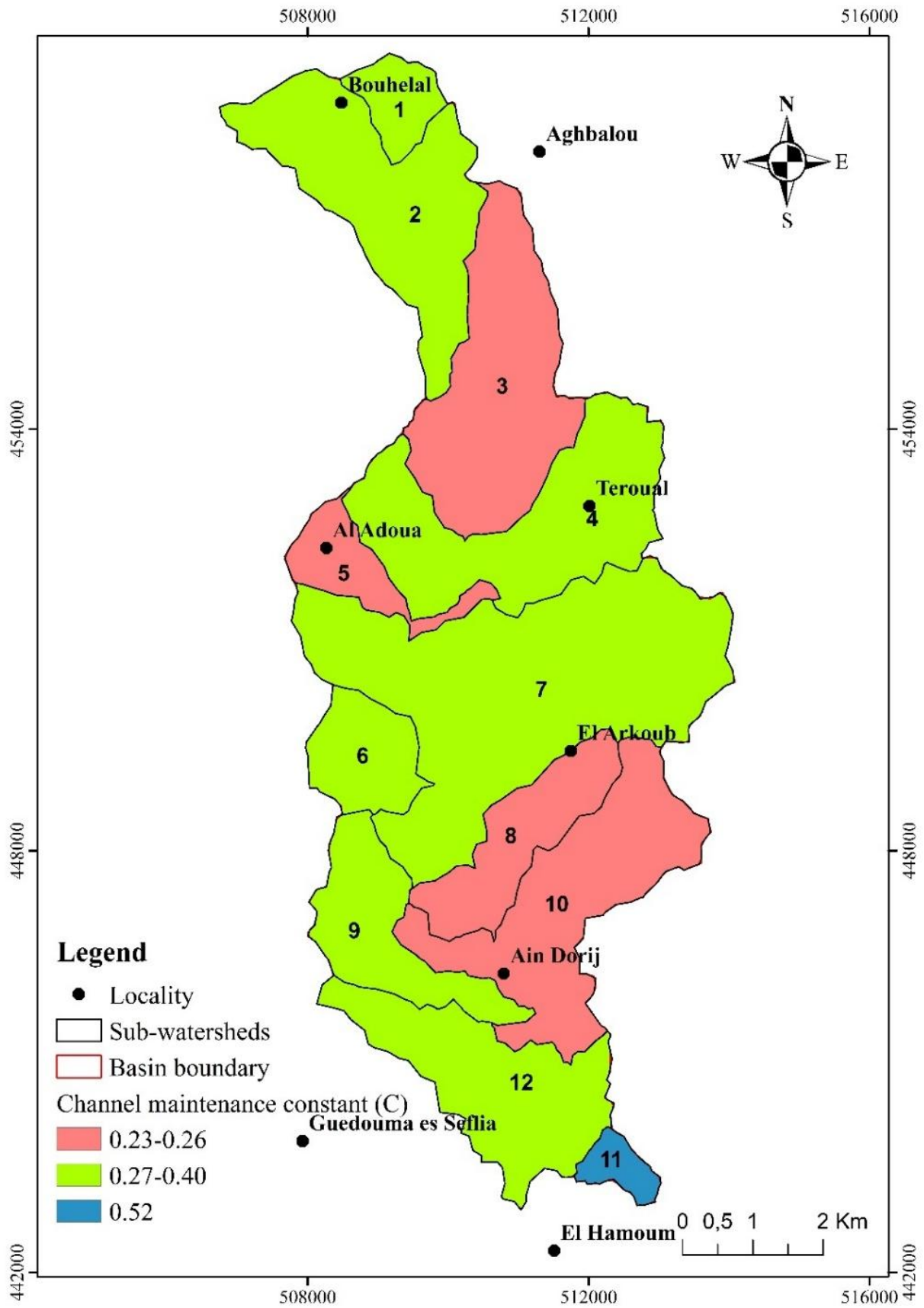


Figure 45: Carte d'entretien du canal du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

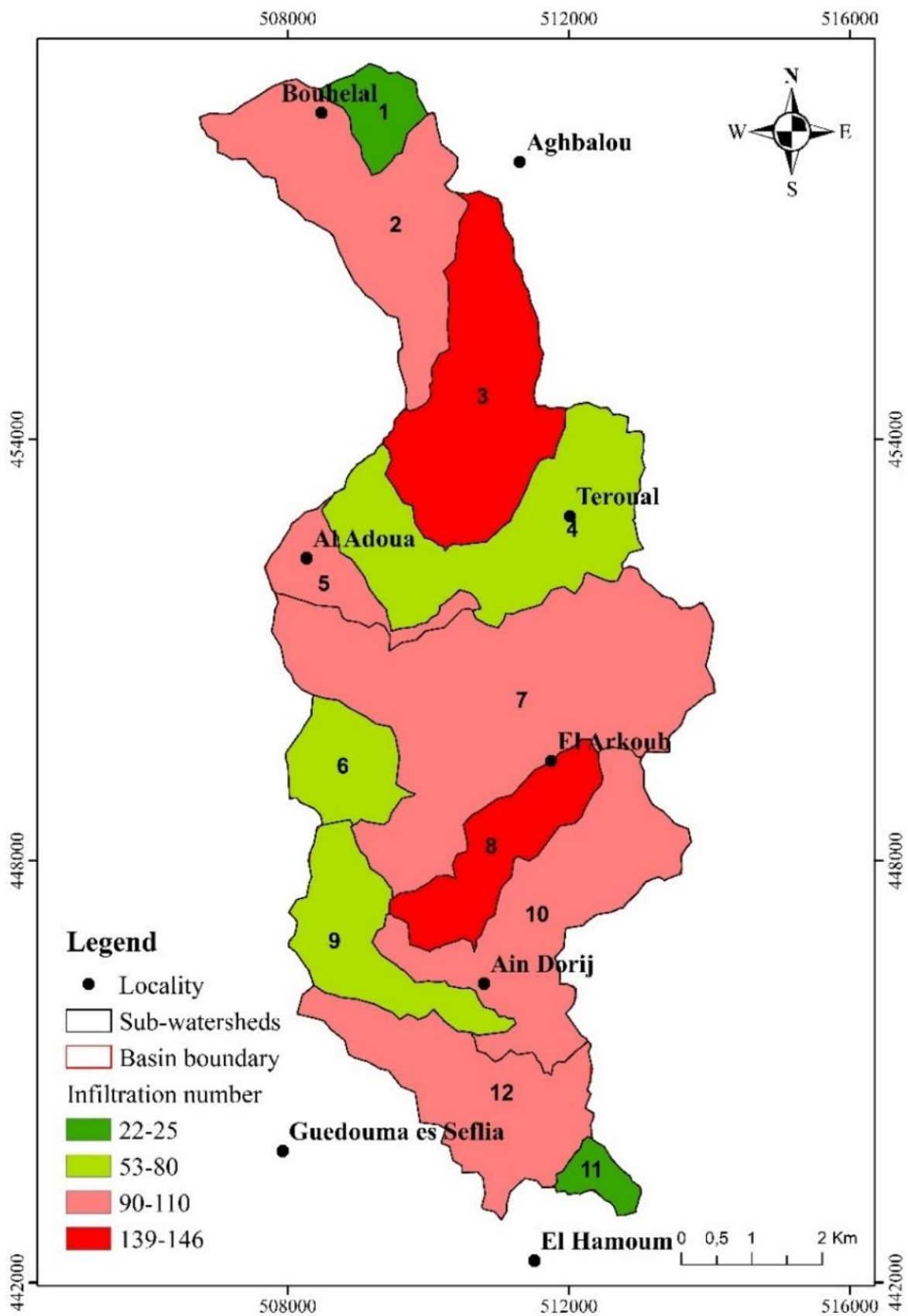


Figure 46: Valeur d'infiltration dans bassin versant de l'Oued Joumouaa.

k-Rapport de circularité (Rc)

Le rapport de circularité est défini comme étant le rapport entre la surface du bassin et la surface d'un cercle qui a la même circonférence que le périmètre du bassin (Miller ;1953). La formule suivante pouvant calculer ce rapport.

$$\mathbf{Rc = A /Ac} \quad \mathbf{ou} \quad \mathbf{Rc = 4\pi*A /P^2}$$

Avec :

- **Rc** : Rapport de circularité,
- **A** : Superficie du bassin (km²),
- **P** : périmètre du bassin (km),
- $\pi = \text{Cts} = 3,14$.

Ce rapport est contrôlé par plusieurs facteurs principalement La tectonique, la lithologie, la pente, le climat, l'occupation des sols, la fréquence de flux, la longueur et le couvert végétal du bassin. Le tableau montre la corrélation des valeurs du rapport de circularité avec les stades de vie du bassin (John Wilson et al, 2012 ; N. S. Magesh and N. Chandrasekar, 2012).

Tableau 16: Corrélation entre Rc et stade du cycle du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

| Valeur de Rc | Stade de cycle de vie du bassin |
|--------------|---------------------------------|
| Faible | Jeune |
| Moyenne | Mature |
| Élevée | Vieux |

Dans la zone d'étude les valeurs du rapport de circularité des sous bassins de l'Oued Joumouaa varient de 0.26 à 0.73 (Tab.16). Le stade le plus faible correspond au sous bassin jeune par contre les plus élevés correspondent au stade terminal de maturité du bassin versant.

Conclusion

La forme du bassin versant a un effet significatif sur les caractéristiques de débit des cours d'eau. Par exemple un bassin versant allongé ayant un rapport de bifurcation élevé devrait avoir alterné les crues. Par contre, un bassin versant rond ou circulaire avec faible valeur de bifurcation peut avoir un débit de crue important. La forme d'un bassin hydrographique a une grande influence sur le processus de ruissellement et de transport de sédiments de l'amont vers l'aval. La forme du bassin versant détermine également la vitesse avec laquelle pénètre dans le cours d'eau. L'expression quantitative du bassin versant peut-être caractérisée par le coefficient de compacité, facteur de forme, le rapport de circularité, la densité de drainage, l'indice d'infiltration, constant d'entretien du canal, le coefficient d'allongement, qui sont discutés dans la présente étude.

2-3-Paramètres de relief

Les paramètres de relief d'un sous bassin hydrographique sont également importants dans les études sur les ressources en eau. Les paramètres de relief sont liés de manière significative à l'étude des caractéristiques tridimensionnelles impliquant la superficie, l'altitude et le volume de la dimension verticale des reliefs pour analyser les caractéristiques géohydrologiques. Il est déterminé notamment le relief du bassin, le taux de relief, le relief relatif et le nombre de robustesse (Umair Ali and Syed Ahmad Ali, 2014).

Tableau 17 : Les paramètres de relief des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

| N°bassin | Relief du bassin en m | Nombre de robustesse (Rn) | Relief relatif (Rr) | Rapport de relief (Re) |
|----------|--------------------------|------------------------------|------------------------|---------------------------|
| SBV01 | 145 | 0,36 | 3.03 | 0,09 |
| SBV02 | 397 | 1,31 | 2.55 | 0,08 |
| SBV03 | 437 | 1,74 | 3.24 | 0,08 |
| SBV04 | 390 | 1,42 | 2.33 | 0,08 |
| SBV05 | 225 | 0,91 | 2.39 | 0,07 |
| SBV06 | 294 | 0,80 | 4.72 | 0,14 |
| SBV07 | 376 | 1,28 | 1.65 | 0,06 |
| SBV08 | 307 | 1,30 | 3.04 | 0,08 |
| SBV09 | 230 | 0,78 | 2.07 | 0,06 |
| SBV10 | 338 | 1,29 | 1.83 | 0,07 |
| SBV11 | 102 | 0,19 | 2.68 | 0,08 |
| SBV12 | 147 | 0,54 | 1.04 | 0,03 |

a-Relief du bassin (H)

Le relief du bassin est exprimé par la différence entre le point le plus élevé et le point (ligne de partage des eaux) le plus bas (exutoire) versant (Schumm, 1963 ; Kartic B. & Jatisankar B. 2013).

Ce facteur est important non seulement pour l'évolution des formes de relief, le débit des eaux du surface et souterraines, le drainage, la perméabilité et les propriétés d'érosion du terrain mais aussi pour la compréhension des caractéristiques de dénudation du bassin. (Magesh N. S & Chandrasekar N., 2012).

La formule suivante pouvant calculer le relief du bassin :

$$\mathbf{H = Hmax - Hmin}$$

Avec :

- **H** : Relief du bassin,
- **Hmax**: Point la plus élevé du bassin,
- **Hmin** : Point la plus bas du bassin

Les valeurs du relief de sous bassins d'Oued Joumouaa (Tab.17) varient entre 102m pour le SBV11 et 437m pour le SBV03. On conclure que les SBV01, SBV11, SBV12 ont des valeurs de relief du bassin faibles par contre les autres sous bassins (SBV02, SBV03, SBV04, SBV05, SBV06, SBV07, SBV08, SBV09, SBV10) ont un relief du bassin important, donc ils seront exposés à un drainage important et une faible infiltration.

b-Rapport de relief (Rh)

Le rapport de relief est le rapport entre le relief maximum et la distance horizontale le long de la plus grande dimension d'un bassin parallèle à la ligne de drainage principale. il consiste à mesurer l'inclinaison générale du bassin hydrographique (Schumm, 1956 ; Strahler, 1964).

Cette mesure est un indice de l'augmentation d'érosion se créant sur la pente du bassin versant. Le taux de relief augmente normalement avec la surface de drainage et la taille d'un bassin de drainage donné (Gottschalk, 1964).

La valeur élevée de Rh correspond aux caractéristiques de la région montagneuse. Rh, ainsi que le nombre de Robustesse (Rn), ont une corrélation directe avec l'érodibilité du bassin versant (Ameri et al, 2017).

Les valeurs du rapport du relief des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa varient de 0.03 à 0.14. La valeur la plus élevée est notée dans le SBV06 ce qui montre une pente ardue, par contre la valeur la plus faible est marquée dans le SBV12 ceci s'explique par une faible pente (Fig47).

c-Relief relatif (Rr)

Le relief relatif présente le rapport entre le relief maximum du bassin (H) et le périmètre du bassin versant (Melton, 1958). C'est un indicateur important pour l'évaluation des paramètres morphologiques généraux du terrain (Umair et Syed, 2014). La valeur élevée de relief relatif d'un sous bassin désigne que le potentiel de ruissellement est plus élevé que les autres (Umair et Syed, 2014).

La formule suivante pouvant calculer cet indice :

$$\mathbf{Rr = H*100/P}$$

Avec : **H** : relief du bassin et

P : périmètre du bassin

La valeur de relief relatif des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa varie de 1.05 pour le SBV12 à 4.72 pour le SBV 07 (Tab.17). On constate que la plupart des sous bassins ont un potentiel de ruissellement élevé.

d-Nombre de robustesse (Rn)

Pour combiner les qualités de la pente et de longueur de la pente, un nombre de rugosité sans dimension est formé du produit du relief du bassin (Hmax-Hmin) et de la densité de drainage (Dd) dans la même unité (Strahler, 1957 ; Melton, 1958). Le nombre de rugosité est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\mathbf{Rn=Dd*H/1000}$$

Avec **Rn** : nombre de rugosité,

Dd : densité de drainage.

H : relief du bassin.

Si la densité de drainage augmente alors que le relief du bassin reste constant, la distance horizontale moyenne entre les divisions et le canal adjacent est réduite, ce qui s'accompagne d'une augmentation de la pente. Si le relief du bassin augmente alors la densité de drainage reste constante, la différence d'altitude entre les divisions et les canaux adjacents augmente également, de sorte que l'inclinaison de la pente augmente.

Dans la zone étudiée les valeurs du numéro de robustesse de tous les sous bassins versants ont été calculés et indiqués dans le tableau 18. Elles varient entre 0.19 et 1.74 (Tab.10). La valeur la plus

faible est notée dans le SBV11 (0.19) et celle la plus élevée est marquée dans le SBV03 (1.74), (Fig.48 et 49).

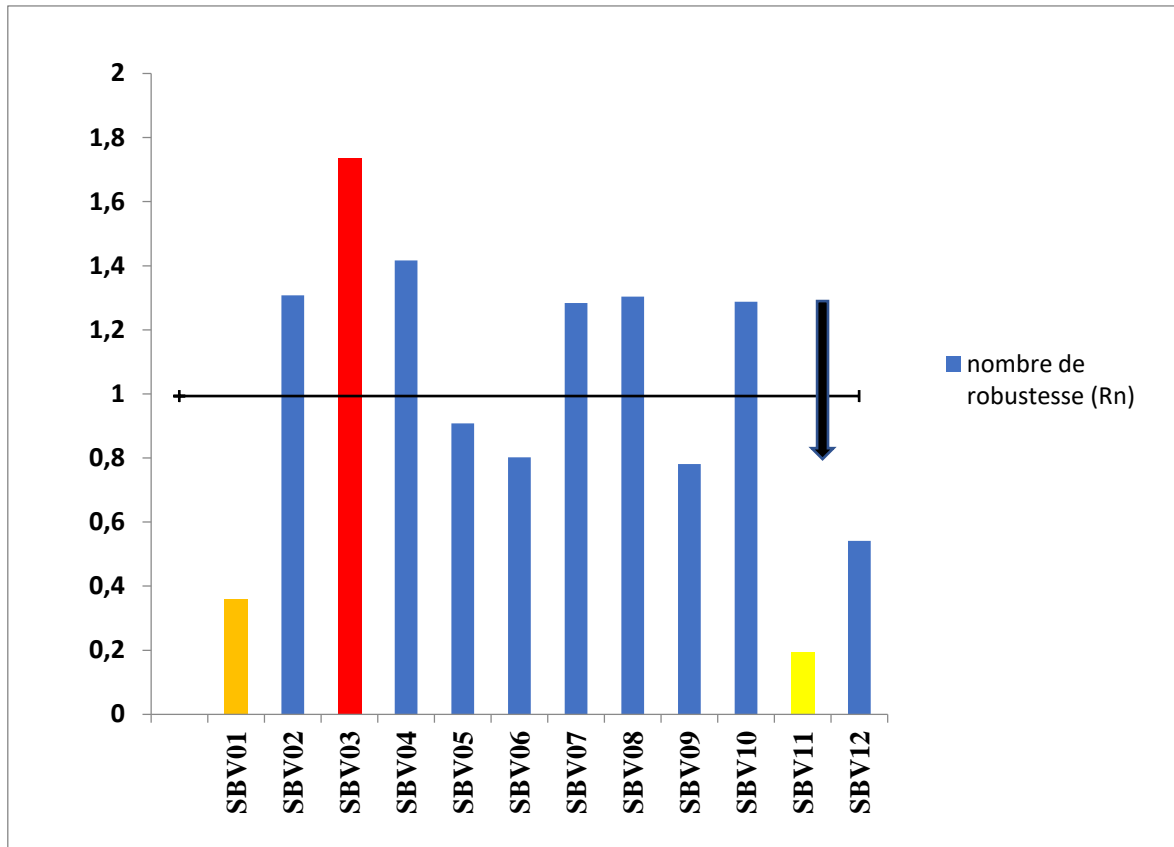


Figure 47: Nombre de robustesse des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

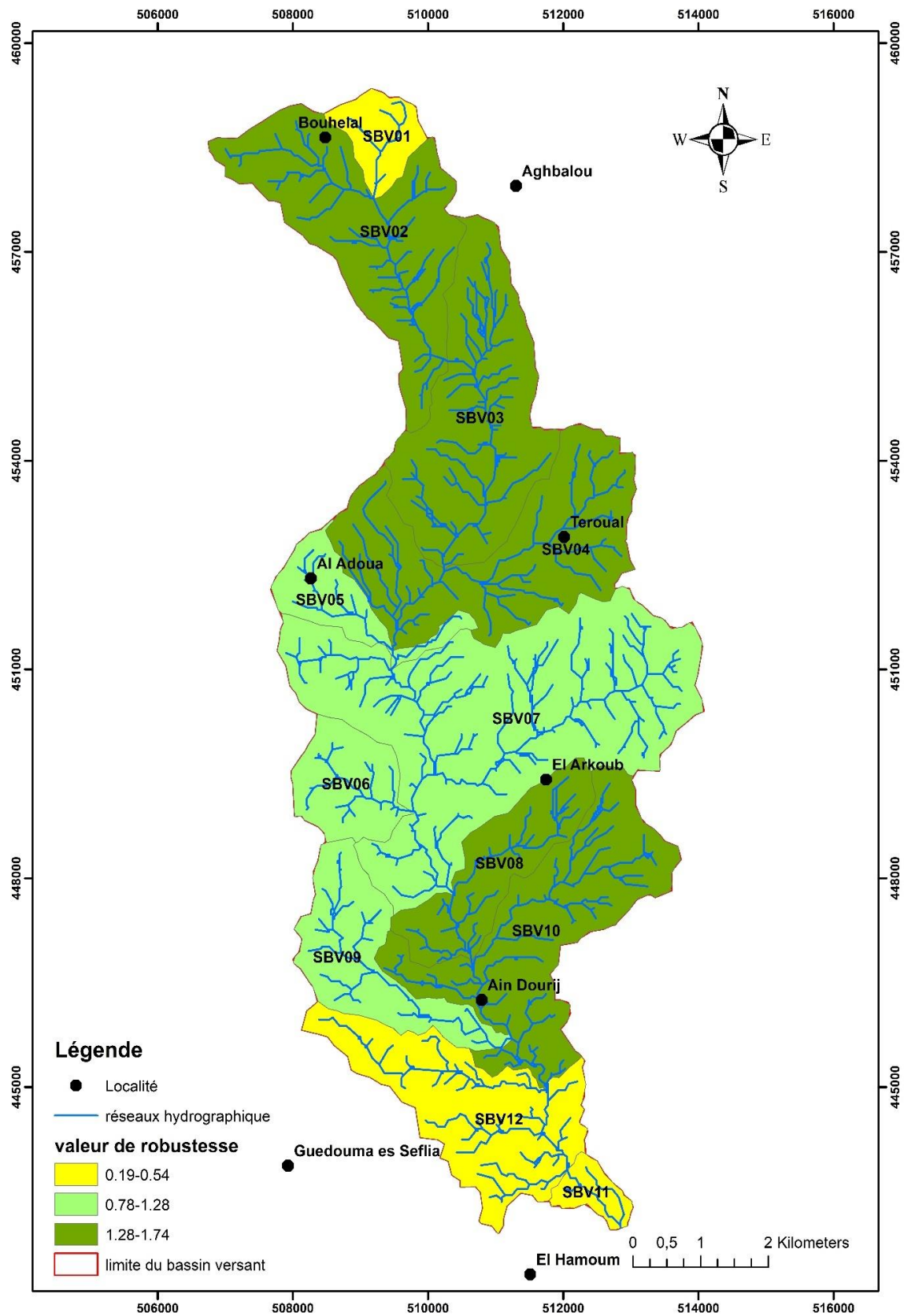


Figure 48: Carte de robustesse des sous bassins de l'Oued Joumouaa.

III-Matrice de corrélation des paramètres d'analyses morphométriques du bassin versant de l'Oued Joumouaa

Les paramètres d'analyse morphométriques sont généralement corrélés entre eux. La corrélation indique que certaines des informations contrôlées dans une variable le sont également dans certaines des autres variables résiduelles. Plus précisément, la première composante principale est cette combinaison linéaire des variables d'origine qui contribue au maximum à leur variance totale ; la deuxième composante principale, non corrélée avec la première, contribue au maximum à la variance résiduelle et ainsi de suite jusqu'à l'analyse de la variance totale.

Étant donné que la méthode dépend tellement de la variance totale des variables d'origine, elle convient mieux lorsque toutes les variables sont mesurées dans les mêmes unités (Sharma et al, 2014). Par conséquent, il est habituel d'exprimer les variables sous forme standard, c'est à dire de sélectionner l'unité de mesure pour chaque variable de sorte sa variance d'échantillon soit égale à un.

Ensuite, l'analyse est faite sur la matrice de corrélation, avec la variance totale égale à 1. la matrice d'intercorrélation a été élaborée à l'aide de dix paramètres morphométriques (linéaires et de forme) sélectionnés des douze sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

Lorsque ces 10 variables morphométriques ont été soumises à une matrice de corrélation, il a été observé qu'il existe une forte corrélation positive entre la densité de drainage (Dd), texture de drainage (Td), rapport de relief (Re), fréquence de flux (Fs), coefficient de compacité (Cc), numéro d'infiltration (If), et le nombre de robustesse (Rn). Il existe également une forte corrélation négative entre le facteur de forme (Ff), rapport de circularité (Rc) et la constante d'entretien du canal (C) avec la majorité des paramètres morphométriques.

Elle révèle qu'il existe de fortes corrélation (coefficient de corrélation supérieur à 0.9) entre fréquence de flux (Fs) et le numéro d'infiltration (If), entre densité de drainage (Dd) et le numéro d'infiltration (If) et entre le nombre de robustesse et le rapport de relief (Re). En outre, il existe des bonnes corrélations (coefficient de corrélation supérieur à 0.74) entre Dd et Re, Fs et Dd, Fs et Re, Rc et Ff, If et Re, C et If, Rn et Td, Rn et If, Rn et Fs.

Certains paramètres modérément corrélés (coefficient de corrélation supérieur à 0.6) étaient Dd et Td, Re et Td, Fs et Td, Cc et Dd, If et Td, Rn et Dd.

L'analyse de matrix de corrélation montre également que la fréquence de flux (Fs) présente le coefficient de corrélation le plus élevé (0.976) avec le numéro d'infiltration (If). Le rapport de circularité (Cc) montre la plus forte corrélation négative (-0.974) avec le coefficient de compacité (Cc).

Matrix de corrélation entre les paramètres morphométriques des sous bassins

| | Td | Dd | Re | Ff | Fs | Rc | Cc | If | C | Rn |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| Td | 1 | | | | | | | | | |
| Dd | 0,621 | 1 | | | | | | | | |
| Re | 0,676 | 0,799 | 1 | | | | | | | |
| Ff | -0,366 | -0,817 | -0,73 | 1 | | | | | | |
| Fs | 0,711 | 0,824 | 0,876 | -0,742 | 1 | | | | | |
| Rc | -0,439 | -0,74 | -0,621 | 0,848 | -0,562 | 1 | | | | |
| Cc | 0,334 | 0,703 | 0,548 | -0,771 | 0,487 | -0,974 | 1 | | | |
| If | 0,671 | 0,905 | 0,871 | -0,79 | 0,976 | -0,604 | 0,537 | 1 | | |
| C | -0,677 | -0,973 | -0,784 | 0,748 | -0,796 | 0,712 | -0,684 | -0,853 | 1 | |
| Rn | 0,828 | 0,727 | 0,916 | -0,477 | 0,789 | -0,486 | 0,425 | 0,779 | -0,738 | 1 |

IV-Prioritisation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa

La priorisation des sous bassins versant basée sur des paramètres morphométriques qui sont considérés comme étant des paramètres d'évaluation des risques d'érosion hydrique et inondations et ont été utilisé pour hiérarchiser les sous bassins versants (Biswas et al, 1999).

Tableau18: classement des paramètres linéaires dans les sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

| sous-bassins | Dd | class | Fu | class | Td | class | Rbm | class | Lo | class | In | class | Din | class | Ce | class |
|--------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|--------|-------|------|-------|------|-------|
| SBV01 | 2,47 | 11,00 | 10,22 | 12,00 | 0,66 | 11,00 | 1,85 | 6,00 | 1,24 | 11,00 | 25,30 | 11,00 | 4,13 | 12,00 | 0,40 | 2,00 |
| SBV02 | 3,29 | 9,00 | 30,36 | 3,00 | 1,47 | 4,00 | 2,26 | 4,00 | 1,65 | 9,00 | 100,03 | 5,00 | 9,22 | 2,00 | 0,30 | 4,00 |
| SBV03 | 3,97 | 3,00 | 36,82 | 1,00 | 2,08 | 2,00 | 14,09 | 1,00 | 1,99 | 3,00 | 146,27 | 1,00 | 9,27 | 1,00 | 0,25 | 10,00 |
| SBV04 | 3,63 | 6,00 | 18,04 | 10,00 | 1,58 | 3,00 | 1,58 | 9,00 | 1,82 | 6,00 | 65,52 | 9,00 | 4,96 | 11,00 | 0,28 | 7,00 |
| SBV05 | 4,04 | 2,00 | 27,27 | 6,00 | 0,77 | 10,00 | 1,94 | 7,00 | 2,02 | 2,00 | 110,10 | 3,00 | 6,76 | 8,00 | 0,25 | 11,00 |
| SBV06 | 2,73 | 10,00 | 19,62 | 9,00 | 0,98 | 9,00 | 0,86 | 10,00 | 1,36 | 10,00 | 53,52 | 10,00 | 7,19 | 6,00 | 0,37 | 3,00 |
| SBV07 | 3,41 | 7,00 | 27,70 | 5,00 | 2,11 | 1,00 | 1,80 | 8,00 | 1,71 | 7,00 | 94,55 | 6,00 | 8,12 | 3,00 | 0,29 | 6,00 |
| SBV08 | 4,25 | 1,00 | 32,86 | 2,00 | 1,36 | 7,00 | 5,77 | 3,00 | 2,12 | 1,00 | 139,60 | 2,00 | 7,74 | 4,00 | 0,24 | 12,00 |
| SBV09 | 3,40 | 8,00 | 23,74 | 8,00 | 1,07 | 8,00 | 0,97 | 11,00 | 1,70 | 8,00 | 80,63 | 8,00 | 6,99 | 7,00 | 0,29 | 5,00 |
| SBV10 | 3,81 | 4,00 | 28,18 | 4,00 | 1,41 | 6,00 | 2,01 | 5,00 | 1,90 | 4,00 | 107,34 | 4,00 | 7,40 | 5,00 | 0,26 | 9,00 |
| SBV11 | 1,89 | 12,00 | 11,61 | 11,00 | 0,34 | 12,00 | 0,00 | 12,00 | 0,95 | 12,00 | 22,00 | 12,00 | 6,13 | 10,00 | 0,53 | 1,00 |
| SBV12 | 3,68 | 5,00 | 24,51 | 7,00 | 1,45 | 5,00 | 5,89 | 2,00 | 1,84 | 5,00 | 90,20 | 7,00 | 6,66 | 9,00 | 0,27 | 8,00 |

Les paramètres linéaires ont une relation directe avec l'érodibilité, plus la valeur est élevée, plus l'érodibilité est élevée. Par conséquent, pour la priorisation des sous bassins versants la valeur la plus élevée des paramètres linéaires a été considéré comme étant de rang un, la deuxième valeur la plus élevée a été évaluée comme étant de rang deux et ainsi de suite. la valeur la moindre élevée est la dernière du classement. Le tableau (Tab.19) montre le classement des paramètres de forme de la zone d'étude en se basant sur la règle précédente.

Tableau 19: Classement des paramètres de forme dans les sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

| sous-bassins | Bs | class | Rc | class | Cc | class | Re | class | Ff | class |
|--------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| SBV01 | 1,99 | 2 | 0,70 | 11 | 1,20 | 2 | 0,25 | 3 | 0,50 | 11 |
| SBV02 | 3,88 | 9 | 0,36 | 7 | 1,66 | 6 | 0,43 | 8 | 0,26 | 4 |
| SBV03 | 3,76 | 7 | 0,49 | 9 | 1,43 | 4 | 0,44 | 9 | 0,27 | 6 |
| SBV04 | 3,04 | 5 | 0,33 | 3 | 1,75 | 10 | 0,49 | 11 | 0,33 | 8 |
| SBV05 | 5,45 | 12 | 0,26 | 2 | 1,98 | 11 | 0,18 | 2 | 0,18 | 1 |
| SBV06 | 1,97 | 1 | 0,73 | 12 | 1,17 | 1 | 0,34 | 6 | 0,51 | 12 |
| SBV07 | 2,92 | 4 | 0,34 | 4 | 1,71 | 9 | 0,70 | 12 | 0,34 | 9 |
| SBV08 | 4,69 | 11 | 0,40 | 8 | 1,58 | 5 | 0,26 | 4 | 0,21 | 2 |
| SBV09 | 4,53 | 10 | 0,36 | 6 | 1,67 | 7 | 0,28 | 5 | 0,22 | 3 |
| SBV10 | 3,45 | 6 | 0,25 | 1 | 1,99 | 12 | 0,45 | 10 | 0,29 | 7 |
| SBV11 | 2,34 | 3 | 0,60 | 10 | 1,29 | 3 | 0,17 | 1 | 0,43 | 10 |
| SBV12 | 3,81 | 8 | 0,35 | 5 | 1,68 | 8 | 0,38 | 7 | 0,26 | 5 |

Les paramètres de forme ont une relation inverse avec l'érodibilité (Ratnam et al, 2005 & 2015; Benzougagh et al, 2016 & 2017) plus la valeur est faible, plus l'érodibilité est élevée. Ainsi la valeur la plus basse des paramètres de forme était considérée comme étant de rang 1, la valeur la plus basse suivante était considéré comme étant de rang 2 et ainsi de suite. la valeur la plus élevée a été classée au dernier rang. Par conséquent, le classement des sous bassins versants a été déterminé en transmettant la priorité/le rang le plus élevé en fonction de la valeur la plus élevée dans le cas de paramètres linéaires et la valeur la plus faible dans le cas de paramètres de formes.

Par la suite, le classement a été effectué en fonction de tous les paramètres individuels, les valeurs de classement pour tous les paramètres linéaires et de forme de chaque sous bassin versant ont été additionnées pour chacun des douze sous bassins versants pour obtenir la valeur de facteur composé (cp). Les sous bassins versants ont été classés en trois catégories : faible, moyenne, et élevé, selon la valeur de facteur composé (Tab 20).

L'objectif final de ce travail est l'élaboration d'une carte de priorisation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

Tableau 20: Résultats de priorisation de l'analyse morphométrique des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

| Les paramètres morphométriques | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----|----|----|-----|----|-----|----|----|---------------------|----|----|----|----|-------|-----------|-----------------|
| Paramètres linaires | | | | | | | | | Paramètres de forme | | | | | Somme | Valeur cp | Priorité finale |
| Sous-bassins | Dd | Fs | Td | Rbm | Lo | Din | In | Ce | Re | Ff | Rc | Bs | Cc | ***** | ***** | ***** |
| 1 | 11 | 12 | 11 | 6 | 11 | 12 | 11 | 2 | 3 | 11 | 11 | 2 | 2 | 105 | 8,08 | Faible |
| 2 | 9 | 3 | 4 | 4 | 9 | 2 | 5 | 4 | 8 | 4 | 7 | 9 | 6 | 74 | 5,69 | Élevée |
| 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 10 | 9 | 6 | 9 | 7 | 4 | 57 | 4,38 | Élevée |
| 4 | 6 | 10 | 3 | 9 | 6 | 11 | 9 | 7 | 11 | 8 | 3 | 5 | 10 | 98 | 7,54 | Médium |
| 5 | 2 | 6 | 10 | 7 | 2 | 8 | 3 | 11 | 2 | 1 | 2 | 12 | 11 | 77 | 5,92 | Élevée |
| 6 | 10 | 9 | 9 | 10 | 10 | 6 | 10 | 3 | 6 | 12 | 12 | 1 | 1 | 99 | 7,62 | Médium |
| 7 | 7 | 5 | 1 | 8 | 7 | 3 | 6 | 6 | 12 | 9 | 4 | 4 | 9 | 81 | 6,23 | Élevée |
| 8 | 1 | 2 | 7 | 3 | 1 | 4 | 2 | 12 | 4 | 2 | 8 | 11 | 5 | 62 | 4,77 | Élevée |
| 9 | 8 | 8 | 8 | 11 | 8 | 7 | 8 | 5 | 5 | 3 | 6 | 10 | 7 | 94 | 7,23 | Médium |
| 10 | 4 | 4 | 6 | 5 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 7 | 1 | 6 | 12 | 77 | 5,92 | Élevée |
| 11 | 12 | 11 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 1 | 1 | 10 | 10 | 3 | 3 | 109 | 8,38 | Faible |
| 12 | 5 | 7 | 5 | 2 | 5 | 9 | 7 | 8 | 7 | 5 | 5 | 8 | 8 | 81 | 6,23 | Élevée |

Tableau 21 : Priorité finale de l'analyse morphométrique des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

| Sous-bassins | Valeur de cp | Ordre de priorité | Priorité finale |
|--------------|--------------|-------------------|-----------------|
| SBV01 | 8,077 | 11 | Faible |
| SBV02 | 5,692 | 3 | Élevée |
| SBV03 | 4,385 | 1 | Élevée |
| SBV04 | 7,538 | 9 | Médium |
| SBV05 | 5,923 | 4 | Élevée |
| SBV06 | 7,615 | 10 | Médium |
| SBV07 | 6,231 | 7 | Élevée |
| SBV08 | 4,769 | 2 | Élevée |
| SBV09 | 7,231 | 8 | Médium |
| SBV10 | 5,923 | 5 | Élevée |
| SBV11 | 8,385 | 12 | Faible |
| SBV12 | 6,231 | 6 | Élevée |

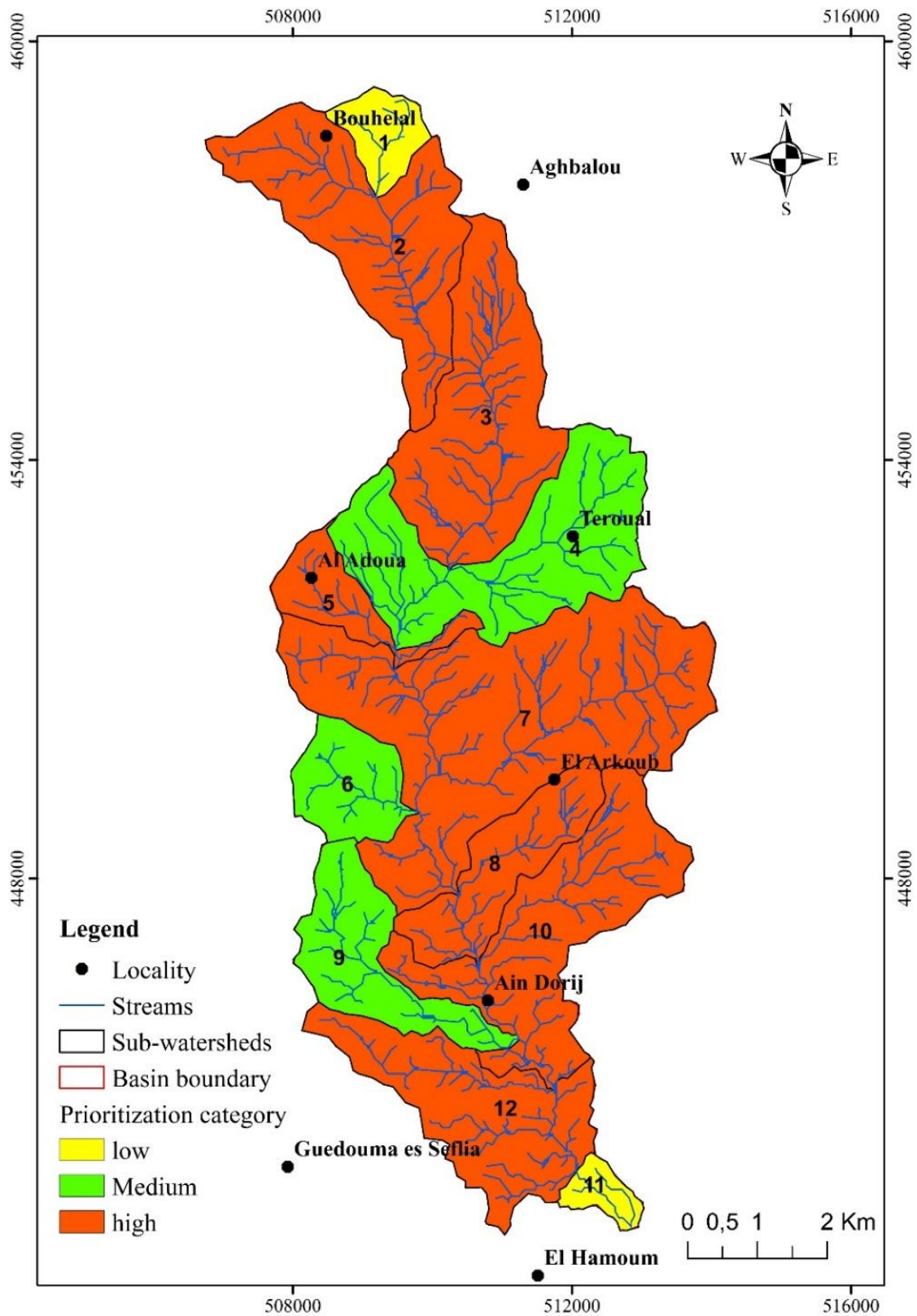


Figure 49: Carte de priorisation des sous bassins versants de l'Oued Joumouaa.

Conclusion

La Prioritisation des bassins versants est l'une des approches les plus pertinentes dans la planification, la gestion des risques naturels et la mise en œuvre des programmes de développement durable.

Les paramètres morphométriques des différents sous bassins versant obtenus dans cette étude montrent la réponse hydrologique et leurs caractéristiques relatives. Ils permettent une hiérachisation des sous bassins versants en terme de priorisation.

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est exposé aux divers risques naturels, dont les inondations, l'érosion hydrique et glissement de terrain sont les plus importants. Cette dégradation de l'environnement est due à des facteurs physiques (géologie, lithologie, précipitations, relief, faible couverture végétale) et anthropiques.

Dans la présente étude nous nous intéressons aux risques d'érosion et d'inondations (risque hydrologique), en se basant sur les paramètres morphométriques qui sont : les paramètres de base (superficie du bassin , périmètre du bassin et longueur du bassin), les paramètres linéaires (ordre de flux, nombre de flux, longueur de flux, longueur de flux moyenne, rapport de longueur du flux et rapport de bifurcation), paramètres de forme (densité de drainage, fréquence de flux, texture de drainage, facteur de forme, rapport de circularité, rapport d'élongation, longueur d'écoulement, coefficient de compacité, numéro d'infiltration, et constante d'entretien du canal) et les paramètres de relief (relief du bassin, rapport de relief, relief relatif et numéro de robustesse).

Les résultats de l'analyse morphométrique montrent que les sous bassins versants SBV02, SBV03, SBV05, SBV07, SBV08, SBV10 et SBV12 relèvent une priorité élevée et sont plus susceptibles à la dégradation des sols et au risque élevée d'érosion des sols. Tandis que les sous bassins versants SBV04, SBV06 et SBV09 sont vulnérables au risque d'érosion ce qui traduit la priorité moyenne en termes des mesures d'urgence appropriées à la protection et conservation des sols et contrôle des risques d'érosion hydrique des sols sont nécessaires dans ces sous bassins versants. Enfin la présente étude est importante pour lutte contre l'érosion, la gestion des bassins versants, la planification des ressources en terre et en eau et le potentiel futur lié à l'étude de ruissellement.

***Chapitre V : Cartographie et la
modélisation du bassin versant de l'Oued
Joumouaa par les directives PAP/CAR***

Chapitre V : La cartographie et la modélisation du bassin versant de l'Oued Joumouaa par les directives PAP/CAR

Résumé

Cette étude s'intéresse à cartographier les zones vulnérables à l'érosion hydrique par la méthode PAP/CAR (Programmes d'Activité Prioritaire/Centre d'Activités Régionales) et les systèmes d'information géographiques (SIG) au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa, Situé dans le Prérif occidental. La carte synthétique de la phase prédictive montre la répartition des états érosifs, avec 36.21% de la superficie du bassin soumis à une érosion élevée à extrême. La phase descriptive fournit des informations sur la répartition des différentes formes d'érosion et montre la dominance de l'érosion en nappe qui occupe 76.6% de la surface totale du bassin. La troisième phase de PAP/CAR est la superposition des résultats des phases prédictives et descriptives donne la carte consolidée qui se caractérise par des altérations fortes de sol en relation avec des ravins moyennement profonds situé dans la partie médiane du bassin versant. Ces formes peuvent être dues à l'absence du couvert végétal, à la forte pente et à l'agressivité des précipitations.

I- Introduction

Le risque d'érosion est l'une des plus grandes problématiques environnementales qui touche le monde entier. Les pays méditerranéens à climat semi-aride, ne sont pas à l'abri de cette problématique environnementale et essentiellement le Maroc dont plus de 40 % des terres sont menacées par le risque d'érosion hydrique et la situation continue à se dégrader (FAO, 1990). L'ampleur du phénomène est plus importante dans les collines du Rif et Prérif qui ne couvrent que 6 % du territoire Marocain, mais qui produisent plus que 60 % de sédiments (Benzougagh, 2019). Selon le Haut-commissariat des Eaux et Forêt et à la lutte contre la désertification l'érosion hydrique touche plus que 23 Millions ha.

Cette situation est liée aux changements climatiques à l'échelle globale. Elle est favorisée par plusieurs facteurs, lithologiques (fragilité des terrains), climatiques (forte intensité pluviométrique), géomorphologiques (déclinaison, pentes), hydrologiques (réseau dense et ramifié), pédologique (sols argileux) et anthropiques (déforestation, technique culturale, construction des ouvrages d'art, ...), couvert végétal, et socio-économiques, sont toutes favorables à l'accélération du processus de l'érosion (Benzougagh, 2019). Les dégâts causés par l'érosion sont nombreux :(dégradation des infrastructures) ; (inondation, réduction de la fertilité et la productivité des sols), (réduction de la

capacité de stockage des eaux dans les barrages et l'envasement des barrages) Sur le plan social, la dégradation des sols accentue le niveau de pauvreté et par conséquent l'immigration des populations vers les villes. De point de vue économique, l'agriculture est touchée par la diminution de la productivité des terrains cultivés, les infrastructures routières et hydraulique (barrages) n'en sont pas à l'abri de ce risque : elles sont majoritairement détruites. Face à cette situation, la gestion durable des ressources naturelles est recommandée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour une meilleure connaissance du phénomène d'érosion, notamment : l'analyse morphométrique, l'équation universelle de perte en sol (USLE), et sa version révisée (Revised Universal Soil Loss Equation = RUSLE), PAP/CAR, (1998) ...etc. Pour cette étude on s'intéresse à la méthode de PAP/CAR dont plusieurs études antérieures effectuées sur plusieurs bassins versants montrent leur importance pour la cartographie de l'érosion quantitative et la modélisation des facteurs responsables à la genèse de ce risque ; parmi ces études, celles de : Aboulabbass et al., 2005 ; Mesrar et al., 2015 ; Boukrim et al., 2016 ...

L'objectif de la présente étude est la cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique en se basant sur les directives du modèle PAP/CAR qui porte sur l'intégration des facteurs naturels influençant l'érosion hydrique, à savoir : l'érodibilité, la pente, le type de sol, la lithologie et le couvert végétal. La réalisation de cet objectif fait appel à la combinaison des directives de l'approche PAP/CAR et les techniques de la télédétection spatiale, les systèmes d'information géographique (SIG) dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa (59Km²). Le but étant d'élaborer une carte thématique des zones prioritaires du risque d'érosion pour aider les décideurs à choisir les mesures préventives nécessaires pour réduire l'impact du risque d'érosion sur la population, leur bien et sur l'environnement.

II- Approche Méthodologique et Matériel Utilisé

L'approche PAP/CAR (1998) vise immédiatement à rendre disponible un outil méthodologique et une source d'information pour la mise en œuvre des projets et programmes de la gestion du contrôle de l'érosion et à long terme, de contribuer à atténuer et mieux contrôler les processus de l'érosion pour améliorer l'utilisation des terres, rationaliser l'exploitation des ressources en terres et à améliorer les conditions de vie et la sécurité alimentaire de populations.

La PAP/CAR est une méthode qualitative de l'érosion hydrique qui permet d'hiérarchiser la surface du bassin versant en unités distinctes selon la vulnérabilité à l'érosion et de déterminer les zones les plus fragiles.

Elle est constituée de trois phases (Fig.51) : une phase prédictive consistant en une cartographie des facteurs influençant l'érosion hydrique tels que : la lithologie, la pente, occupation du sol et le couvert végétal. Une phase descriptive se basant sur la cartographie de l'érosion réelle, elle consiste à identifier, décrire et évaluer les processus actuels d'érosion sur la zone d'étude, ainsi que les différents degrés d'exposition à la dégradation. Et une 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 thématique finale qui aboutit à l'identification et l'évaluation du risque d'érosion.

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

Les images satellitaires Landsat 8 et Google Earth, le modèle numérique du terrain (MNT) de type ASTER GDEM de 30 m de résolution, les cartes topographiques et géologiques de la zone d'étude (Teroual-Oulad aissa au 1/50000), et les observations sur le terrain, ont permis de délimiter le secteur d'étude et la réalisation des différentes cartes thématiques, en faisant appel aux fonctionnalités des logiciels dédiés à la télédétection et au Système d'Information Géographique (SIG). Ces données ont été géoréférencées au système de coordonnées Maroc.

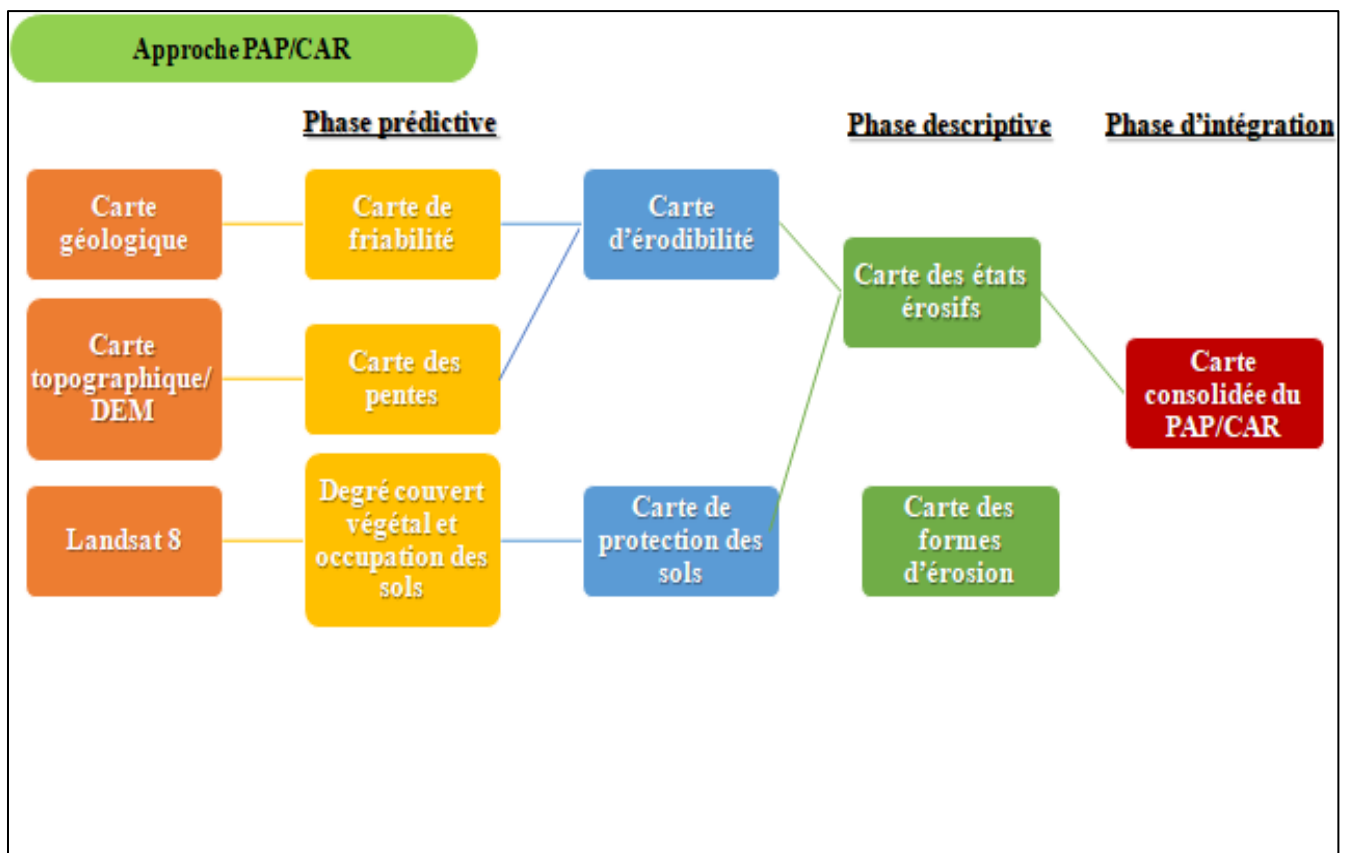


Figure 50: Méthodologie adoptée pour la cartographie d'érosion du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

III- Résultats et discussions

1- La phase prédictive

La phase prédictive ; consiste à identifier, évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels la physiographie (pentes), la lithologie et/ou les sols, le couvert végétal, dans le but de déterminer des hypothèses préliminaires concernant le risque d'érosion.

1-1 Carte des pentes

La pente est l'un des facteurs pertinents pour l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion (Benzougagh et al., 2017). La raideur de la pente favorise exponentiellement la vitesse du ruissellement et par conséquent l'arrachement et le déplacement des particules du sol (Ben Rhoumaet al., 2018). L'élaboration de la carte des pentes a été dérivé à partir du Modèle numérique du terrain (MNT) d'images ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) avec une résolution de 30 m. En effet, cette carte a été répartie en cinq classes selon les directives de PAP/CAR (Tab.22).

Tableau 22: Les classes de risque lié à la valeur de pente de bassin versant de l'Oued Joumouaa.

| Les classes des pentes | Valeurs de pente (en %) | Degré de risque |
|------------------------|-------------------------|-----------------|
| 01 | 0-3 % | Nulle à faible |
| 02 | 3-12% | Modérée |
| 03 | 12-20% | Abrupte |
| 04 | 20-35% | Très abrupte |
| 05 | >35% | Extrême |

L'interprétation de la carte des pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa (Fig.51), montre que le degré des pentes est généralement élevé au Nord et faible dans la partie aval, tandis que la partie médiane du bassin présente des degrés élevés de l'est vers l'ouest. L'analyse de la base de données de la carte des pentes montre également que la classe <3% (faible) et 3% à 12% (modérée) occupent respectivement 8,63% et 33% de la superficie totale du bassin soit respectivement (5.1 km²) et (19.25 km²). Alors que la classe 12% à 20 % (abrupte) est prédominante, elle occupe 36 % de la surface totale du bassin versant, soit (21,19 Km²). Enfin les classes 20% à 35 % (très abrupte) et > 35 % (extrême) présentent respectivement 18,25 % et 4,19 % de la zone d'étude soit respectivement une superficie de (10,78 km²) et (2,47 km²). Ces deux dernières classes présentent 22,44% des sols supérieurs à 20%. En effet, cette forte pente favorise la genèse du risque d'érosion hydrique dans le territoire soit sous l'action des précipitations soit sur l'écoulement fort des eaux de la surface.

D'après la figure 51, on constate que les classes la plus représentatives sont respectivement la classe modérée avec 33 % et la classe abrupte avec 36 % de la surface du bassin versant.

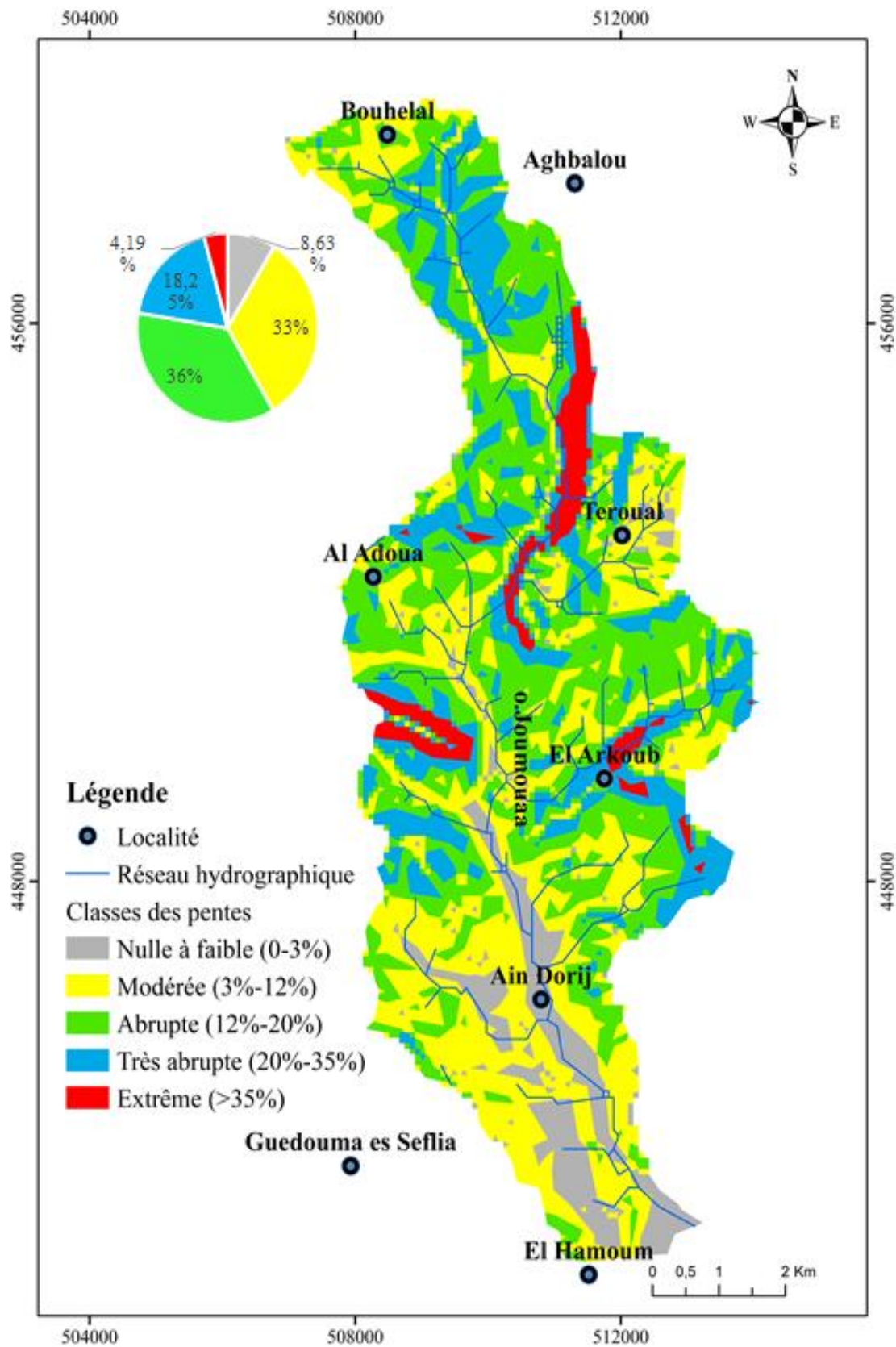


Figure 51: Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

1-2 Carte de litho-faciès

L'analyse des litho-faciès a été réalisée en utilisant différentes données, notamment des informations géologiques, lithologiques et pédologiques. Les directives PAP / CAR fournissent une classification des types de sols où chaque type est associé à un chiffre qui décrit la résistance, la cohésion et la constitution du sol. La carte de litho-faciès constitue les principaux substrats de la zone d'étude. Ces derniers sont regroupés en 5 classes pour aboutir la carte de friabilité. Le tableau 23 détaille la façon dont les sols ont été classés selon leurs types. La carte de litho-faciès (Fig.53) montre que le bassin versant de l'Oued Joumouaa est dominé par la composante marneuse. Ainsi on trouve le grès de Zoumi au Nord avec alternance des argiles salifères, à l'Ouest il s'agit de marnes calcaires et à l'Est des limons roses et de cailloutis.

Tableau 23: Classification des litho-faciès selon les directives PAP / CAR.

| Classe des litho-faciès | Degré de cohésion des sols |
|-------------------------|--|
| 1 | Sols compactés non altérés, conglomérats fortement cimentés, croûtes, affleurements de grès ferrugineux (calcaires massifs, sol fortement rocheux, roches ignées ou éruptives, sols localement encroûtés). |
| 2 | Roches ou sols cohésifs fracturés ou modérément altérés |
| 3 | Roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (ardoise, schiste, marne, etc.). |
| 4 | Roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés (marne, gypse, ardoise argileuse, etc.). |
| 5 | Sédiments ou sols meubles, non cohésifs et matériel détritique. |

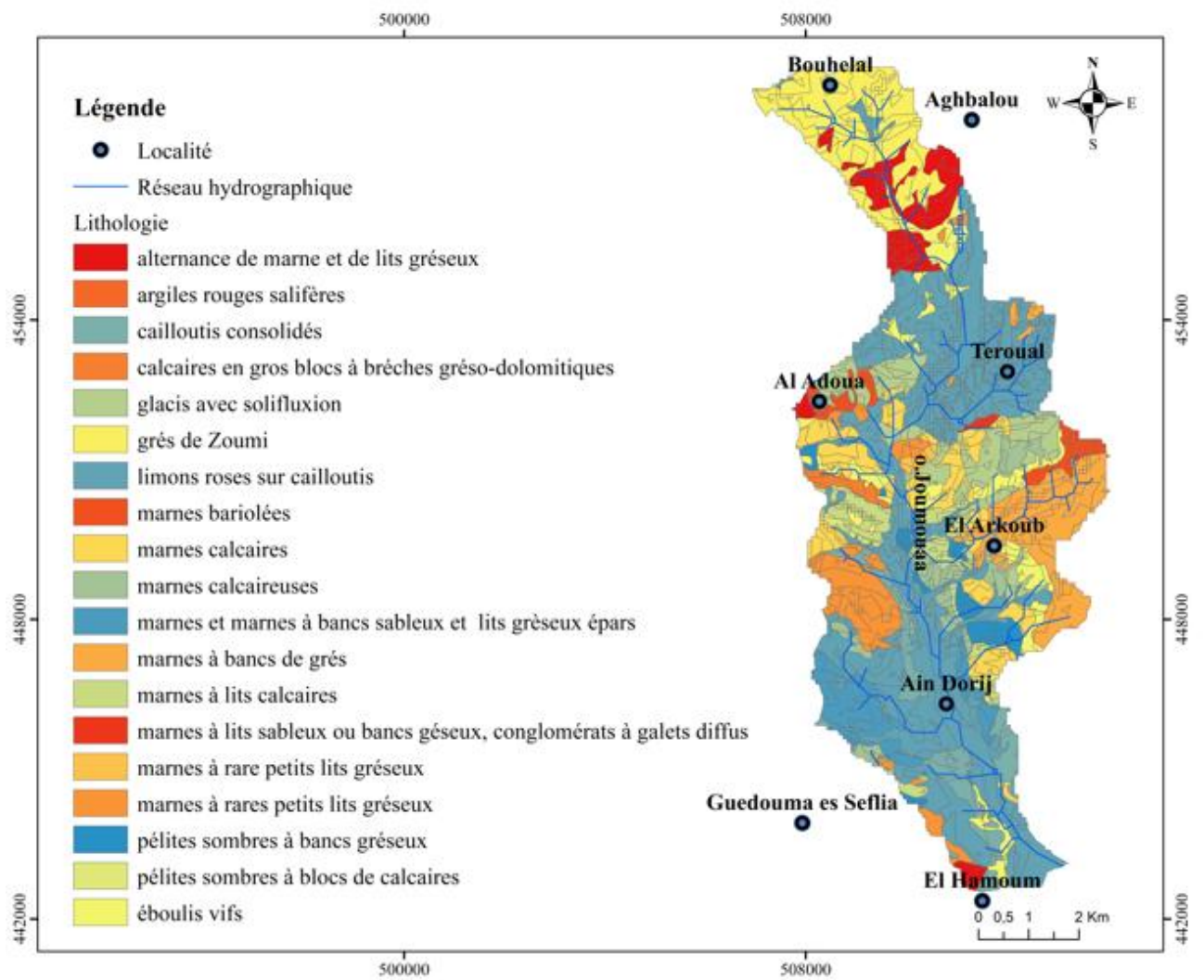


Figure 52: Carte de litho-faciès du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

1-3 Carte de friabilité

Les classes de friabilité sont élaborées à partir de la carte de litho-faciès (Fig.52) et du degré de cohésion des sols (Tab. 23). L'analyse de la figure 53 montre la dominance de la classe 5 (très forte sensibilité à l'érosion) qui représente des sols meubles non cohésifs et matériel détritique, englobe les limons roses, des marnes à lits sableux et argiles rouges, occupe la majeure partie du bassin avec 53,43 % soit (31,81 km²) de superficie. Cette classe est localisée dans la partie médiane et la zone aval du bassin versant de l'Oued Joumouaa. La classe 1 de faible sensibilité à l'érosion correspondant au grès de Zoumi, représente 9.78%, soit (5.82 km²) de la surface totale. La classe 2 formée de roches cohésives fracturés ou modérément altérés (marnes calcaires) occupe 0,96% soit (0,57km²) de la zone d'étude. La classe 3 de moyenne sensibilité à l'érosion regroupe les roches ou sols sédimentaires faiblement ou modérément compactés (calcaires marneux, limons et pélites), occupe 33,96% (soit 20,22 km²) de la zone d'étude. La classe 4 de forte sensibilité à l'érosion regroupe les formations peu résistantes ou fortement altérés (marnes et roches bariolées), s'étend sur 1.87% soit (1.11 km²) de la totalité du bassin (Fig.54).

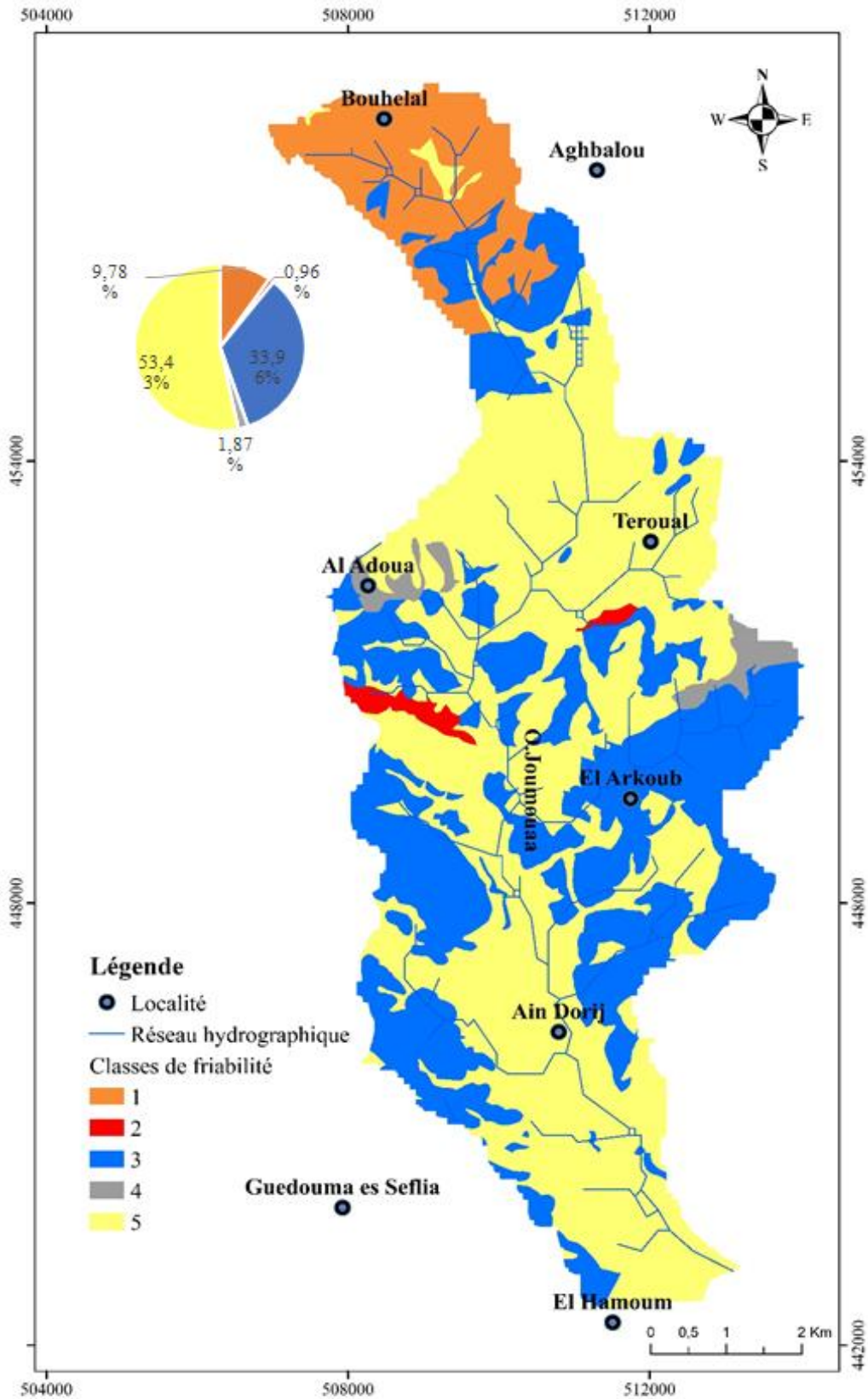


Figure 53: Carte de friabilité du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

1-4-Carte d'érodibilité

L'érodibilité du sol exprime son potentiel de résistance à l'érosion hydrique (Morgan, 2005), en fonction de sa composition, sa structure et sa texture (Khallef et al., 2020). L'érodibilité prend donc en compte la friabilité du sol et la raideur de la pente. Selon les directives du modèle PAP/CAR, la carte d'érodibilité a été obtenue à partir de la superposition de la carte des pentes et de celle des friabilité (résistance des matériaux à l'érosion). Finalement cinq classes d'érodibilité ont été distinguées : faible, modérée, moyenne, forte et extrême (Fig.55).

L'analyse de la carte d'érodibilité (Fig55) montre que la classe d'érodibilité extrême couvre 11,50 % de la surface totale du bassin versant. Cette classe se localise dans la partie médiane du bassin. Elle se produit lorsque la pente est forte et le sol est meuble et plus altéré.

La classe de l'érodibilité modéré à moyenne représente presque 60,84% de la superficie totale du bassin. Pourtant, le terrain d'érodibilité forte à extrême occupe une superficie de 36,21%. Les sols d'érodibilité faible ne couvrent que 2,92% de la surface du bassin.

Les classes d'érodibilité montrent que la zone d'étude est dominée généralement par l'érodibilité moyenne le long du bassin ce qui peut être expliqué par la présence des sols sédimentaires cohésifs fracturés ou modérément altérés. La topographie irrégulière du bassin versant de

l'o.Joumouaa favorise l'instabilité des sols et par conséquent la perte de la matière organique et des éléments nutritifs ainsi que la détérioration de la structure du sol.

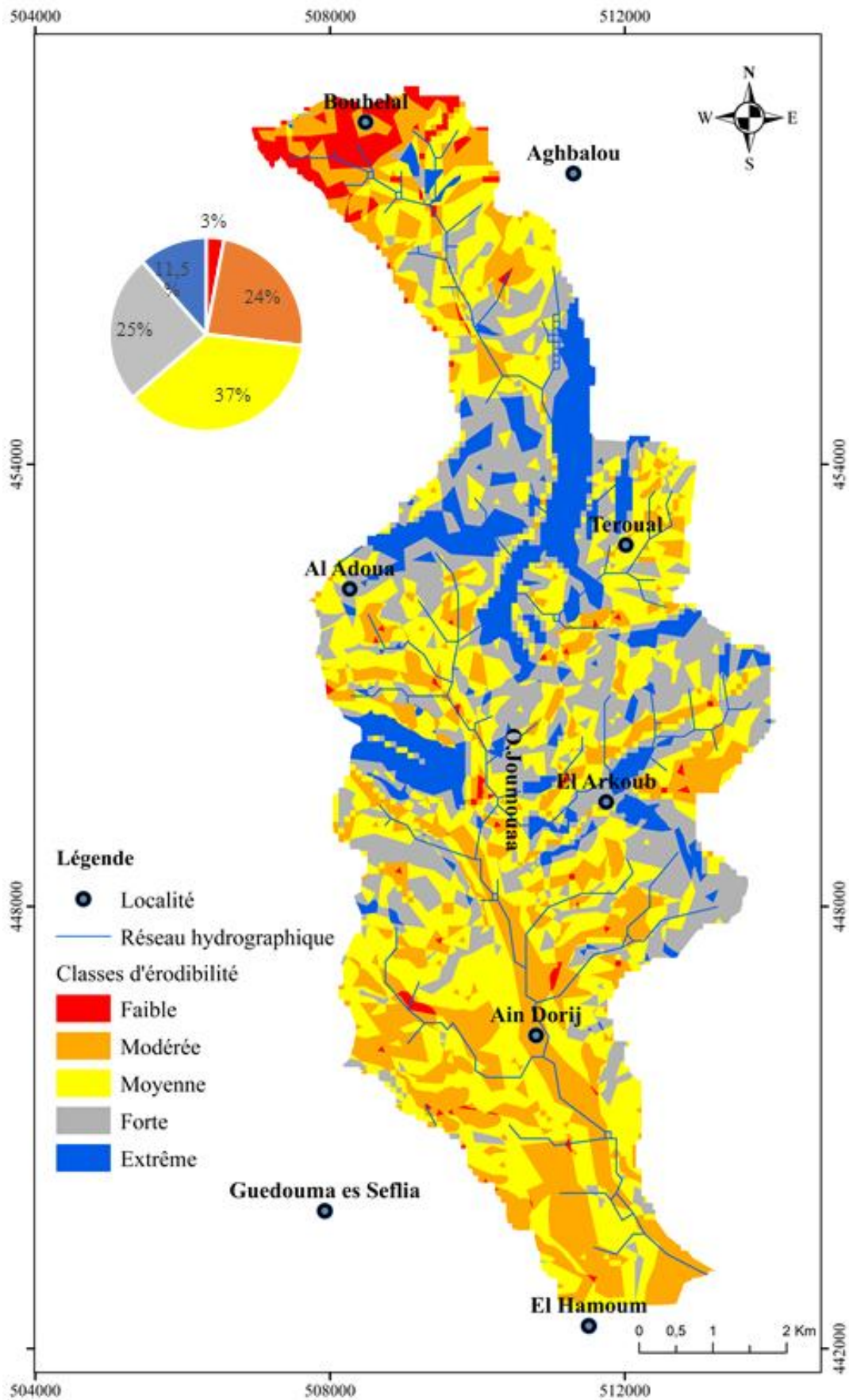


Figure 54: Carte d'érodibilité du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

1-5 Carte du couvert végétal

Le couvert végétal joue un rôle primordial dans la stabilisation des sols car il permet la conservation du sol et de l'eau quel que soit la pente, le climat et le sol (Khallef et al., 2020). La carte de la densité de recouvrement (Fig.56) a été réalisée en se basant sur l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et en traduisant chaque intervalle de NDVI par une classe de densité du couvert végétal en la régénérant sur un logiciel SIG. Le résultat est une cartographie du bassin versant de l'o. Joumouaa en polygones selon la densité de recouvrement. Cet indice a été calculé à partir de l'image satellitaire Landsat 8 prise le 29/06/2018. Il montre quatre classes de valeur NDVI. En effet les valeurs les plus élevées qui tendent vers (0.43-0.52) correspondent aux zones d'arboriculture où la végétation est très dense. Les valeurs élevées (0.33-0.43) représentent la végétation dense, la végétation de densité moyenne est représentée par des valeurs comprises entre (0.14-0.23) et les faibles valeurs (0.04-0.14) correspondent aux terrains de culture.

L'application de directives du modèle PAP/CAR classe les niveaux de couverture végétale en quatre classes (Tab.25).

Tableau 24 : Classification du niveau de couverture végétale selon PAP / CAR.

| Classes | Degré de couverture végétale | % de degré de couverture végétale |
|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| 01 | < 25 % | 58,35 % |
| 02 | [25 % – 50 %] | |
| 03 | [50 % – 75 %] | 30,35 % |
| 04 | > 75 % | 11,31 % |

La distribution des classes au sein du bassin versant de l'o. Joumouaa montre que les densités faibles (>25% et [25%-50%]) sont présentées dans tout le bassin et couvrent une superficie de 34,5 km² soit (58,35%) de la surface totale du bassin. La classe de densité 50%-75% (végétation dense) couvre 30,35% du bassin avec une surface d'ordre de (18 km²), Cependant que la classe de végétation très dense (supérieur à 75%) occupe seulement 11,31% et s'étend sur une superficie d'ordre de (6.68 km²). On peut conclure que la majorité du bassin versant de l'o. Joumouaa est couvert par une végétation à densité faible à moyenne. Tandis que la végétation à très faible densité représente 21,5 % soit (12,7 Km²) de la superficie totale du bassin versant (Fig.55).

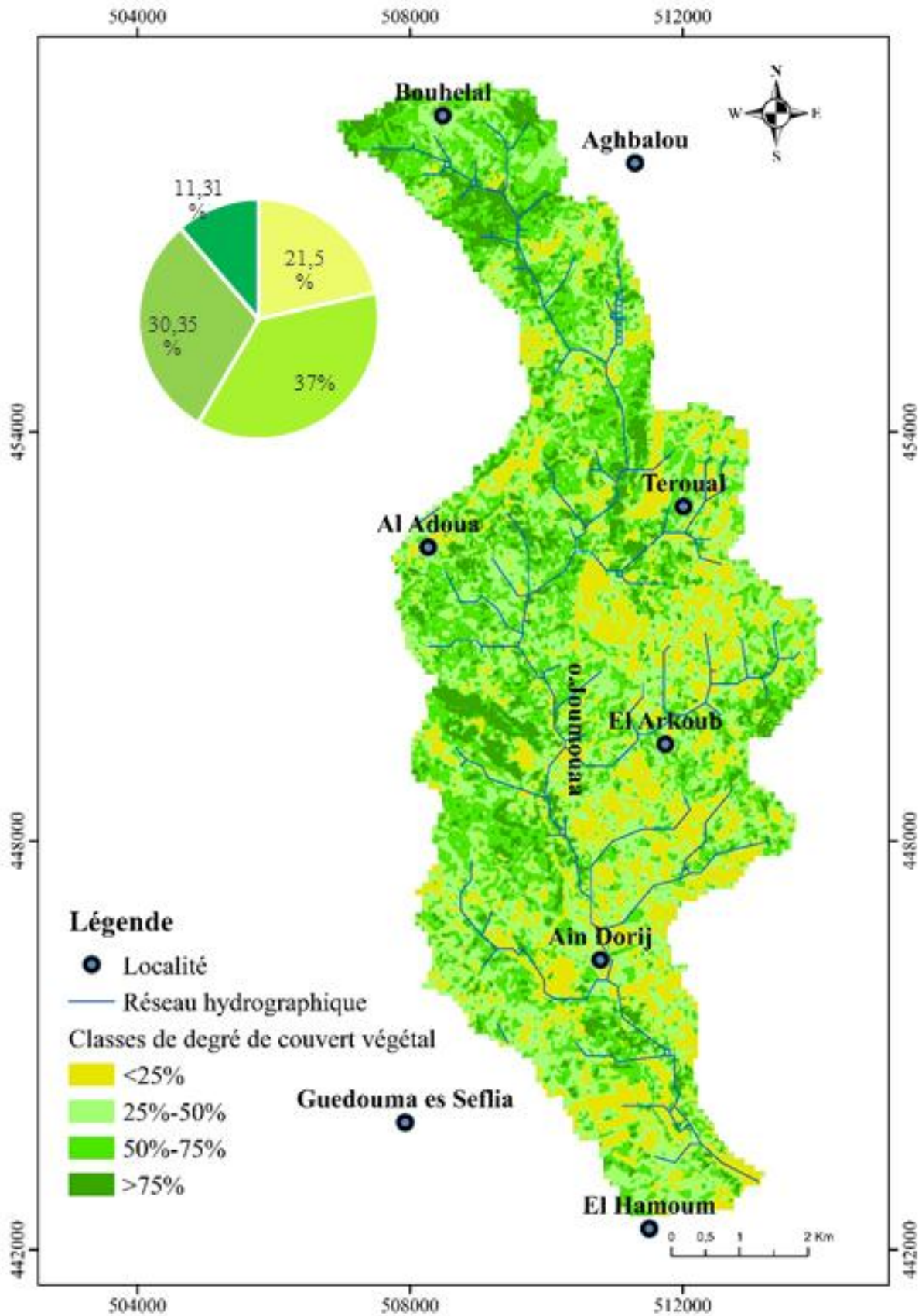


Figure 55: Carte de degré de recouvrement végétal dans le bassin versant de l'o. Joumouaa (extraite de l'image Landsat 8 du 29/06/2018)

1-6 Carte d'occupation des sols

La carte d'occupation des sols a été obtenue à partir de l'image satellitaire Landsat 8 prise le 29/06/2018. La classification de l'utilisation des terres classée en attributs en fonction de la nature des polygones est basée sur les directives du PAP/CAR. A la fin de cette étude, l'occupation des sols du bassin versant de l'o. Joumouaa a été répartie en quatre classes : Culture intensive, Arboriculture, Reboisement dense et zone urbanisée (Fig57).

L'analyse de la carte d'occupation des sols, du bassin de l'o. Joumouaa montre une dominance de la classe de l'arboriculture (la culture en ligne) qui couvre 41,3% du bassin soit (24,45 km²) de la surface totale. La partie amont est occupée par l'arboriculture notamment l'olivier (en lignes). La culture sèche (herbacée) se localise essentiellement toute au long du bassin présente et couvre 19,88% soit (11,94 km²) du territoire. Les terrains agricoles (reboisement dense) sont étalés sur une surface de 20,59% soit (12,16 km²) suivis par une zone urbanisée qui s'étend sur une superficie de 10,70 km² soit (18,12%) de la zone d'étude. La partie aval est dominée par le reboisement et culture sur un terrain fortement érodé. D'après cette répartition du bassin versant on peut dire que la partie amont et médiane du bassin versant est protégée contre l'érosion hydrique. Afin de vérifier cette conclusion, on a superposé la carte de la densité de couverture et celle de l'occupation des sols pour avoir la carte de protection des sols.

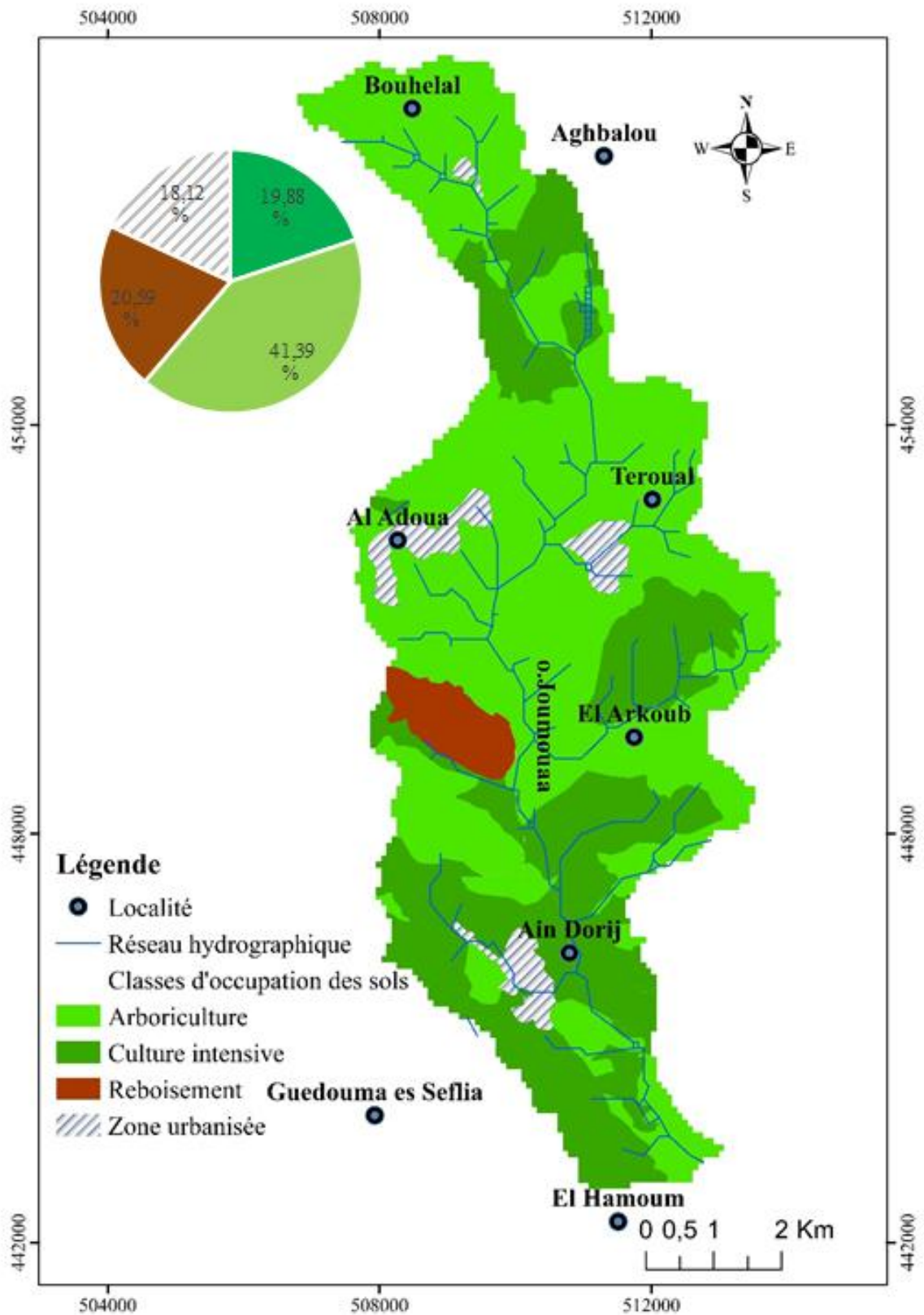


Figure 56: Carte d'occupation des sols dans le bassin versant de l'o. Joumouaa (Extraite de l'image Landsat 8 du 29/06/2018)

1-7 Carte de protection des sols

Le sol est protégé par le couvert végétal. Ce dernier peut lutter contre le ruissellement et l'ablation en réduisant l'énergie des substances agressives (comme l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement), mais cet effet peut varier selon la formation végétale. Le degré de protection des sols est en fonction du type d'occupation de ce sol et de la densité du recouvrement végétal dans le bassin versant (Khallef et al., 2020). La réalisation de la carte de la protection des sols s'est basée sur la superposition de la carte d'occupation du sol et celle du couvert végétal (Fig.58). L'objectif de cette carte est de détecter les zones à faible et à forte protection.

Selon les directives du modèle de PAP/CAR cinq niveau de protection ont été définies (Tab.25). Cependant, afin de mieux simuler le processus d'érosion des sols dans le bassin versant de l'o. Joumouaa, une classe supplémentaire de niveau de protection des sols a été ajoutée : la classe (0) fait référence au niveau de protection dans les superficies hautement imperméables en raison des processus d'urbanisation résultant du développement socio-économique (Kone, 2017).

Tableau 25: les classes et niveau de protection du sol selon PAP/CAR.

| La classes | Niveau de protection des sols |
|------------|-------------------------------|
| 01 | Très élevé |
| 02 | Elevé |
| 03 | Moyen |
| 04 | Faible |
| 05 | Très faible |

D'après l'analyse de carte de protection du sol on peut dire que la répartition des classes de protection très faible (5,82%) soit (3,2km²) se localise dans la partie médiane notamment à l'Est. Du fait qu'il s'agit d'une diminution de recouvrement végétal. La classe de faible protection est la plus dominante, elle représente 24 % soit (13,22km²) de la surface du bassin versant, elle est répartie tout au long du bassin. Cela s'explique par la couverture végétale très dégradé et aussi par le surpâturage. Par contre la classe moyenne de protection du sol s'étale sur une superficie d'ordre de 9,64 Km², soit (17.5%) de la surface du bassin de l'o. Joumouaa, ces terres se trouvent dans la partie amont et aval du bassin. La classe élevée et très élevée de protection du sol représente respectivement 13,47 % et 5,82 %, cette dernière classe est similaire à la classe de protection très faible, elle se localise dans la partie aval du bassin. Cela est dû à la présence des forêts qui protègent le sol. On constate que le bassin versant de l'o. Joumouaa est mal protégée.

La répartition des classes de protection des sols des zones de faible à moyen protection se trouvent le long du bassin, La zone montre une protection faible à moyenne avec des pourcentages varient entre 24 % à 17.5%. Les zones de protection très faible et très élevé sont moins représentées et occupent seulement 11.64% de la superficie totale du bassin.

Ces données montrent que le bassin a une mauvaise protection ce qui permet de dire que cette zone a une topographie plus accidentée ce qui favorise l'érosion hydrique et les mouvements de terrain.

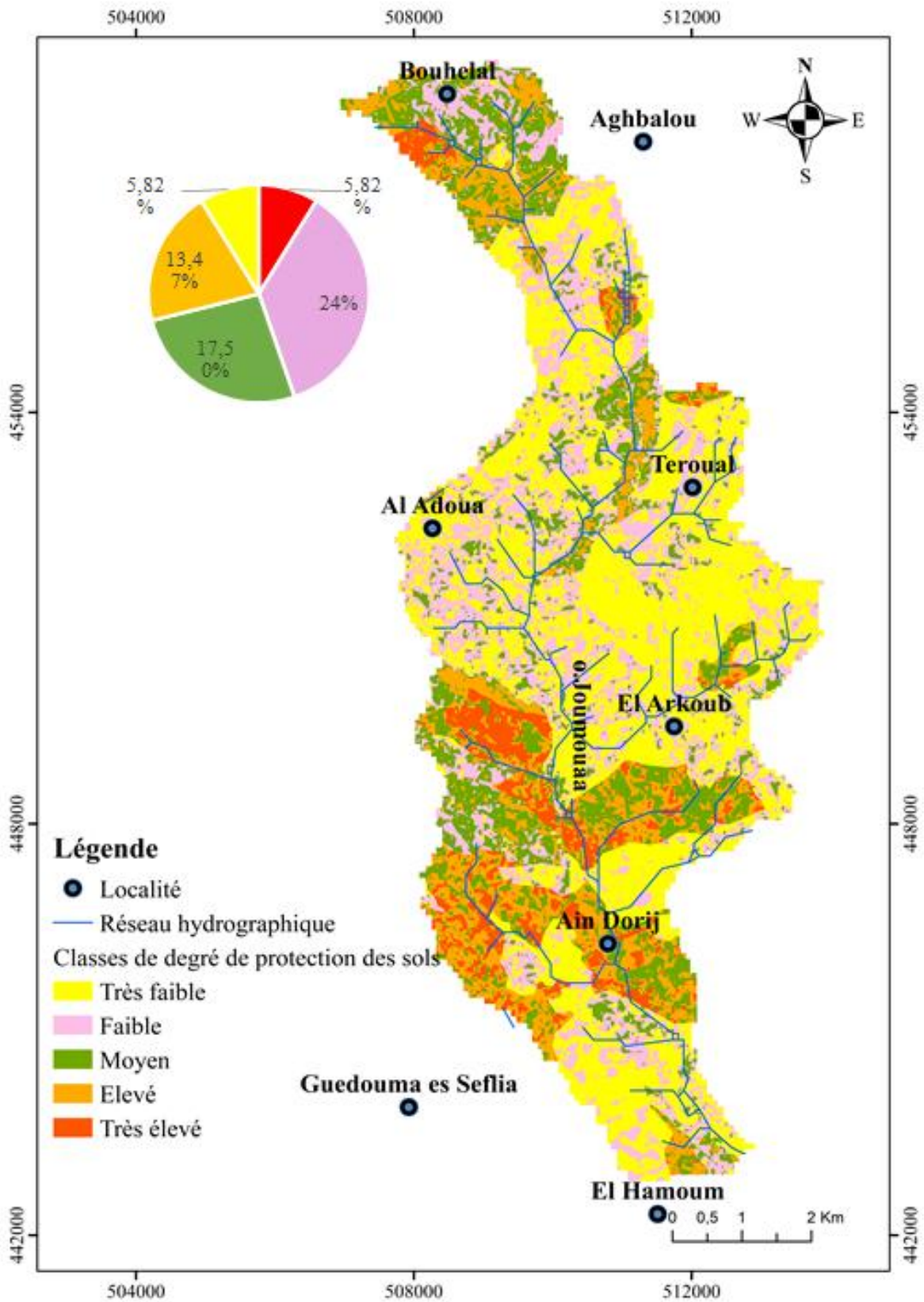


Figure 57: Carte de protection des sols dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

2-Phase descriptive

Cette phase donne une image réelle sur les différentes formes d'érosion existantes sur la zone d'étude ainsi que leurs degrés d'exposition à la dégradation. Elle est réalisée à partir d'images satellitaires Google Earth. Un logiciel SIG a été utilisé pour établir une distribution spatiale des formes d'érosion réelles.

2-1 Carte d'état érosif

La carte d'état érosif a été réalisée par la superposition de la carte du couvert végétal et celle de protection des sols (Fig.59). Selon la matrice des états érosifs des sols du modèle PAP/CAR (Tab.26), cinq classes des degrés des états érosifs ont été définies.

Tableau 26: La Matrice de degré des états érosifs des sols selon le modèle PAP/CAR.

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

Tableau 27: Les différentes classes des états érosifs selon le modèle PAP/CAR.

| Classe | Degrés des états érosifs |
|--------|--------------------------|
| 1 | Très faible |
| 2 | Faible |
| 3 | Moyen |
| 4 | Elevé |
| 5 | Très élevé |

L'analyse de la carte des états érosifs (Fig.59) montre que les zones les plus érodées se situent essentiellement dans la partie médiane et dans quelques endroits au niveau de la partie aval du bassin versant. La répartition des superficies sur la carte des états érosifs montre que les classes à risque d'érosion élevé et très élevé occupent la majorité du bassin 47,88% soit une surface de (26,45 km²) essentiellement sur sa partie médiane. Ces zones sont caractérisées par des pentes élevées à moyennes, un couvert végétal faible (inférieur à 25%) et à érodibilité forte à extrême. Les classes de degrés érosifs très faibles à faible se concentrent dans la partie amont et dans le sud-ouest du bassin, elles occupent de faibles superficies (21,7%). Cette répartition est due à la présence de couverture végétale dense d'une part et à la faible friabilité des formations d'autre part. La classe notable présente 30,4% du terrain étudié. Elle est dispersée et localisée le long de bassin. Cela peut s'expliquer par les affleurements sédimentaires relativement meubles ce qui entraîne leur érosion.

La répartition des degrés des états érosifs montre que les classes à risque d'érosion notable, élevé et très élevé occupent la majorité du territoire 78,3% soit une surface de (43,26 km²) et les classes de très faible à faible érosion occupent seulement 21,7% de la surface totale du bassin (soit 11,99 km²).

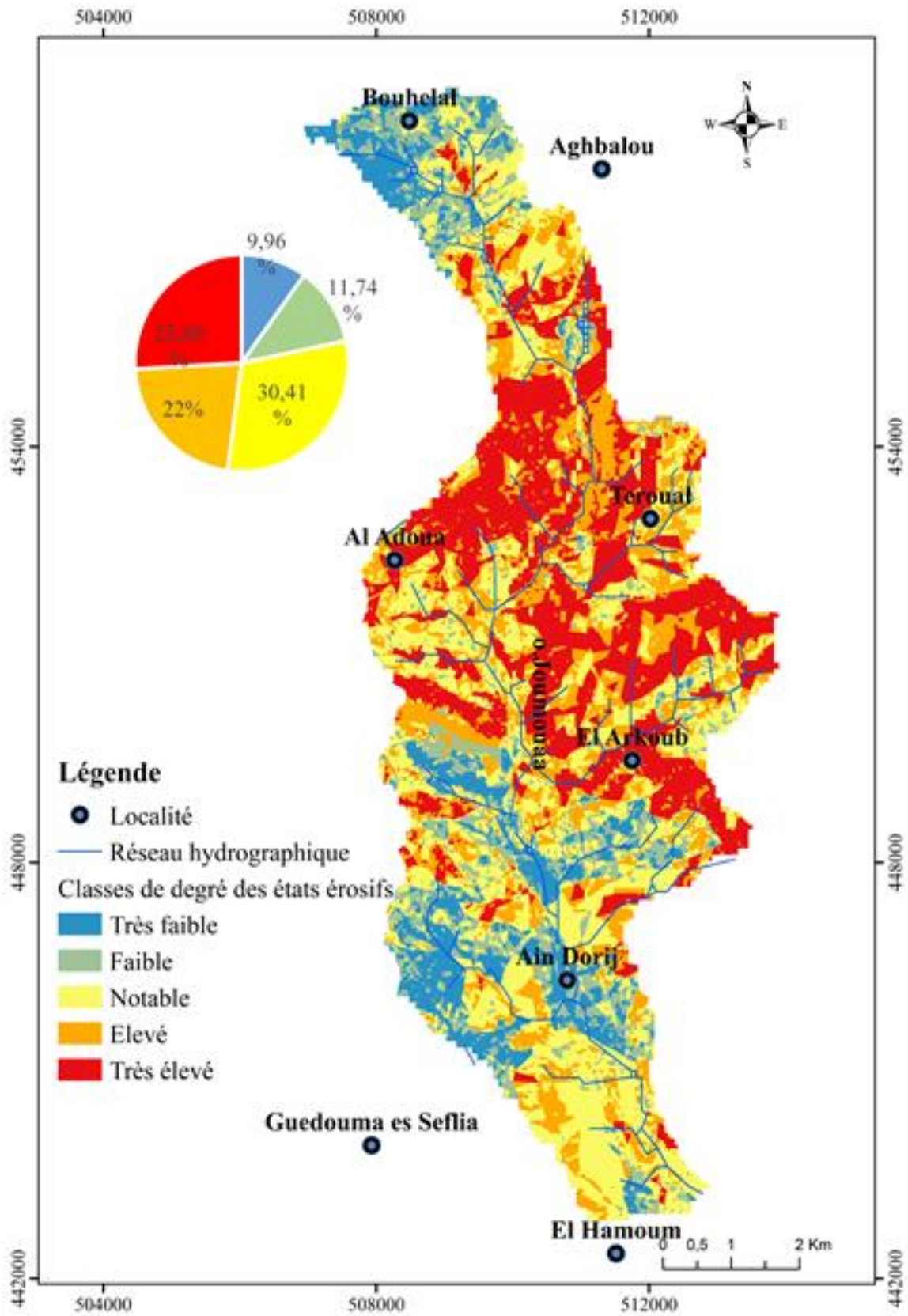


Figure 58: Carte d'état érosif du bassin versant de l'Oued Joumouaa.

2-2 Carte des formes d'érosion

L'établissement de la carte des formes d'érosion (Fig.60) montre des différentes formes d'érosion en nappe, en rigole, en ravinement. Le plus souvent on trouve des associations des différents types d'érosion sur une même zone.

L'analyse de cette carte montre aussi que le décapage et le ruissellement diffus ou érosion en nappe occupent une superficie de 46,51 km² soit (76.61%) de la superficie totale de la zone d'étude. Les sites protégés par le couvert végétal assez dense atteint la deuxième place avec une superficie de 9,5 km² soit (15,64%) du bassin versant. la présence de ces deux formes d'érosion peut être expliquée par la vulnérabilité du terrain, l'action des cours d'eau et par l'action anthropique. Ces mêmes formes d'érosion ont été identifiées dans le bassin versant de l'Oued Aoudour dans le Rif central (Boukrim et al.2016). Les autres formes tels que les ravins moyennement profonds, les Bad-lands, le ravinement généralisé, les rigoles et ravinements superficiels sur les versants, la solifluxion, les ravins profonds, les sapements de berge localisés sont très peu représentés dans le bassin versant de l'o. Joumouaa et occupent une superficie de 4,67 km² soit (7,71%) de la superficie totale du bassin versant (Fig 60).

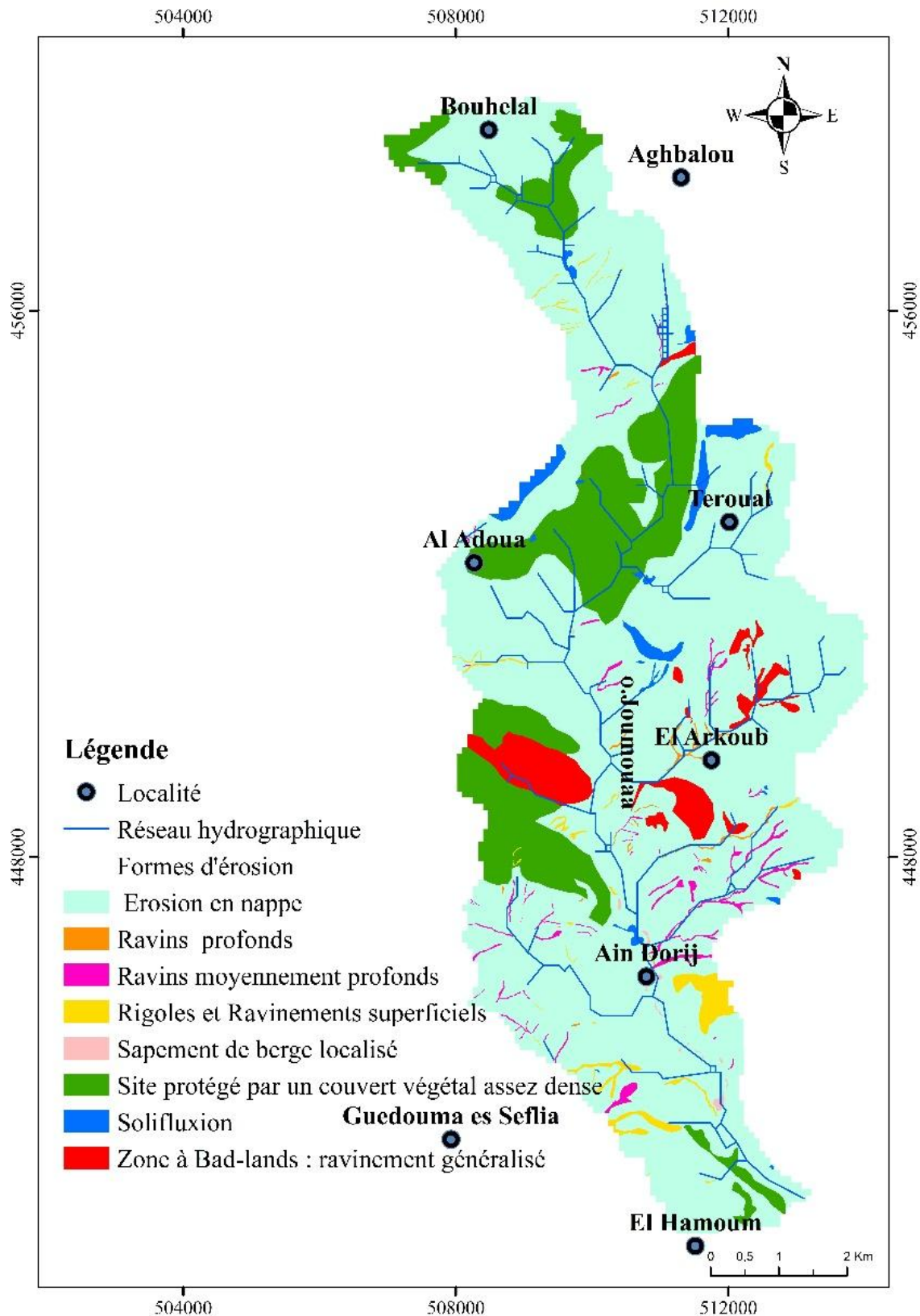


Figure 59: Carte des formes d'érosion dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

3- Phase d'intégration

Cette étape est le résultat de deux phases précédentes, elle permet de compléter les résultats obtenus dans la phase prédictive avec la deuxième phase descriptive. Ce produit nous fournit un bilan cartographique très précis qui donne une image réelle sur l'état de dégradation du sol et les différents aspects de l'érosion.

La carte consolidée (Fig.61) obtenue dans cette approche est une carte qualitative qui est réalisée à partir de la superposition de la carte des formes d'érosion (Fig.60) et la carte des états érosifs (Fig.59). La carte montre que les formes d'érosion en nappe, ruissellement diffus occupant la majorité du bassin et coïncident avec les zones qui subissent un faible à très faible degré d'érosion hydrique dans la zone d'étude. On remarque que la partie médiane est caractérisée par les différentes formes d'érosion hydrique de type Bad-lands, ravins moyennement profonds, solifluxion, qui coïncident avec les zones qui subissent un degré d'érosion hydrique élevé à très élevé cela est expliqué par la fragilité des terrains marneux et marneux-argileux et par l'absence du couvert végétal.

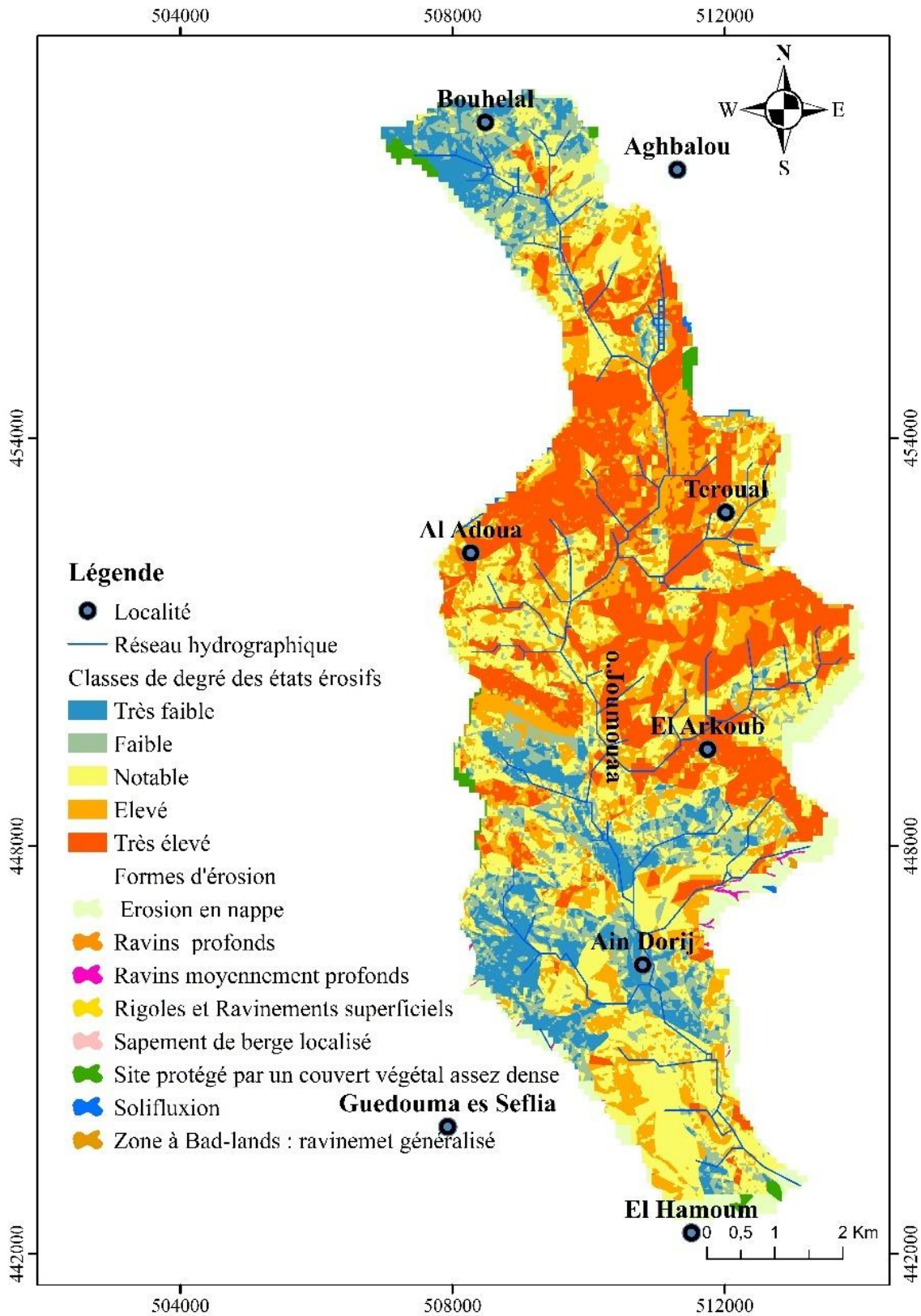


Figure 60: Carte consolidée du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'o. Joumouaa.

Conclusion

Cette étude a montré l'intérêt et l'apport du système d'informations géographique et de la télédétection à la cartographie de l'érosion hydrique en se basant sur une base de données multi-sources.

Le bassin de l'Oued Joumouaa est caractérisé par un climat méditerranéen avec deux saisons bien contrastées, une chaude et sèche et l'autre fraîche et humide. Les précipitations moyennes annuelles sont partout irrégulières et favorisent l'érosion dans tout le bassin versant.

La méthode PAP/CAR a permis d'évaluer et de cartographier l'érosion hydrique en se basant sur les facteurs naturels. L'importance de cette méthode se vérifie dans la réalisation d'un rapport général du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa à partir de trois phases :

D'abord La phase descriptive (lithologie, pente, couvert végétal et occupation des sols) qui se caractérise par la présence de formes d'érosion variées (laminaire et linéaire avec la prédominance d'érosion en nappe...);

La phase prédictive a donné des indications sur l'état actuel de la dégradation des sols en s'appuyant sur les degrés de gravité des différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique (60% d'érodibilité modérée, 36% d'érodibilité forte à extrême et seulement 3% d'érodibilité faible);

La phase d'intégration ou de superposition des deux précédentes (prédictive et descriptive) montre que les formes en nappe se trouvent dans les zones où le degré d'érosion est très élevé. Les zones protégées par un couvert végétal stable correspondent aux zones où le degré d'érosion est faible.

***Chapitre VI : Modélisation de l'érosion
hydrique dans le bassin versant de
l'oued Joumouaa Par la méthode de
Wishmeier***

Chapitre VI : Modélisation de l'érosion Hydrique par la méthode de Wischmeier

Résumé

L'érosion hydrique est un phénomène complexe qui contribue à la dégradation des sols et qui est lié à des causes naturelles et anthropiques difficiles à gérer dans le temps et l'espace. Elle a un impact significatif sur notre pays et nécessite un certain nombre d'études et d'efforts pour la prévenir et la gérer. Des approches géospatiales (outils SIG et données de télédétection (RS)) ont été utilisées pour tester la stratégie RUSLE dans le bassin versant de Joumouaa, où elle s'est avérée exacte. Ce dernier est un massif montagneux d'une superficie de 60 km² qui fait partie du Préfif occidental et de la région de Teroual (nord du Maroc).

La technique proposée intègre le RUSLE pour calculer l'érosion avec des techniques géospatiales pour détecter les variables qui causent l'érosion hydrique et la perte de sol. Le facteur d'érosivité R avait une gamme de valeurs, avec une moyenne de 1832,76 à 1968,87. Il a été montré que les sols avaient un facteur d'érodabilité k de 0,016 à 0,0245, ce qui indique qu'ils sont les plus vulnérables. L'amont étant plus rugueux et plus sensible, le facteur LS varie de 0 et plus de 43%. Selon la nature de la terre, il y a différents facteurs C. L'érosion hydrique affecte toutes les régions du bassin à des degrés divers, en fonction des processus qui provoquent l'érosion. Les résultats montrent que les sols du bassin versant de Joumouaa sont moyennement à fortement érodables, avec une érodabilité maximale allant de 50 à 280 t/h/an, un couvert végétal peu dense et peu protégé, et une agressivité climatique moyenne à forte. Cette étude permet de comprendre le danger de l'érosion des sols, de guider les techniques de gestion et d'aménagement du territoire et de construire un outil d'aide à la décision en matière de gestion des ressources naturelles.

I- Introduction

Dans le modèle le plus célèbre, l'USLE (Universal Soil Loss Equation) est précurseur. Dans les années 1950, le statisticien Wischmeier du Service de conservation des sols Entrepris l'analyse et la synthèse de plus de 10 000 données de mesure annuelles Érosion dans les zones d'essai et les petits bassins versants des Grandes Plaines Américain. Entre 1960 et 1978, Wischmeier et Smith ont défini une équation pour prédire L'érosion, qui intègre les différents paramètres qui régissent ce phénomène à l'échelle L'intrigue de la. Il y a cinq paramètres au total : Agressivité des

précipitations (R), Erodibilité du Sol (K), topographie (SL), couvert végétal (C) et mesures anti-érosives (P). Le modèle est en fait une prévision quantitative du risque d'érosion. C'est le modèle choisi pour cartographier l'érosion dans le bassin versant de l'oued Joumouaa.

Les modèles d'érosion se sont avérés importants et précieux si l'on veut évaluer rapidement les taux de perte de sol dans une zone donnée, ou pour établir des cotes d'intensité de processus pour prioriser les interventions anti-érosion ou pour régénérer la sensibilité du sol à l'eau (Nasl'haj, 2009).

En d'autres termes, la modélisation est une méthode pour : simuler la réalité et optimiser la gestion du phénomène étudié, évaluer les cas extrêmes possibles et utiliser des outils informatiques pour faciliter le calcul afin d'éviter les calculs redondants.

Il existe plusieurs modèles d'érosion hydrique ont été développés pour étudier, quantifier et lutter contre ce fléau. On peut les regrouper en deux grands types : les modèles quantitatifs et qualitatifs :

Pour les modèles quantitatifs qui permettent une évaluation quantitative du processus. L'érosion hydrique estimée par ces modèles tient compte des effets de la plupart des facteurs. Ces modèles sont élaborés à partir de données issues d'expériences de terrain ou de données de télédétection spatiale gérées par des systèmes d'information géographique (SIG). Parmi ces modèles, on peut citer : les modèles physiques et les modèles empiriques.

- **Modèle physique** : basé sur des équations mathématiques, le processus d'érosion hydrique est reproduit en formulant différentes étapes physiques (Company-Redmond, 1996).

- **Modèles empiriques** : comprennent l'établissement de lois mathématiques liant des variables d'entrée à des variables de sortie, dont les formes et les coefficients sont déterminés par des observations et des mesures de terrain. Cela se fait expérimentalement en ajustant la valeur calculée par le modèle à la valeur mesurée sur le terrain. Ces modèles ont été produits pour jouer un rôle efficace, c'est-à-dire comme outil de conservation des sols et de lutte contre l'érosion hydrique (Company-Redmond, 1996). Le modèle empirique le plus célèbre est celui de Wischmeier et Smith (1958, 1978), il s'appelle aussi l'équation universelle des pertes des sols (USLE). Ce dernier est le modèle adopté pour notre cas d'étude (érosion hydrique du bassin versant de l'Oued Joumouaa).

Pour les modèles qualitatifs : présentent une vue générale d'un problème ou d'un processus à analyser sous forme d'un canvas représentant la structure du système et les relations qui y existent entre eux.

II- Aperçu su le modèle de Wischmeir et Smith (RUSLE)

En fait, l'équation générale est passée de l'USLE "Universal Soil Loss Equation" (Wischmeier et Smith, 1978) à la DUSLE "Differential Universal Soil Loss Equation". Ce dernier prend en compte la complexité du terrain grâce à l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT) et de pratiques anti-érosives. Le MUSLE "Modified Universal Soil Loss Equation" (Williams, 1975) prédit la production de sédiments à l'échelle des événements hydrologiques en intégrant tous les facteurs d'érosion. Une variante de cette équation consiste à remplacer le facteur R par le volume de ruissellement V_r (m^3) et le débit de pointe Q_p (m^3/s) pour un orage donné (Ezzine, 1998). Enfin, la RUSLE "Revised Universal Soil Loss Equation" (Renard et al. 1997) améliore la détermination de divers facteurs d'érosion. En effet l'équation universelle générale est passée de l'USLE à la DUSLE prédit la production.

L'équation universelle de perte de sol (USLE) de Wischmeier et Smith (1958 et 1978) est le modèle d'érosion hydrique le plus couramment utilisé pour estimer et prédire la perte de sol à l'échelle de la parcelle et du sol du bassin versant. L'équation est basée sur des années d'observations de l'écoulement et du transport des solides à partir de parcelles et de bassins versants à pente uniforme.

Le modèle de calcul empirique du taux d'érosion le plus largement accepté utilisé au Centre National du Ruissellement et de Calcul de Perte en Sol aux États-Unis en 1954. Des projets de recherche ont conduit à un modèle empirique de prévision des pertes de sol développé par Wischmeier et Smith en 1958, mais non publié en détail avant 1965 (Sadiki, 2005). Par la suite, le modèle est utilisé dans le monde entier.

Cependant, ce modèle présente certaines limites, car il ne considère que le processus d'érosion en nappe à l'échelle du bloc et ne peut approximer le phénomène à l'échelle des événements pluvieux (pluies). Pour pallier ces limitations, le modèle a été revu, modifié et amélioré en plusieurs versions en intégrant des facteurs de ruissellement pour l'adapter à l'échelle des événements pluvieux (Onstad et Foster, 1975 ; Williams, 1975 ; Renard et al., 1997).

Cette approche est considérée comme le modèle qui nécessite un minimum de données sources et a été largement utilisée à toutes les échelles. Il a été créé pour estimer les taux annuels d'érosion hydrique à long terme dans les zones agricoles à l'échelle de la parcelle (Desmet et Govers, 1996).

III- Le Modèle Révisé USLE : **RUSLE**

Afin d'atteindre notre objectif de cartographier la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Joumouaa, on a choisi une méthodologie fondée sur l'équation universelle révisée de perte en terre (RUSLE), développée par Renard et al. (1991)

Cette méthode a été utilisée par plusieurs chercheurs à travers le monde et notamment au Maroc pour estimer et cartographier le risque d'érosion hydrique (Benzougagh, 2020 ; Anys et al. 1992 ; Benmoussa et al. 1993 ; Tahri et al. 1993 ; El Garouani et al. 2003, 2005, 2008 ; Merkhi et al. 2015 ; Elalaoui et al. 2015 ; Issa et al.).

L'équation Rusle est un modèle qui intègre six paramètres de base qui déterminent le phénomène d'érosion hydrique. Ils sont le climat (R), le sol (K), la topographie (LS), la végétation ou la culture (C), et les pratiques d'utilisation des sols (P). Elle prédit les pertes moyennes de sol au champ, pertes qui sont provoquées par l'érosion en nappe et érosion en rigole. Elle s'exprime par l'équation suivante :

$$A = R.K.LS.C.P$$

A : l'érosion Moyenne du sol par unité de surface (t/h/an) ;

R : Le facteur d'érosivité des précipitations et du ruissellement (mm/ha-h-an)

LS : Le facteur de longueur (L) et de pente

K : Le facteur d'érodabilité du sol (t-ha-h/ha-MJ-mm)

C : Le facteur de couverture végétale, de gestion et de pratiques culturales

P : Le facteur de pratique de conservation

L'utilisation de cette équation a besoin d'estimation des différents facteurs de l'équation universelle sur l'ensemble du bassin versant et leur expression sous forme des cartes thématiques.

L'incorporation de ces cartes dans le système d'information géographique QGIS, 2.18.2 (open source) se fait par numérisation. Les différents polygones obtenus pour chaque pixel sont associés à leurs bases données. L'intégration des cartes se fait par le module « Overlay » du SIG et l'application des équations mathématiques du modèle de Wisheier et Smith par le module.

Tous ces facteurs ont été intégrés dans un environnement SIG pour générer une carte de prédiction de l'érosion des sols. la méthodologie proposée pour le modèle d'érosion est présentée dans la figure suivante (fig.62):

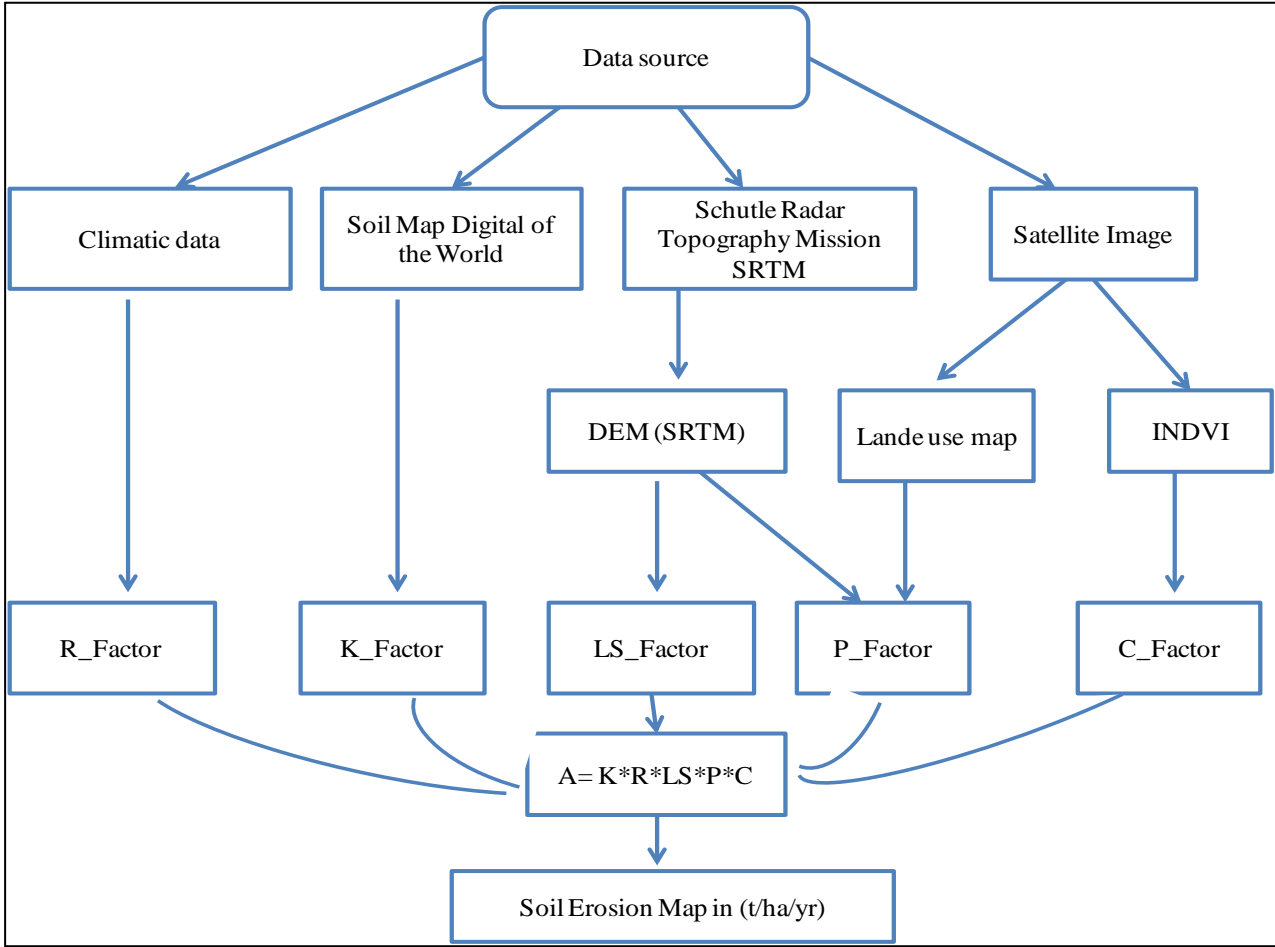
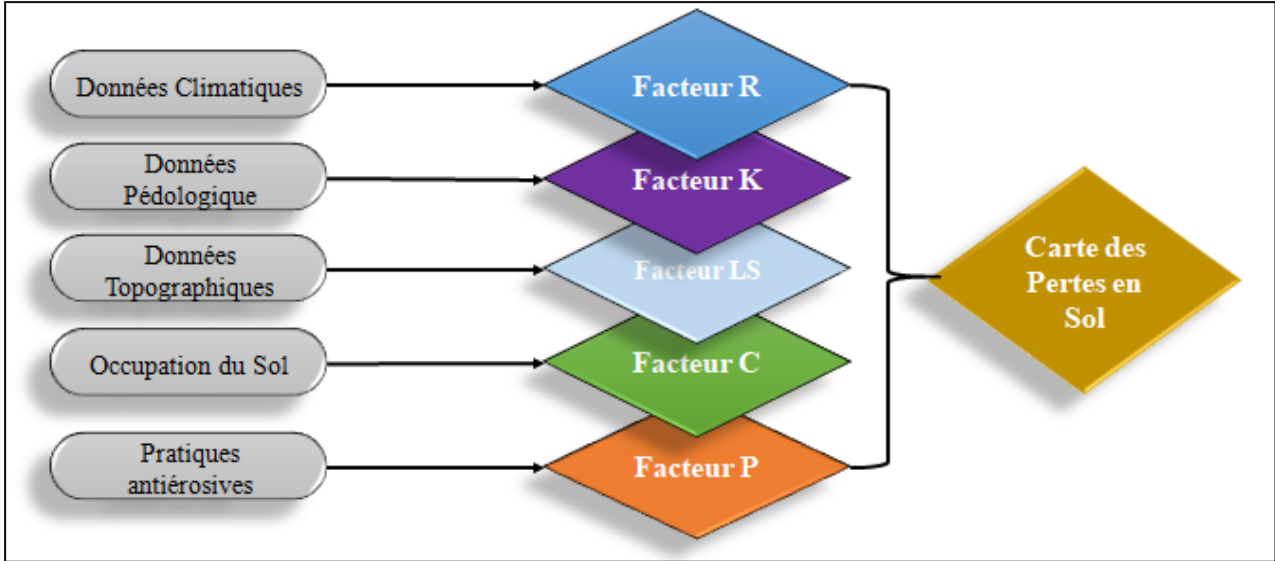


Figure 61: la méthodologie adoptée pour la réalisation de la carte de perte en sols.

IV- Facteurs du modèle RUSLE

1- Classe d'Agressivité Climatique R

L'agressivité des pluies est définie par le risque potentiel de pertes en terres produit par une averse sur un sol dépourvu de couvert végétal et de tout aménagement antiérosif. Dans la pratique, cette érosivité est inspirée grâce au calcul de l'indice d'agressivité climatique. Ce dernier caractérise l'effet de l'impact des gouttes de pluie (effet splash) et le potentiel du ruissellement qui sont tous les deux associés à une averse. L'approche de Rango et Arnoldus qui ne contient que les précipitations moyennes annuelles P et les précipitations moyennes mensuelles Pi, selon l'équation suivante :

$$\text{LogR} = 1.74 * \log\left(\frac{P_i^2}{P}\right) + 1.922$$

R : Coefficient d'érosivité moyenne des pluies en (ft-tons-in/acre-hr)

Pi : Précipitation mensuelle moyenne (Inches)

P : Précipitation annuelle moyenne (Inches)

Tableau 28: Les stations des précipitations au niveau du bassin de l'oued Joumouaa.

| Station | latitude | Longitude | Elevation (m) |
|----------|--------------|-------------|------------------|
| Teroual | 34° 40.538'N | 5° 16.185'O | 454 |
| Zoumi | 34° 48.196'N | 5° 20.655'O | 368 |
| Tafrant | 34° 37.528'N | 5° 7.186'O | 234 |
| Ouazzane | 34° 47.722'N | 5° 34.054'O | 285 |
| Lamjaara | 34° 35.400'N | 5° 15.000'O | 95 |

Cette méthode a été utilisée pour calculer l'indice d'agressivité climatique de 5 stations pluviométriques à l'intérieur et à l'extérieur du bassin. La variation spatiale de l'indice d'agressivité climatique est le résultat de l'interpolation des données du point R d'agressivité climatique (par station).

A noter que les catégories de R sont définies en fonction de l'intervalle choisi parmi l'échelle de représentation et l'agressivité climatique calculée. Pour l'interpolation, il existe plusieurs méthodes, à savoir : Spline, Krigeage, IDW, Plus Proches Voisins... Dans notre cas, nous avons choisi la méthode du Krigeage, qui nous permet d'avoir une belle représentation graphique. En effet, ce type d'interpolation est très populaire. Il fournit une interpolation "douce" (l'avantage de l'interpolation polynomiale). Le krigeage s'applique, à partir des outils QGIS en utilisant l'extension Spatial Analyst. Elle donne comme résultat une couche Raster (Car une image vectorielle peut être agrandie sans perdre sa qualité alors qu'une image matricielle perd son netteté à l'agrandissement).

L'érosion hydrique est principalement causée par la pluie. Son érosivité est principalement déterminée par sa quantité et son intensité (sur 30 minutes), ainsi que par l'énergie cinétique qu'elle génère immédiatement. Les précipitations accélèrent l'érosion des sols dans le bassin versant, selon de nombreuses études. Les précipitations sur une base quotidienne donnent une image plus réaliste de la distribution saisonnière de la production de sédiments et du taux d'érosion des sols (Srinivasan et al. 2019). Le danger érosif augmente avec l'intensité de la pluie ; ce facteur a été calculé à l'aide de la méthode de Renard et Freimund (1994) selon l'équation suivante (2) :

Il existe un certain nombre de pluviomètres situés à travers le bassin versant de Joumouaa qui fournissent des données pour le facteur R.

$$R = 0.4830P^{1.610} \quad \text{If } P < 850 \text{ mm} \quad (2)$$

$$R = 587.8 - 1.219P + 0.004105 P^2 \quad \text{If } P > 850$$

Cette méthode a été utilisée pour construire l'indice d'agression climatique pour 6 sites à l'intérieur ou à proximité du bassin versant. Ces données montrent non seulement à quel point les précipitations sont cruciales dans les processus d'érosion, mais aussi qu'elles ont une influence significative sur ces processus. Qgis a été utilisé pour interpoler les données de précipitation en employant l'interpolation par pondération de distance inverse (IDW), qui est une sorte d'interpolation.

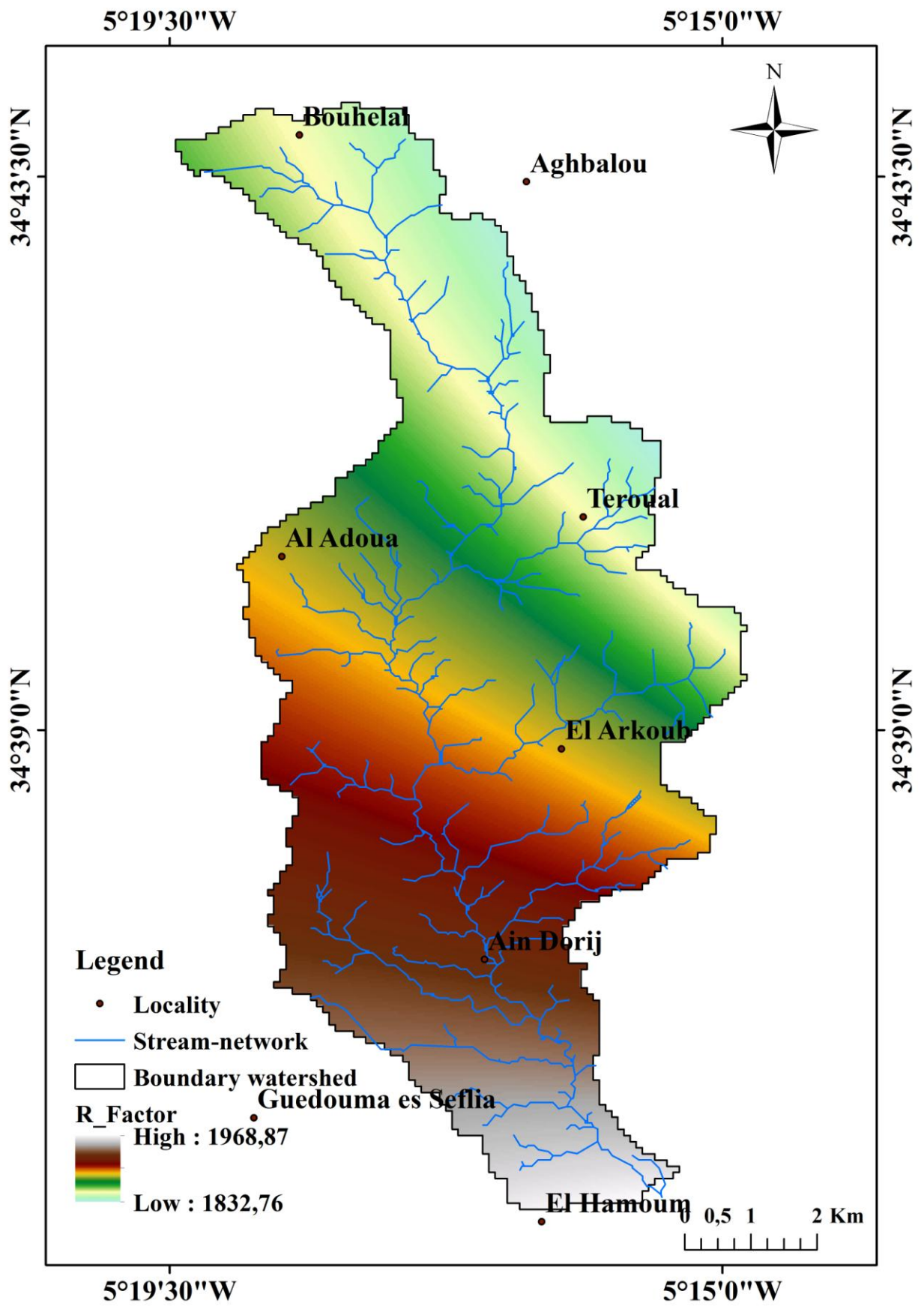


Figure 62 : Carte d'érosivité des pluies dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

En utilisant une formule de distance inverse, la carte du facteur R a été générée approche de pondération Les cellules inconnues sur une carte peuvent être prédites en utilisant IDW en mesurant la distance entre elles et les cellules connues proches. Dans cette méthode, l'option de puissance est utilisée pour atténuer l'impact des éléments qui sont éloignés.

La méthode IDW a également été utilisée pour produire la carte du facteur R dans de nombreuses recherches, et la technique IDW est intégrée dans QGIS. Utilisez cette approche pour cartographier l'érosivité pluviale du bassin versant de Joumoua, comme le montre la figure 8. De nombreuses études ont montré que les taux d'érosion des sols dans les bassins versants sont influencés principalement par le facteur R d'érosivité des précipitations. Cette étude s'est basée sur la quantité de pluie qui tombe sur une base annuelle.

La disponibilité du facteur R, la facilité de calcul et la cohérence régionale accrue sont autant d'avantages. (Shinde et al. 2010). Le facteur R calculé en utilisant les précipitations annuelles moyennes, il est compris entre 1832,76 et 1968,87 MJ mm/ha/h/an. Comme le montrent les statistiques, les précipitations sont élevées dans le sud de la zone de recherche, à savoir dans la région d'Ain dorij.

2- Classe d'érodibilité des sols : K

l'érodibilité K est définie comme le degré de sensibilité du sol à l'érosion, elle est étroitement liée aux propriétés physico-chimiques du sol. Les facteurs qui ont une grande influence sur la réponse des sols à l'érosion sont la texture, la structure, la matière organique et la perméabilité, en l'occurrence la séparation et le transport des particules par l'eau de pluie et le ruissellement.

Par conséquent, cette érodabilité du sol peut être abordée de différentes manières ; soit en fonction de la sensibilité de la composition du sol à l'érosion, par exemple le sol est plus sensible à l'érosion, soit en utilisant l'indice Wischmeier K. L'objectif est d'utiliser l'indice Wischmeiere K pour décrire la susceptibilité des sols à l'érosion. Cet indice d'érodabilité (K), qui aide à déterminer l'érosion du sol, est l'un des facteurs de l'équation générale de perte de sol de Wischmeier. En 1965, le projet Sebou au Maroc a commencé à utiliser ce facteur. Les problèmes posés par son application hors des États-Unis et la volonté d'améliorer la procédure d'estimation de cet indice ont conduit à revoir l'approche d'estimation de ce facteur dans le cadre du modèle global de Wischmeier (RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation).

Le facteur K quantifie les effets cumulatifs des facteurs pédologiques sur la texture du sol. Cependant, il démontre qu'un certain type de sol est résistant à l'érosion en général. Il s'agit d'une

mesure de la rapidité avec laquelle la pluie et le ruissellement peuvent séparer et transporter les particules du sol. En raison du manque d'informations sur la qualité du sol dans le bassin de l'Oued Joumouaa, les valeurs de K ont été dérivées en utilisant les données de la FAO (Digital Soil Map of the World, 2019) <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata> (Toubal et al. 2018). Une vulnérabilité et un taux d'érosion peuvent être déterminés par le facteur k, qui est également connu comme le facteur d'érodabilité. L'approche de William et al. a été utilisée pour calculer le facteur K (Sharpley et Williams, 1990) (3) :

L'équation suivante est utilisée pour l'estimation du facteur K calculée par l'équation du nomogramme citée par (Mannaert, 1999), qui combine la taille des particules, le % MO, le code de structure du sol et la cote de perméabilité du profil selon l'équation calculée :

$$k = \left[0.2 + 0.3 \exp \left(0.0256SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right) \right) \right] \left(\frac{SIL}{CLA} + SIL \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{c + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \quad (3)$$

$$\times \left[1 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 2.9SN1)} \right]$$

SAN, SIL et CLA sont les abréviations de la fraction sableuse du sol, de la fraction limoneuse et de la fraction argileuse.

(pourcentage). Le symbole C représente la teneur en carbone de la couche arable (pourcentage). $SN1 = 1 - SAN/100$.

La texture, la rugosité, la structure, la teneur en matière organique et la teneur en humidité ont tout un effet sur la capacité du sol à résister à l'érosion. L'érodabilité et la susceptibilité à l'érosion du sol sont réduites par sa teneur en matière organique. Le fractionnement a entraîné une augmentation de l'infiltration.

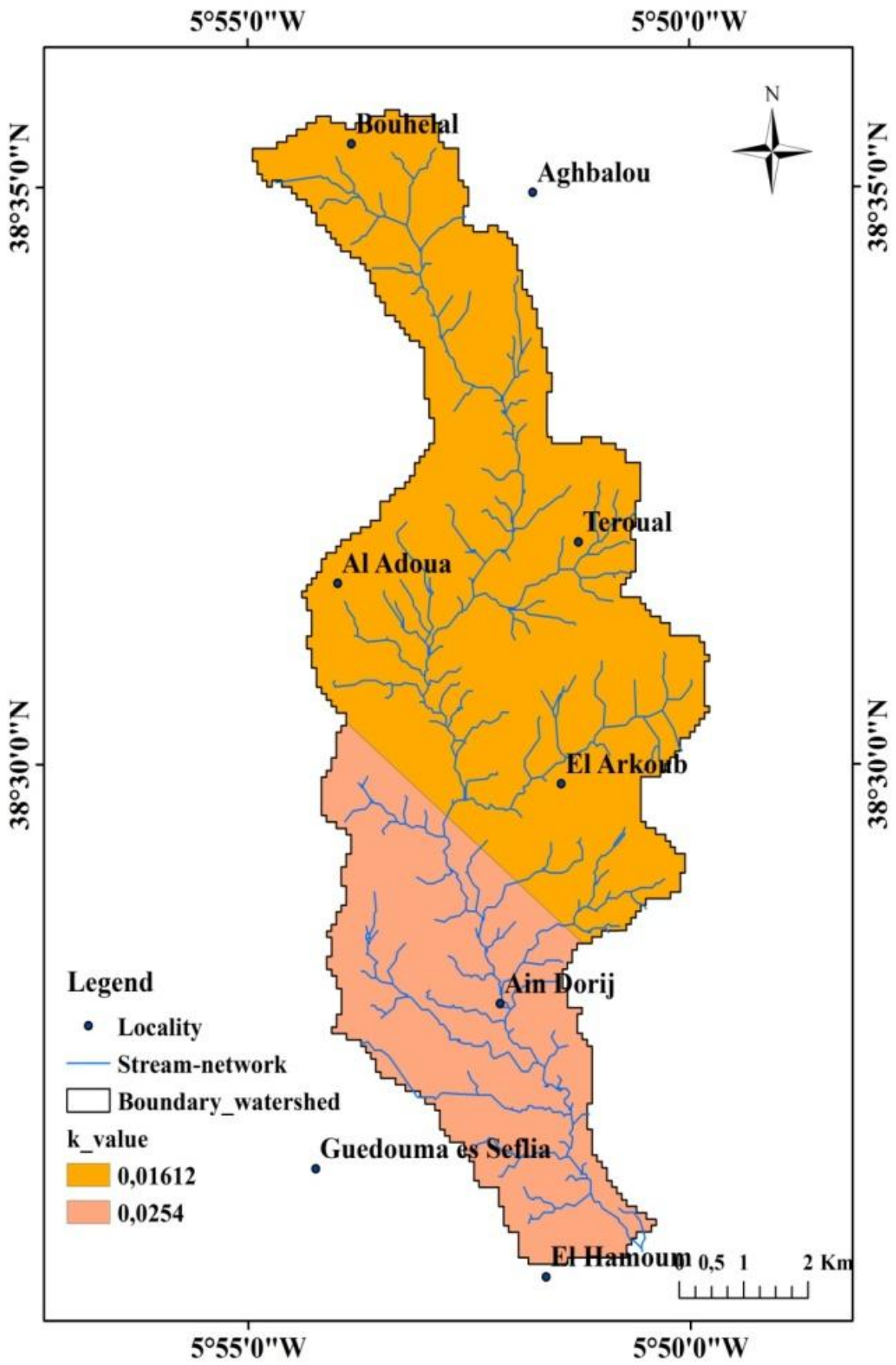


Figure 63 : Carte d'érodibilité du sol dans le bassin de l'oued Joumouaa.

Le facteur K d'érodabilité du sol représente l'effet des propriétés du sol et des caractéristiques du profil du sol sur la perte de sol. Par conséquent, il indique qu'un certain type de sol est résistant à l'érosion en général. Cependant, la valeur de l'élément K, d'autre part, est contrôlée par le potentiel de pénétration du sol. Les sols avec des valeurs de K plus élevées étaient plus sensibles à l'érosion du sol, basé sur la distribution du facteur géographique K dans la zone de recherche (Fig.7.b). En conséquence, on a trouvé des valeurs K plus basses (0.01612 à 0.0254 T/H/HA/MJ/mm), qui indiquaient une érodabilité du sol faible à modérée.

3- Classe topographique : LS

Le facteur LS est une mesure de l'impact de la composante topographique sur l'érosion des sols. Il prend en compte la topographie d'un certain endroit afin de prévenir l'érosion du sol. L'aspect topographique fait ici référence à la susceptibilité de la zone de recherche à l'érosion topographique. Le facteur LS, est un facteur topographique du bassin versant de l'Oued Inaouène, il se compose de (L), la longueur de pentes qui conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules arrachées (Tahiri et al, 2017) et (S) l'angle (l'inclinaison) des pentes qui influencent considérablement l'érosion hydrique des sols (Roose, 1994). La formule du facteur LS établie par Wischmeier et Smith (1960) est la suivante :

$$LS = \lambda 0.5 (0.0076 + 0.0053 * \alpha + 0.00076 * \alpha^2)$$

Mais leurs calculs s'effectués à partir du modèle numérique de terrain (MNT), par superposition des cartes des longueurs des pentes et les gradients de pentes.

L'érosion est influencée par la longueur et la raideur de la pente. Les facteurs LS varient de 0 (le plus bas) à plus de 43% (partie supérieure). Comme l'illustre la carte (Fig65), la majorité du bassin versant de l'Oued Joumouaa présente des valeurs LS faibles.

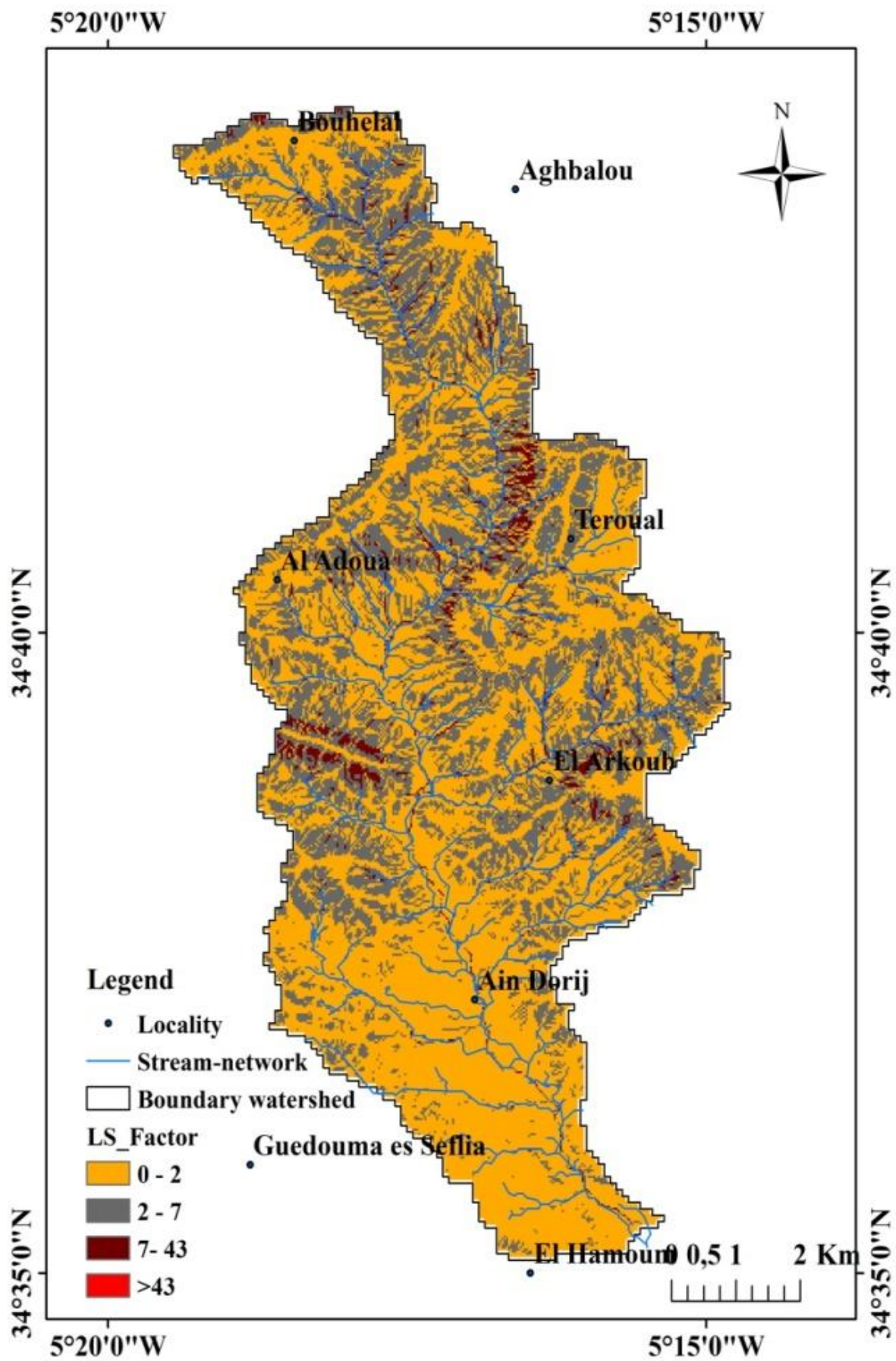


Figure 64: Carte du facteur topographique LS du bassin de l'oued Joumouaa.

4- Classe couvert végétal C

Le facteur C évalue les impacts cumulatifs des arbres sur la dégradation des sols, selon Benzougagh et al. (2020), les séquences de cultures et les autres zones de couverture végétale, répartis entre les intervalles (0,01-1). Le couvert végétal est le second après la topographie en termes d'importance dans la réduction de l'érosion des sols. (Panagos et al 2020). En termes de perte de sol, pour les terres agricoles, le rapport entre la perte de sol et la perte de sol provenant des terres nues labourées et travaillées en continu est connu sous le nom de "Facteur C." Avec une couverture adéquate, le risque d'érosion du sol est réduit. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et d'autres indices de végétation sont des mesures quantitatives basées sur les caractéristiques spectrales de la végétation qui tentent de mesurer la biomasse végétative (Agapiou et al, 2011). L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) de la région d'étude a été calculé à partir d'images Landsat 8 avec une résolution de 30 mètres.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

PIR et R représentent respectivement le proche infrarouge et le rouge sur la roue des couleurs. L'image Landsat 8 montre les bandes 5 et 4 du spectre du proche infrarouge.

Des valeurs plus élevées indiquent une végétation plus importante, tandis que des valeurs plus faibles indiquent une absence de végétation, selon que le NDVI est appliqué à des sources terrestres ou aquatiques nues (Karaburun 2010). La formule pour calculer la valeur C est la suivante (Jong 1994).

$$c = e^{(-\alpha \left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI} \right))}$$

où $\alpha = 2$ et une valeur de 1 semblent produire des résultats appropriés (Van et al. 2020).

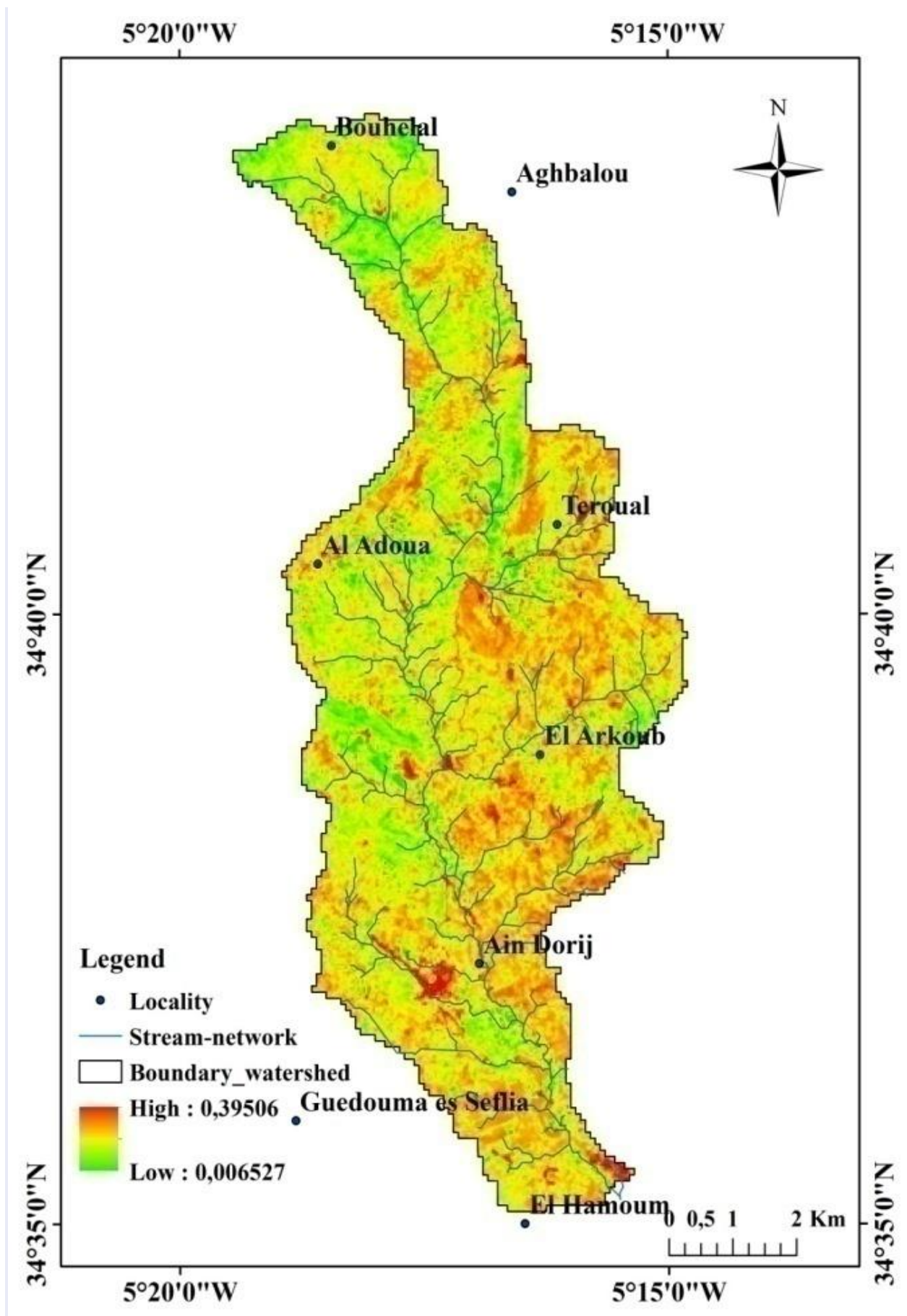


Figure 65 : Carte montrant le facteur C dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Le facteur C exprime numériquement les résultats de la couverture végétale disponible pour toutes les zones terrestres du modèle RUSLE, qu'il s'agisse d'agriculture ou de techniques d'atténuation de l'érosion du sol. L'indice végétal de différence normalisée (NDVI) est la mesure de référence de l'industrie de la télédétection pour mesurer la croissance de la végétation (NDVI). L'équation 5 est utilisée pour construire cet indice à partir d'images satellites dans le logiciel QGIS. Le type de végétation et sa couverture déterminent les valeurs du Facteur C. La végétation verte a des valeurs NDVI plus élevées que les matériaux de surface typiques comme l'asphalte, le béton et le bitume. Les valeurs NDVI de la végétation verte sont supérieures à celles des matériaux de surface classiques tels que l'asphalte, le béton et l'asphalte. L'échelle NDVI va de -1,0 à 1. Les valeurs NDVI négatives indiquent qu'il y a de l'eau sur le sol, et les valeurs NDVI positives indiquent qu'il n'y a pas d'eau sur le sol. Alors que le facteur C et le NDVI de RUSLE sont présentés dans la Figure 8, les valeurs NDVI du bassin versant de Oued Joumouaa sont présentées dans la (Figure 9.a).

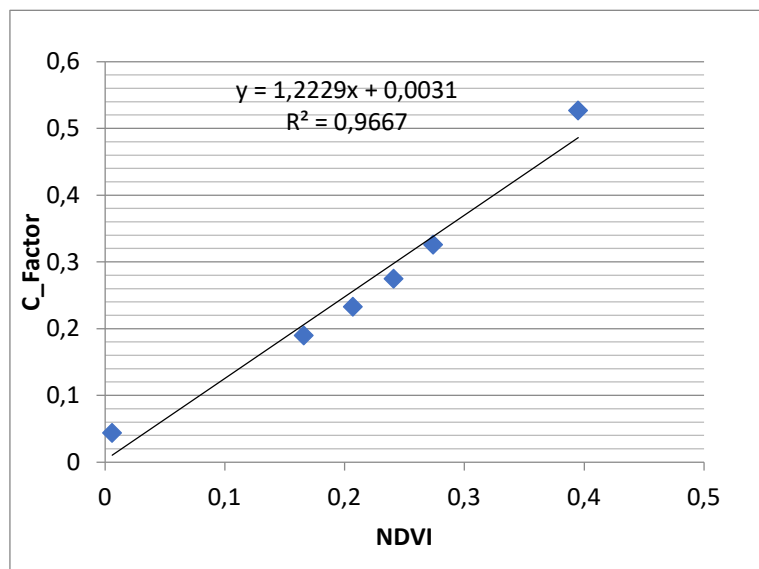


Figure 66 : la relation entre NDVI et le facteur C.

Le facteur C de gestion du couvert végétal calculé par RUSLE est présenté dans la (Fig.10.a) comme une distribution mondiale. Il y avait une large gamme de facteurs C dans la zone d'étude, de 0,006 à 0,395. Il était de 0,20 sur cette carte pour le bassin de l'Oued Joumouaa, les facteurs C les plus élevés représentant une couverture végétale plus importante et les facteurs C les plus faibles suggérant des zones arides. La carte résultante révèle que l'ensemble du bassin a une couverture végétale minimale, avec seulement quelques petites poches de couverture décente au nord et à gauche.

La figure 4 montre les formes les plus courantes d'utilisation des terres dans la région de recherche. En raison de l'augmentation des précipitations dues au réchauffement climatique, les sols recouverts de végétation résistent mieux à l'érosion.

5- Classes pratiques anti-érosives P

Le facteur (P) est un facteur artificiel reflétant les pratiques de contrôle de l'érosion des sols qui explique l'effet des mesures de conservation des sols et de l'eau dans l'estimation de l'érosion, et est déjà utilisé par les agriculteurs et les aménageurs du bassin versant. Les valeurs de ce facteur ont été retenues pour toute occupation et utilisation du sol, et elles sont données par Wischmeier et Smith (1978) selon le tableau ci-dessous.

Tableau 29 : Valeurs du facteur P (Wischmeier & Smith,1978).

| Type de pratiques antis érosives | Pente | Longueur maximale | Valeur de P |
|--|-----------|-------------------|-------------|
| Culture en courbe de niveau | 1 à 8 % | 61 à 122m | 0.5 |
| Culture en courbe de niveau | 9 à 12% | 36 m | 0.6 |
| Culture en courbe de niveau | 13 à 16% | 24m | 0.7 |
| Culture en courbe de niveau | 17à 20% | 18m | 0.8 |
| Culture en courbe de niveau | 21à 25% | 15m | 0.9 |
| Culture en courbe de niveau avec bandes herbacées | 1 à 8% | 30 à 40m | 0.25à 0.5 |
| Culture en courbe de niveau avec bandes herbacées | 9 à 16% | 24 m | 0.3 à 0.6 |
| Culture en courbe de niveau avec bandes herbacées. | 17 à 25 % | 15 m | 0.4 à 0.9 |

A l'échelle de la zone d'étude, la protection contre l'érosion est rare et se limite généralement aux terres cultivées avec ou sans murets sur courbes de niveau, à l'arboriculture périmétrique à base

d'amandiers, d'oliviers et de cultures, le plus souvent au niveau de la vallée (surtout la culture cannabique). La valeur P utilisée variait entre 0,7 et 1.

V- Quantification des pertes en sol dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa selon le modèle de Wischmeier.

Cela implique d'estimer les dépôts de divers processus d'érosion sur les pentes du bassin versant. Cette estimation est dérivée en intégrant tous les facteurs de l'équation universelle de perte de sol de Wischmeier (R, K, LS, C et P). L'intégration spatiale de ces facteurs a été réalisée par le logiciel QGIS (2.18.2) au niveau du pixel de 30 x 30 m. La moyenne pondérée est pondérée par zone. La perte moyenne de terres pour chaque sous-bassin versant est pondérée au niveau du pixel. Cette intégration se traduit par une moyenne de perte de terres (A) pour chaque sous-bassin versant.

Cette recherche confirme l'efficacité des techniques géospatiales (outils SIG, et télédétection) dans l'évaluation de l'érosion potentielle des sols et de leur dispersion dans l'espace. L'érodabilité du sol, la longueur et la pente de la pente, la gestion de la couverture du sol et la conservation du sol ont tous été identifiés comme des facteurs d'érosion potentiels. L'incorporation de données SIG au modèle RUSLE permet d'obtenir des résultats plus précis.

Une carte des taux d'érosion des sols pour le bassin versant de l'Oued Joumouaa a été créée dans cette étude. Pour générer les facteurs d'entrée du modèle RUSLE, diverses sources de données ont été consultées et enregistrées dans QGIS sous forme de couches SIG matricielles (version 2.18.2.). La figure 68 illustre la carte d'érosion annuelle du bassin versant de l'Oued Joumouaa de la recherche comme conséquence du modèle de perte potentielle de sol, qui permet d'identifier les zones sujettes à l'érosion du sol.

Nous avons utilisé la classification la plus couramment utilisée dans différentes études d'érosion utilisant le modèle RUSLE pour améliorer la lisibilité de cette carte. Selon cette catégorisation, les sols peuvent supporter des pertes annuelles allant jusqu'à 10 t/ha, tandis que des pertes supérieures à 50 t/ha sont inquiétantes. Les pertes moyennes pour les unités homogènes du site d'étude sont de l'ordre de 25,77 t/ha/an, avec des pertes minimales et maximales de 0,21 t/ha/an et 280 t/ha/ha, respectivement. La carte des pertes de sol montre que 86,87 % de la superficie du bassin présente des pertes relatives (classe 0,21 à 10 t/ha/an), 12,71 % des pertes importantes (classe 10 à 50 t/ha/an), et le reste du bassin présente des pertes alarmantes (supérieures à 50 t/ha/an) qui occupent 0,49 % de la superficie du bassin (Fig.68).

Les valeurs maximales des pertes de sol dans les classes 10-50 t/ha/an et 50-280 t/ha/an se trouvent surtout dans les zones centrales et amont du bassin versant. Ce résultat est cohérent avec celui de l'application de l'approche PAP/CAR dans le même bassin versant (Fartas et al. 2021), qui indique que le risque très élevé d'érosion hydrique est largement confiné à la partie centrale du bassin versant et à l'extrême nord du bassin versant sur des sites présentant des badlands. Ces derniers correspondent à des marnes de nature friable, non recouvertes de végétation et qui présentent des altitudes élevées.

La validité relative du modèle utilisé est démontrée par la comparaison des résultats obtenus avec les études menées dans d'autres bassins versants du Rif occidental. En effet, selon Moukhchane et al. (1998), les pertes moyennes de sol dans les zones fragiles du domaine du Rif avoisinent les 17 tonnes par hectare et par an. Selon Ait Brahim et al. le bassin versant de Nakhla perd 38,7 t/ha par an (2003). Le bassin versant de l'Oued Khmiss perd 37t/ha/an selon Khali Issa et al. (2014), tandis que le bassin versant de Tlata perd 32,5t/ha/an selon Dahman (1994). À des altitudes allant de 25 à 690 mètres, Tahiri et al. (2014) ont calculé une perte annuelle moyenne de 47,18 t/ha/an pour le sous-bassin de Oued Sania.

Dans le bassin versant de l'Oued Sahla (dans le Rif central), Sadiki et al (2009). ont utilisé le modèle RUSLE pour calculer un flux annuel moyen de 22 t/ha. En 2004, le même auteur a découvert une perte d'environ 55 t/ha/an dans le bassin versant de l'Oued Boussouab (Rif oriental). D'autres modèles ont donné des résultats similaires à ceux obtenus par le modèle RUSLE, prouvant ainsi la validité de cette technique.

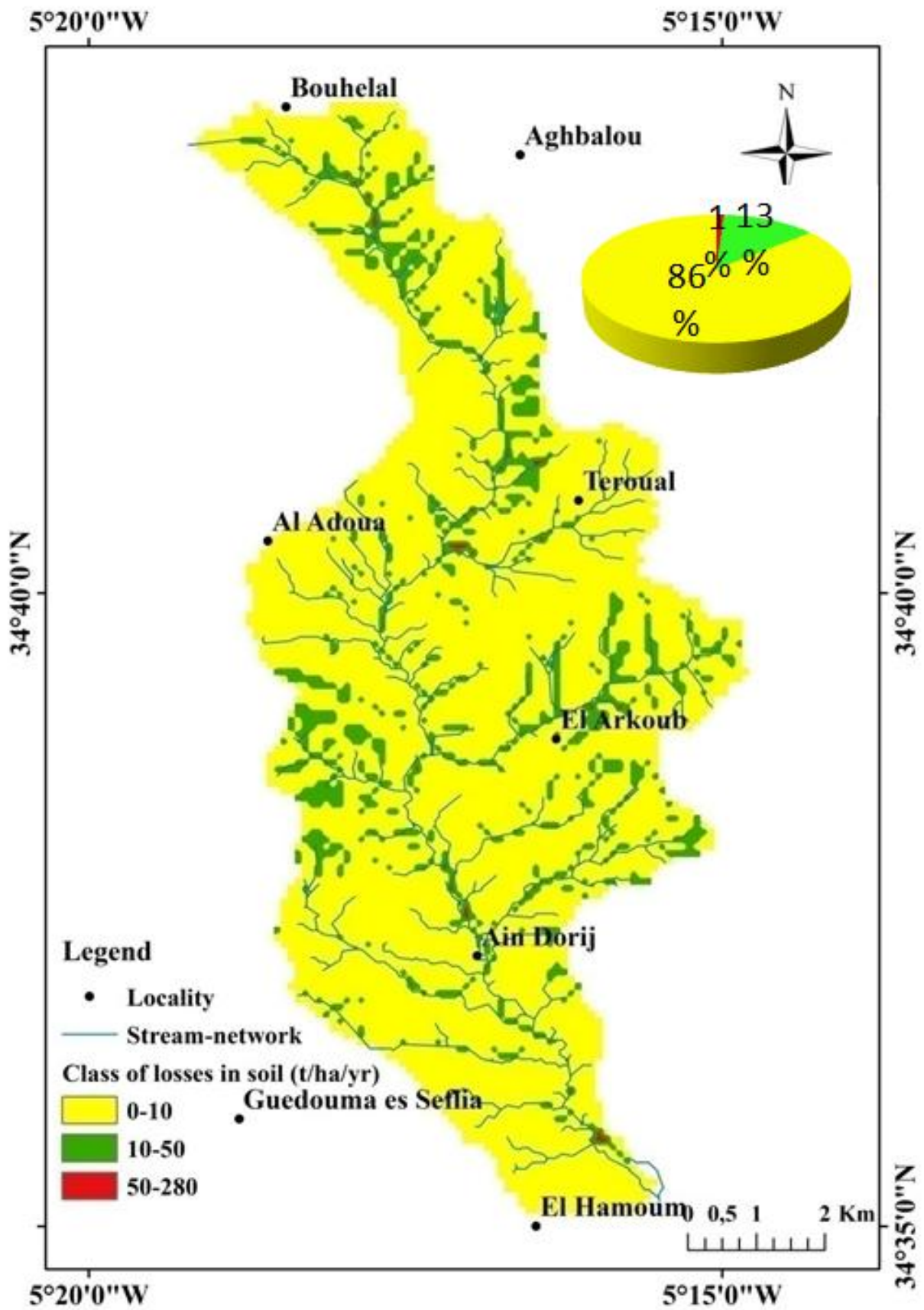


Figure 67: Carte des classes des pertes en sol le bassin versant de l'Oued Joumouaa.

Conclusion

Une évaluation quantitative du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa indique que le bassin est vulnérable à l'érosion. Ce dernier est constitué de 12 zones homogènes, qui se caractérisent par la prédominance des formations marneuses (plus de 70%). Les sols et les formations peu profondes provenant de la topographie marneuse sont très sensibles aux éclipses solaires. Ceci est d'autant plus important que la terre est presque entièrement dénudée et labourée. L'énorme perte de terres enregistrée chaque année montre l'imbrication des facteurs naturels et humains.

L'utilisation de RUSLE dans le SIG a permis d'examiner rapidement les différentes manières de réduire la dégradation des sols dans le bassin versant de Joumouaa. Le SIG et le modèle RUSLE ont été utilisés pour estimer quantitativement les pertes en sol : 86 % de la superficie du bassin est soumise à des risques d'érosion hydrique avec des pertes annuelles moyennes variant entre 0-10t/ha/an. 13 % du bassin révèle des pertes qui varient entre 10-50 t/ha/an et sont principalement concentrées au milieu de la région de recherche sur des pentes faibles, des sols à faible érodabilité et des valeurs de précipitations minimales. Les pertes maximales entre 50-280 t/ha/an sont au milieu du bassin versant, présentes sauf 1% de la superficie du bassin versant et coïncident avec les mauvaises terres à haut risque d'érosion trouvées par l'étude qualitative de l'érosion dans ce bassin versant. La perte de sol est bien corrélée avec les éléments de l'équation universelle actualisée (topographie, érodabilité, climatologie et couverture végétale). Bien que la méthode RUSLE continue à susciter des débats sur ses limites et ses conditions d'utilisation, notamment parce qu'elle ignore d'autres types d'érosion comme l'érosion linéaire, le sapement des berges et la resédimentation, elle reste un outil d'aide à la décision pour la gestion des bassins versants par les administrations chargées de la lutte contre l'érosion. Ces résultats peuvent être complétés par ceux obtenus par d'autres méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique. D'autres méthodes, comme les méthodes radio-isotopiques, le modèle SWAT (Soils Water Assessment Tools), l'étude des griffes d'érosion, les mesures bathymétriques, sont intéressantes pour plus de précision.

***Chapitre VII : Caractérisation
physicochimique des sols agricoles et
estimation de la stabilité structurale au
niveau du bassin versant de l'Oued
Joumouaa***

Chapitre VI : Caractérisation physicochimique des sols agricoles et estimation de la stabilité structurale au niveau du bassin versant de l'Oued Joumouaa

Résumé

La dégradation des sols entraîne une altération des fonctions écologiques et économiques due à une diminution de la productivité et de la qualité du sol. L'objectif de la présente étude était d'évaluer la dégradation du sol par l'identification des facteurs physico-chimiques du sol afin d'identifier les propriétés du sol qui pourraient être utilisées comme indicateurs pour les futurs programmes de conservation de la qualité du sol et leur relation avec le risque d'érosion du sol dans le bassin versant de Oued Joumouaa. Des échantillons de sol provenant de trois emplacements avec, en moyenne, de 0 à 20 cm de profondeur, répartis sur trois stations, de manière aléatoire. Des analyses discriminantes et factorielles ont permis d'identifier les principaux facteurs pédologiques,

Les résultats des analyses physico-chimiques (texture, pH, matière organique, carbonate de calcium, phosphore assimilable, potassium échangeable, stabilité structurale), montrent que les sols ont des textures limono-argileuses-sableuses, un pH modérément basique (7,8 à 8), un taux de carbonate qui varie de (16,86 à 20,36). La matière organique varie de 1,73 à 3,94. Le phosphore assimilable varie de 13,46 à 14,85, La stabilité structurale de ces sols sous l'eau a révélé qu'ils sont généralement instables, avec des diamètres pondéraux moyens allant de 0,56 (station 1) à 1,1 (station 2) et 1 (station 3). Par conséquent, il est suggéré que la présente étude peut être appliquée à des projets avec une pertinence particulière pour les pédologues, les scientifiques de l'environnement et les agences de planification qui peuvent utiliser la présente étude comme données de base pour lutter contre la dégradation des terres et conserver les ressources foncières d'une manière efficace.

I-Introduction

Le sol est l'une des ressources les plus importantes de la nature, il n'est pas seulement important pour l'agriculture, mais aussi pour les organismes vivants (Ku, 2015). La compréhension des réactions et des processus chimiques du sol est essentielle pour développer des stratégies innovantes de gestion des ressources, et pour comprendre et adapter la performance de l'écosystème terrestre à l'échelle régionale et mondiale (Schnitzer, 1986). Tout le monde est

concerné par le sol, que ce soit directement ou indirectement. C'est un écosystème fragile et un corps naturel sur lequel prospèrent les produits agricoles (Sinha et Shrivastav, 2000). Les sols agricoles soumis à l'érosion, au surpâturage, à l'intensification et à l'utilisation d'outils de travail, subissent une dégradation importante qui affecte les paramètres biologiques, physiques et chimiques de la qualité du sol. La dégradation des sols est un sujet important du changement climatique global, qui contribue directement à la durabilité de la qualité de l'environnement écologique et au développement socialement durable (Benzougagh et al., 2020). Ainsi, dans les sols, on constate une diminution du taux de la matière organique principale qui influence plusieurs propriétés fonctionnelles du sol (Loveland & Webb, 2003 ; Sadeq et al., 2022). L'intrication des facteurs agricoles du sol se traduit par les propriétés du sol. Les caractéristiques physico-chimiques des différents sols varient dans le temps et l'espace en raison des variations de la topographie, du climat, des processus d'altération physique, de la couverture végétale, des activités microbiennes et de plusieurs autres variables biotiques et abiotiques (Paudel et Sah, 2003). Ce paramètre important (la matière organique) peut améliorer la stabilité structurale du sol en fonction de la nature, de la qualité et des conditions du milieu (Aoyama et al., 1999 ; Spacinni et al., 2004 ; Abiven, 2004). Plusieurs études menées dans le monde entier ont mis en évidence un lien entre la teneur en matière organique du sol et la stabilité structurale du sol. (Dutartre et al., 1993 ; Chenu et al., 2001 ; Le bissonnais et al., 2002 ; Fadwa ; 2015). En effet, plus le taux de matière organique est élevé, plus l'instabilité est faible.

Dans les zones semi-arides du Maroc destinées au maraîchage, les sols agricoles connaissent une dégradation de leur qualité sous l'effet d'une exploitation excessive. Cette dégradation se manifeste par une diminution du taux de matière organique d'une part et par une oxydation d'autre part (Mrabet et al., 2004). La surexploitation des ressources naturelles, couplée au phénomène de la sécheresse, conduit inévitablement à la dégradation des sols et des eaux, qui se traduisent par des problèmes de salinisation, de sodification, de détérioration de la structure des sols, d'engorgement et de pollution nitrique (El Oumlouki et al., 2014).

Il y a une prise de conscience croissante que l'épuisement des nutriments du sol de l'agro écosystème est un problème très répandu et une contrainte immédiate de la production végétale dans la zone d'étude. Un changement dans l'utilisation des terres, une mauvaise gestion des sols, la topographie de la zone et les activités socio-économiques peuvent affecter négativement l'utilisation potentielle d'une zone et peuvent finalement conduire à la dégradation des terres et à la perte de productivité. La perte de terres arables due à la dégradation des sols est un phénomène très répandu dans le bassin versant d' Oued Joumouaa. Par conséquent, l'objectif de

cette recherche était d'évaluer les effets des différents types d'utilisation des terres, des pratiques de gestion et des classes de pente sur certaines propriétés physico-chimiques du sol et leur relation avec le déclenchement du risque d'érosion hydrique du bassin versant de Oued Joumouaa (5° 18.985'O et 5° 15.723'O est et les latitudes 34° 43.916'N et 34° 35.176'N nord dans le sud du Rif - Maroc).

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa est affecté par l'intensification agricole, il constitue des espaces destinés à la culture de l'olivier et au maraîchage. L'objectif de cette recherche est d'évaluer et de définir la qualité physico-chimique des sols du bassin versant de l'Oued Joumouaa, ainsi que de comprendre les multiples usages qui peuvent en être faits. Ainsi, analyser les relations qui existent entre la dégradation, la battance et la sensibilité à l'érosion des sols, après des analyses sur la stabilité structurale. Cette instabilité est influencée, en plus des facteurs mentionnés ci-dessus, par l'influence du changement climatique dans la région.

II-Matériels et méthodes

1 -Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa, situé dans la partie sud du Rif, est un sous-bassin de l'Oued Ouergha. Il a un périmètre de 59 kilomètres et une superficie de 60 kilomètres. Il est délimité par Zoumi au nord, Oued Ouergha au sud, Oued Drader à l'est et Tafrant Ouergha à l'ouest. Il est situé entre les longitudes 5° 18.985'O et 5° 15.723'O est et les latitudes 34° 43.916'N et 34° 35.176'N nord dans le sud du Rif. Le bassin versant de Zoumi borde la zone d'étude au nord, le bassin versant de Ouergha au sud, le bassin versant de Oued Drader à l'est et le bassin versant de Tafrant ouergha à l'ouest.

La région de recherche s'étend du nord-est au sud-ouest, avec un dénivelé important allant de 91 à 752 mètres, ainsi qu'un relief à forte composante collinaire qui favorise la genèse du risque d'érosion hydrique (Fig.69).

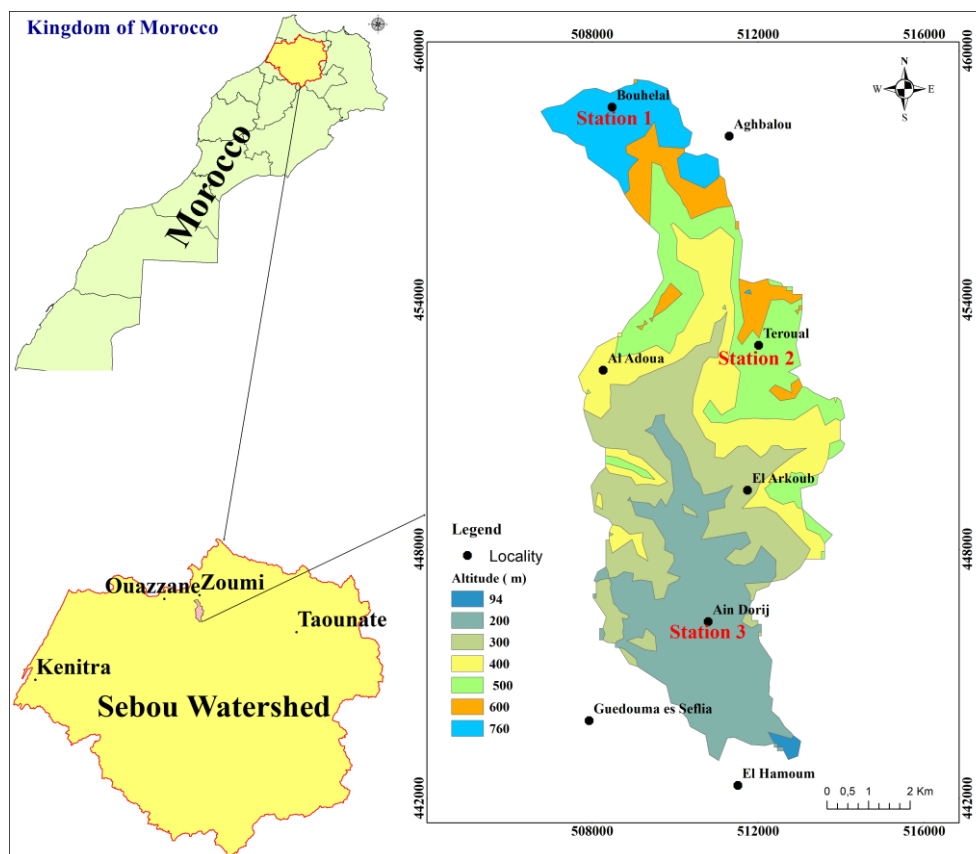


Figure 68: Situation géographique de la zone d'étude avec localisation des trois stations.

2 -Echantillonnage et méthodes d'analyses

L'échantillonnage a été effectué dans l'horizon (0-20cm) au niveau des trois stations agricoles qui ont été sélectionnées en hiver 2019. On a prélevé vingt échantillons dans chaque station : Bouhlal (station 1), Teroual (station 2), Ain dorij (station 3). Généralement les parcelles choisies sont des parcelles destinées aux cultures des oliviers et des maraichères. Les échantillons ont été tout d'abord séchés à l'air libre pendant une semaine ensuite broyés au mortier en porcelaine puis tamisés à 2 mm et ensachés pour différentes analyses physicochimiques : (le pH, la matière organique, le carbonate de calcium, le phosphore assimilable, la conductivité électrique, le potassium échangeable et la stabilité structurale).

La détermination de la texture a été réalisée par la méthode de pipette de Robinson (AFNOR, 2003).

pH (pH eau et pH-kcl) (potentiel hydrogène) est déterminée par la méthode potentiométrique à l'aide d'un pH mètre (Mc.Lead, 1982).

La Conductivité électrique (CE) est mesurée par la méthode de la pâte saturée à l'aide d'un conductimètre, elle est exprimée en ds/m (USSLS ,1954).

La matière organique (MO), la teneur a été évaluée selon la méthode Walkey et Black, qui consiste à une oxydation à froid de la fraction organique du carbone par le bichromate du potassium ($K_2Cr_2O_7$ à 1 N) en milieu acide et un titrage en retour par sel de Mohr (SO_4Fe , $SO_4(NH_4) 2,6H_2O$ à 0.5N). Le taux de la matière organique est estimé en multipliant le pourcentage du carbone organique par le facteur 1. 724, le résultat exprimé en % (Walkey et black, 1934).

Le carbonate de calcium a été réalisé par la méthode de Bernard décrite par Chamley (1966).

Le phosphore assimilable (P_2O_5) est déterminé par la méthode Olsen dans laquelle l'extraction est fait par hydrogénocarbonate sodium à ph égal à 8.5. Cette méthode est basée sur la formation et la réduction d'un complexe d'acide orthophosphorique et de l'acide molybdique (coloration bleu ciel). La lecture de la teneur de phosphore s'effectue à l'aide d'un spectrophotomètre UV visible, le résultat s'exprime en ppm (Olsen, 1954).

Le Potassium échangeable et le sodium : l'extraction s'effectue par l'acétate d'ammonium CH_3COONH_4 1N0 PH égal à 7 les teneurs de K_2O et Na^+ sont déterminés à l'aide d'un photomètre à flamme, les résultats s'expriment en ppm. (Van Rast, 1999).

La Stabilité structurale : L'objectif de la méthode proposée est de donner une description réaliste du comportement des matériaux sols soumis à l'action de pluie, et de permettre le classement relatif des matériaux vis-à-vis ce comportement (Le Bissonais ,1995). La méthodologie est inspirée du test classique de (Hénin et al., 1958), mais elle intègre certains aspects d'autre méthodes (Yoder,1936 ; Griev,1980 ; Kemper& Rosenau,1986) ainsi que les résultats des dernières recherches réalisés dans ce domaine à l'INRA (Le Bissonais ,1995).

L'objectif des trois tests proposés est de rendre compte ce comportement dans les différents conditions climatiques, hydriques, que l'on peut rencontrer à la surface du sol. (Le Bissonais, 1995) :

-Traitement : humectation rapide par immersion

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs soumis à des humectations brutales, du type irrigation par submersion, ou des pluies intenses (orages de printemps et été).

-Humectation lente par capillarité

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux secs ou peu humides soumis à des pluies modérées. Il est moins destructif que l'humectation rapide et permet de discriminer des sols très peu stable.

-Désagrégation mécanique par agitation après rhumectation

Ce traitement permet de tester le comportement de matériaux humides (périodes hivernales humides). La rhumectation préalable a pour objectif de tester la cohésion des matériaux à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Cette rhumectation sans éclatement peut être réalisée soit par rhumectation sous vide soit par l'utilisation de non polaire et miscible à l'eau. L'éthanol convient très bien dans ce cas (Hénin et al., 1958).

On a prélevé 9 mottes dans les trois sites étudiés et les ramenées dans des boîtes rigides et rapidement mis à sécher à l'air dans une atmosphère tempérée et ventilée. Pour chaque traitement, on mesure la distribution de la taille de particules produits (>2 mm, 1mm, 0.5mm, 0.2mm, 0.1, et <0.1mm). Ensuite on calcule le diamètre moyen pondéral après désagrégation (DMP) valeur comprise entre 0.05 mm et 4 mm). Selon Le bissonais (1995), le calcul des DMP est la meilleure technique de faire facilement des interprétations spécifiques et des comparaisons entre les sols (Tab.28).

Tableau 30: Classes de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (DMP) (Le bissonais, 1995).

| DMP | Stabilité | Battance | Ruissellement et érosion diffuse |
|------------|--------------------|-----------------|--|
| <0.4mm | Très instable | Systématique | Risque important et permanent en toutes conditions topographiques |
| 0.4-0.8mm | Instable | Très fréquente | Risque fréquent en toute situation |
| 0.8-1.3mm | Moyennement stable | Fréquente | Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques |
| 1.3-2.0mm | Stable | Occasionnelle | Risque limité |
| >2.0mm | Très stable | Très rare | Risque très faible |

III-Résultats et discussions

1 -Texture du sol

L'analyse texturale du sol par pipette de Robinson a montré que les sols étudiés sont de type limono argilo sableux. Les trois stations présentent des teneurs en argile élevées par rapport aux deux autres portions (limon et sable) (Tab.29).

Tableau 31 : Caractérisation texturale moyenne des sols étudiés.

| La terre fine | | | | | | La partie minérale | | |
|---------------|--------|-----------|----------------|-----------|----------------|--------------------|-------|-------|
| Stations | % | % | % | % | % | % | % | % |
| | Argile | Limon fin | Limon grossier | Sable fin | Sable grossier | Argile | Limon | Sable |
| S1 | 39,1 | 9,7 | 7,3 | 11,5 | 10,2 | 50,6 | 21,8 | 27,2 |
| S2 | 39,31 | 10,97 | 7,95 | 11,86 | 7,24 | 50,23 | 21,49 | 26,95 |
| S3 | 36,8 | 10,4 | 8,2 | 13,2 | 9,2 | 46,3 | 25,3 | 26,5 |

D'après l'analyse du tableau ci-dessus (Tab.29) on constate que le pourcentage d'argile est plus important dans la station 1 avec 50.6% qu'en la station 3 avec 46.3%. Tandis que la fraction du sable présente des teneurs qui diminuent légèrement de la station 1 avec 27.2% vers la station 3 avec 26.5 (Tab.29). La fraction de limon présente des teneurs qui augmentent de la station 1 avec 21.8% vers la station 3 avec 25.3%.

Les sols analysés révèlent légèrement semblable à celle de la région de Ouazzane (périmètre de Bou Daroua) qui sont de type calcique mélaniques sur marnes crétacées avec des pourcentages d'argiles variant entre 42% et 54% et des pourcentages de limons variant de 23% à 40% et des pourcentages des sables faibles variant de 4.5% à 5% (Durand,1970).

2-pH du sol

Le pH du sol est une représentation synthétique des conditions physico-chimiques qui contrôlent la structure du sol, l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments dans une certaine mesure. (Genot et al, 2007). Le pH joue un rôle crucial dans le mécanisme de libération des

nutriments (Farah et al, 1979), c'est un indice du niveau général du sol en éléments chimiques assimilables.

En 1988, Baize a pu diviser les sols en trois groupes sur la base des valeurs de pH de l'eau : les sols acides dont le pH est compris entre 0 et 6, les sols neutres dont le pH est égal à 7, et les sols basiques ou alcalins dont le pH est supérieur à 8.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de variation significative de cette composante entre les sols des trois stations de notre région de recherche.

En réalité, le pH du sol de ces trois endroits est généralement comparable (fig. 2), avec des valeurs de 8,07SI, 7,87 SII et 7,84 SIII, respectivement. Cependant, les résultats d'une recherche effectuée par Naaman (2001) et Droussi (2005) ont révélé que le pH des différents secteurs du périmètre irrigué de Doukkala (pH moyen = 7,74) est moins basique qu'on ne le pensait.

L'alcalinité de ce sol peut être attribuée à divers facteurs, notamment à la présence de cations (tels que Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans le sol, ce qui est appelé " alcalinisation ", ou à la présence de sodium (Na^+), ce qui est appelé " sodication marine " en raison de la proximité du sol avec la mer.

Le pH du sol est directement lié aux cations et anions échangeables. Ce paramètre est positivement corrélé dans la station 3 avec tous les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique, matière organique, teneur en calcaire, phosphore assimilable et potassium échangeable). Alors que dans les stations 1 et 2, la corrélation est parfois négative. Il faut noter que lorsque la corrélation est positive elle permet de dire qu'il n'y a pas d'érosion et lorsque la corrélation entre les paramètres est négative elle permet de dire qu'il y a de l'érosion dans ces stations.

Tableau 32: Résultats de mesures de pH des trois stations de la zone d'étude.

| pH des trois stations | | | |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Échantillons | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| E1 | 8,38 | 7,58 | 7,6 |
| E2 | 8,32 | 7,69 | 6,8 |
| E3 | 8,37 | 7,44 | 7,49 |
| E4 | 7,97 | 7,52 | 7,8 |
| E5 | 7,84 | 7,41 | 7,94 |
| E6 | 7,77 | 8,11 | 7,93 |

| | | | |
|---|---------------|---------------|--------------|
| E7 | 7,88 | 8,25 | 8,04 |
| E8 | 8 | 8,33 | 7,57 |
| E9 | 8,09 | 8,28 | 7,78 |
| E10 | 8,09 | 8,15 | 7,94 |
| E11 | 7,95 | 8,14 | 7,81 |
| E12 | 8,01 | 8,12 | 7,89 |
| E13 | 7,91 | 7,99 | 8,06 |
| E14 | 9,62 | 8,38 | 8,14 |
| E15 | 7,98 | 8,21 | 7,8 |
| E16 | 7,98 | 8,31 | 8,08 |
| E17 | 7,62 | 6,83 | 8,08 |
| E18 | 7,84 | 7,37 | 8,18 |
| E19 | 7,8 | 7,62 | 7,92 |
| E20 | 8,15 | 7,72 | 8,11 |
| La moyenne (Σ) | 8,0785 | 7,8725 | 7,848 |

3 - Conductivité électrique (la salinité)

La salinisation des sols est un problème majeur à l'échelle du globe, elle affecte déjà au moins 400 millions hectare et en menace gravement une surface équivalente (FAO, 2005). En se basant sur la méthode destructive (destruction des sols), La salinité consiste à mesurer la conductivité électrique à l'aide de la pâte saturée ou les extraits aqueux.

Les résultats de l'analyse de la conductivité électrique se sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tab.31). Les sols au niveau de la station 1 sont non salin, ainsi que les sols au niveau des stations 2 et 3 sont peu salin.

Tableau 33: Résultats de conductivité électrique des trois stations de la zone d'étude.

| Conductivité électrique en ds/m | | | |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Echantillons | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| E1 | 3,95 | 3,23 | 4,54 |
| E2 | 4,21 | 3,55 | 7,04 |
| E3 | 3,55 | 3,48 | 6,74 |
| E4 | 3,93 | 5,1 | 5,85 |

| | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| E5 | 3,63 | 4,53 | 4,94 |
| E6 | 3,06 | 4,47 | 2,14 |
| E7 | 2,82 | 2,54 | 6,82 |
| E8 | 5,46 | 2,76 | 4,67 |
| E9 | 3,02 | 2,44 | 3,78 |
| E10 | 2,46 | 2,57 | 3,82 |
| E11 | 4,94 | 3,7 | 8,72 |
| E12 | 4,91 | 5,1 | 11,52 |
| E13 | 2,9 | 3,5 | 10,01 |
| E14 | 4,03 | 7,81 | 8,66 |
| E15 | 4,56 | 4,97 | 3,64 |
| E16 | 4,35 | 10,09 | 12,06 |
| E17 | 3,36 | 8,16 | 8,93 |
| E18 | 3,29 | 6,35 | 7,9 |
| E19 | 4,6 | 2,32 | 6,63 |
| E20 | 3,42 | 8,83 | 9,82 |
| La moyenne (Σ) | 3,82 | 4,77 | 6,91 |

4 - Matière organique

La matière organique (MO) du sol est un paramètre important de la dégradation de la qualité des sols. Elle permet la stabilité du sol, l'augmentation de la capacité de rétention en eau, le substrat pour les microorganismes du sol et la fixation des éléments. La matière organique est influencée généralement par plusieurs facteurs : climatiques, topographiques, la texture du sol, la végétation influençant le microclimat le drainage et les pratiques culturales (Drouet ,2010).

Les résultats de l'analyse de la matière organique montrent que 72% des sols étudiés sont très pauvre à pauvre en matière organique est cela peut s'expliquer par le manque de la végétation ou par l'érosion du sol. Dans la station 1, les sols sont pauvres en matière organique tandis que la station 2 sont moyennement pauvre par contre la station 3 est riche en matière organique (Tab.32).

Tableau 34: Résultats de la matière organique des trois stations de la zone d'étude.

| Matière organique en % | | | |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Échantillons | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| E1 | 1,48 | 1,55 | 1,922 |
| E2 | 0,63 | 1,24 | 2,4 |

| | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|
| E3 | 1,89 | 1,42 | 1,76 |
| E4 | 1,48 | 2,6 | 3,22 |
| E5 | 1,24 | 1,25 | 1,54 |
| E6 | 2,6 | 3,72 | 4,61 |
| E7 | 1,55 | 3,72 | 4,65 |
| E8 | 0,74 | 4,96 | 6,15 |
| E9 | 1,97 | 2,48 | 3,07 |
| E10 | 0,74 | 1,61 | 1,99 |
| E11 | 2,41 | 4,98 | 6,06 |
| E12 | 2,36 | 4,47 | 5,55 |
| E13 | 2,65 | 4,01 | 4,94 |
| E14 | 2,41 | 3,5 | 4,34 |
| E15 | 0,62 | 3,21 | 3,98 |
| E16 | 1,24 | 5,53 | 6,68 |
| E17 | 0,56 | 2,6 | 3,22 |
| E18 | 1,24 | 0,54 | 0,68 |
| E19 | 0,63 | 0,54 | 0,56 |
| E20 | 1,05 | 1,22 | 1,52 |
| La moyenne (Σ) | 1,47 | 2,75 | 3,41 |

Ces résultats sont comparables à ceux trouvés dans les sols de la région de Sidi Rahal, Sahel (chaouia côtière) et aussi dans les sols du périmètre irrigué d'Issen plaine de sous-massa qui présentent que la plupart des sols sont pauvres à moyennement pourvus de matière organique (El Oumlouki, 2014 ; Rafik et al., 2015).

5- Calcaire total

Pour le taux des carbonates, il est en moyenne de 16.9 % dans la station 1 avec un minimum de 1.09 % (taux très faible) et un maximum de 33 % (taux élevé). Dans la station 2, le taux des carbonates varie de 5.3 % jusqu'à 23.3 % avec une moyenne de l'ordre de 16.93%. Dans la station 3 la moyenne étant 20.4% avec un minimum 1.09 % et un maximum de 37.5 % (taux élevé). En général les moyennes sont comparables dans les trois stations. On constate que la plupart des échantillons riche en carbonates malgré la présence de quelques échantillons qui ont des taux très faibles (Tab.33).

Tableau 35: Résultats du calcaire total des trois stations de la zone d'étude.

| CaCO3 % | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| Échantillons | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| E1 | 2,2 | 21 | 10,8 |
| E2 | 22,2 | 10,4 | 22,4 |
| E3 | 22,1 | 22,5 | 24,7 |
| E4 | 32,5 | 20,4 | 18,4 |
| E5 | 1,1 | 17,3 | 20,4 |
| E6 | 1,2 | 23,3 | 15,3 |
| E7 | 2,1 | 18,2 | 37,5 |
| E8 | 22,0 | 8,6 | 19,8 |
| E9 | 21,5 | 21,5 | 22,7 |
| E10 | 30,0 | 9,8 | 17,5 |
| E11 | 33,0 | 15,2 | 3,2 |
| E12 | 21 | 20,4 | 22,2 |
| E13 | 17,5 | 16,4 | 22,1 |
| E14 | 2,1 | 20,7 | 32,5 |
| E15 | 17,5 | 19,8 | 1,1 |
| E16 | 2,2 | 13,4 | 2,1 |
| E17 | 24 | 15 | 2,2 |
| E18 | 29,2 | 20,5 | 22,0 |
| E19 | 10,4 | 19 | 16,5 |
| E20 | 23,5 | 5,3 | 19,7 |
| La moyenne (Σ) | 16,9 | 16,935 | 20,4 |

6 - Phosphore assimilable

Le phosphore du sol est la fraction du phosphate total la plus faible et encore la plus importante pour l'alimentation de la plante. Il se trouve sous deux formes H_2PO_4 et HPO_4 qui sont dominantes dans la solution du sol. Le phosphore est un élément important à la croissance et développement des végétaux. Il joue un rôle essentiel dans la mise en place du système racinaire, la photosynthèse et la reproduction du végétal. Leur variation dépend aux propriétés physicochimiques du sol (Elalaoui, 2007). Les résultats des échantillons du sol analysés montrant que les sols de la station 1 sont faibles du phosphore et ont une moyenne de 15.54%. Les sols des

station 2 et 3 ont des moyennes (14.78 et 12.81), ils sont caractérisés par très faible concentration en phosphore assimilable (Tab.34).

Tableau 36: Résultats du phosphore assimilable dans les trois stations de la région d'étude.

| Phosphore assimilable en % | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| Échantillons | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| E1 | 30,3 | 12 | 32,8 |
| E2 | 27,2 | 12 | 3 |
| E3 | 16,9 | 11,3 | 14,5 |
| E4 | 16,1 | 6,3 | 5,3 |
| E5 | 32,8 | 24,9 | 11,5 |
| E6 | 3 | 18,8 | 9,2 |
| E7 | 14,5 | 14,5 | 4,2 |
| E8 | 5,3 | 17,5 | 2,8 |
| E9 | 11,5 | 15,7 | 16,1 |
| E10 | 9,2 | 11,9 | 10,3 |
| E11 | 4,2 | 9,3 | 8,2 |
| E12 | 2,8 | 5,9 | 41,4 |
| E13 | 16,1 | 7,3 | 16,3 |
| E14 | 10,3 | 30,2 | 17,1 |
| E15 | 8,3 | 5,2 | 5,6 |
| E16 | 8,2 | 8,2 | 29,3 |
| E17 | 41,4 | 9 | 12 |
| E18 | 16,3 | 30,3 | 12 |
| E19 | 17,1 | 27,2 | 11,3 |
| E20 | 5,6 | 16,9 | 6,3 |
| La moyenne (Σ) | 15,54 | 14,78 | 12,81 |

7- Potassium assimilable

Le potassium est une fraction plus faible et variable dans le sol. Il est directement absorbé par la plante. Il correspond à la quantité des ions k^+ dans le sol. Le potassium est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des carbohydrates. Leur variation dépend aux propriétés physicochimiques du sol (Elalaoui,2007). Les résultats des échantillons du sol analysés montrant que 89.22 % sont caractérisés par une concentration élevée à très élevée en potassium échangeable (Tab.35). L'excès du potassium peut transformer en sel

et polluer ainsi les nappes phréatiques par percolation et infiltration pouvant aussi provoquer des carences en magnésium, pour les cultures (Koné el al., 2009).

Tableau 37: Résultats du potassium échangeable des trois stations de la zone d'étude.

| Potassium échangeable en ppm | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|
| Échantillons | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| E1 | 160 | 270 | 150 |
| E2 | 270 | 310 | 200 |
| E3 | 200 | 300 | 190 |
| E4 | 250 | 430 | 230 |
| E5 | 260 | 210 | 240 |
| E6 | 180 | 350 | 290 |
| E7 | 240 | 350 | 260 |
| E8 | 230 | 230 | 330 |
| E9 | 230 | 270 | 360 |
| E10 | 360 | 290 | 320 |
| E11 | 260 | 260 | 260 |
| E12 | 420 | 240 | 230 |
| E13 | 220 | 290 | 210 |
| E14 | 620 | 390 | 150 |
| E15 | 540 | 310 | 290 |
| E16 | 490 | 550 | 790 |
| E17 | 210 | 380 | 390 |
| E18 | 270 | 150 | 420 |
| E19 | 350 | 180 | 270 |
| E20 | 240 | 170 | 290 |
| La moyenne (Σ) | 300 | 296,5 | 293,5 |

8-La stabilité structurale :

L'analyse de la stabilité structurale montre que les échantillons présentent un taux d'agrégats instable à moyennement stable ceci peut être expliquer par le faible taux de la matière organique de ces sols (Tab.36).

Tableau 38: L'indice de stabilité des trois sites de la région d'étude.

| Station | Eau | | Ethanol | | Rehumectation | | Moyenne | | Classement | | |
|---------|------|------------|---------|------------|---------------|------------|---------|------------|--------------------|----------------|--|
| | DMP | Ecart type | DMP | Ecart type | DMP | Ecart type | DMP | Ecart type | Stabilité | Battance | Ruissellement et Erosion |
| 1 | 0,29 | 0,03 | 0,50 | 0,04 | 0,87 | 0,15 | 0,56 | 0,07 | Instable | Très fréquente | Risque fréquent |
| 2 | 0,46 | 0,09 | 0,78 | 0,11 | 2,08 | 0,10 | 1,1 | 0,01 | Moyennement Stable | Fréquente | Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques |
| 3 | 0,37 | 0,09 | 0,56 | 0,11 | 2,07 | 0,10 | 1 | 0,01 | Moyennement Stable | Fréquente | Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques |

IV-Évolution des paramètres physicochimiques des sols dans les trois stations du bassin l'Oued Joumouaa.

Tableau 39: Statistiques générales des différentes analyses physicochimiques de la station 1

| | pH | pH(kcl) | CE ds/m | MO% | CaCO3 % | P2O5 % | K2O ppm | Argile % | Limon % | Sable % |
|------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| Moyenne | 8,0785 | 7,107 | 3,8225 | 1,73011 | 16,8604 | 14,855 | 300 | 50,5876 | 50,5876 | 27,2348 |
| Ecart type | 0,412875 | 0,177915 | 0,810106 | 0,885625 | 11,3481 | 10,6616 | 125,572 | 13,8968 | 13,8968 | 16,0033 |
| Minimum | 7,62 | 6,73 | 2,46 | 0,62 | 1,09266 | 2,8 | 160 | 31 | 31 | 8,5 |
| Maximum | 9,62 | 7,36 | 5,46 | 3,658 | 33 | 41,4 | 620 | 67,9647 | 67,9647 | 50,5 |

Tableau 40 : Statistiques générales des différentes analyses physicochimiques de la station 2

| | pH | pH (Kcl) | CE ends/m | MO en % | CaCo3 en % | P2O5 en % | K2O en ppm | Argile en % | Limon en % | Sables -en % |
|------------|----------|----------|-----------|---------|------------|-----------|------------|-------------|------------|--------------|
| Moyenne | 7,8725 | 7,1715 | 4,775 | 2,7575 | 16,935 | 14,72 | 296,5 | 50,235 | 21,49 | 27,775 |
| Ecart type | 0,424957 | 0,341163 | 2,31684 | 1,55685 | 5,08841 | 7,96476 | 95,3815 | 12,7325 | 4,92191 | 13,2879 |

| | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|
| Minimum | 6,83 | 6,54 | 2,32 | 0,54 | 5,3 | 5,2 | 150 | 32,6 | 12,7 | 10,5 |
| Maximum | 8,38 | 7,63 | 10,09 | 5,53 | 23,3 | 30,3 | 550 | 65,5 | 32,5 | 50 |

Tableau 41: Statistiques générales des différentes analyses physicochimiques de la station 3

| | <i>Ph</i> | <i>Ph(kcl)</i> | <i>CE ds/m</i> | <i>MO%</i> | <i>CaCO3 %</i> | <i>P2O5 %</i> | <i>K2O ppm</i> | <i>Argile %</i> | <i>Limon %</i> | <i>Sable %</i> |
|------------|-----------|----------------|----------------|------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| Moyenne | 7,848 | 7,287 | 6,9115 | 3,9474 | 20,3657 | 13,46 | 293,5 | 46,2862 | 25,2949 | 26,4985 |
| Ecart type | 0,312891 | 0,297589 | 2,77027 | 2,48038 | 18,8641 | 10,2391 | 137,583 | 13,8208 | 9,35148 | 13,5866 |
| Minimum | 6,8 | 6,71 | 2,14 | 0,56 | 1,09266 | 2,8 | 150 | 23 | 13 | 8,5 |
| Maximum | 8,18 | 7,85 | 12,06 | 10,7384 | 91,8 | 41,4 | 790 | 67,9647 | 58,3 | 50,5 |

Les moyennes de pH et pH (kcl) restent similaires dans les trois stations entre 7.10 et 8.07. L'évolution spatiale des moyennes de la conductivité électrique suit un gradient croissant de S1 (3.82Ds/m) vers S3 (6.91ds/m). Les résultats des sols analysés montrent que les sols varient de non salin à peu salin. Les moyennes de la matière organique suivent un gradient croissant de la S1 (1.73 %) vers la S3 (3.94 %). Les sols analysés sont pauvres en matière organique. Cela peut être expliqué par l'influence du climat sur la zone d'étude. Les moyennes des taux du calcaire total connaît un gradient comparable entre s1 (16.86 %) et S2 (16.93 %) puis croissant entre s2 et s3 (20.36). L'évolution spatiale des moyennes de taux de phosphore assimilable a révélé un gradient décroissant de S1 (14.85 %) vers S3 (13.46 %). Généralement les sols analysés sont faibles en phosphore assimilable. Concernant les moyennes de potassium échangeable suivent un gradient décroissant depuis S1(300 ppm) vers S3 (293.5ppm). Ces changements sont dû à la nature des sols étudiés. Les résultats sont reportés dans les tableaux 37,38,39 et figure 62.

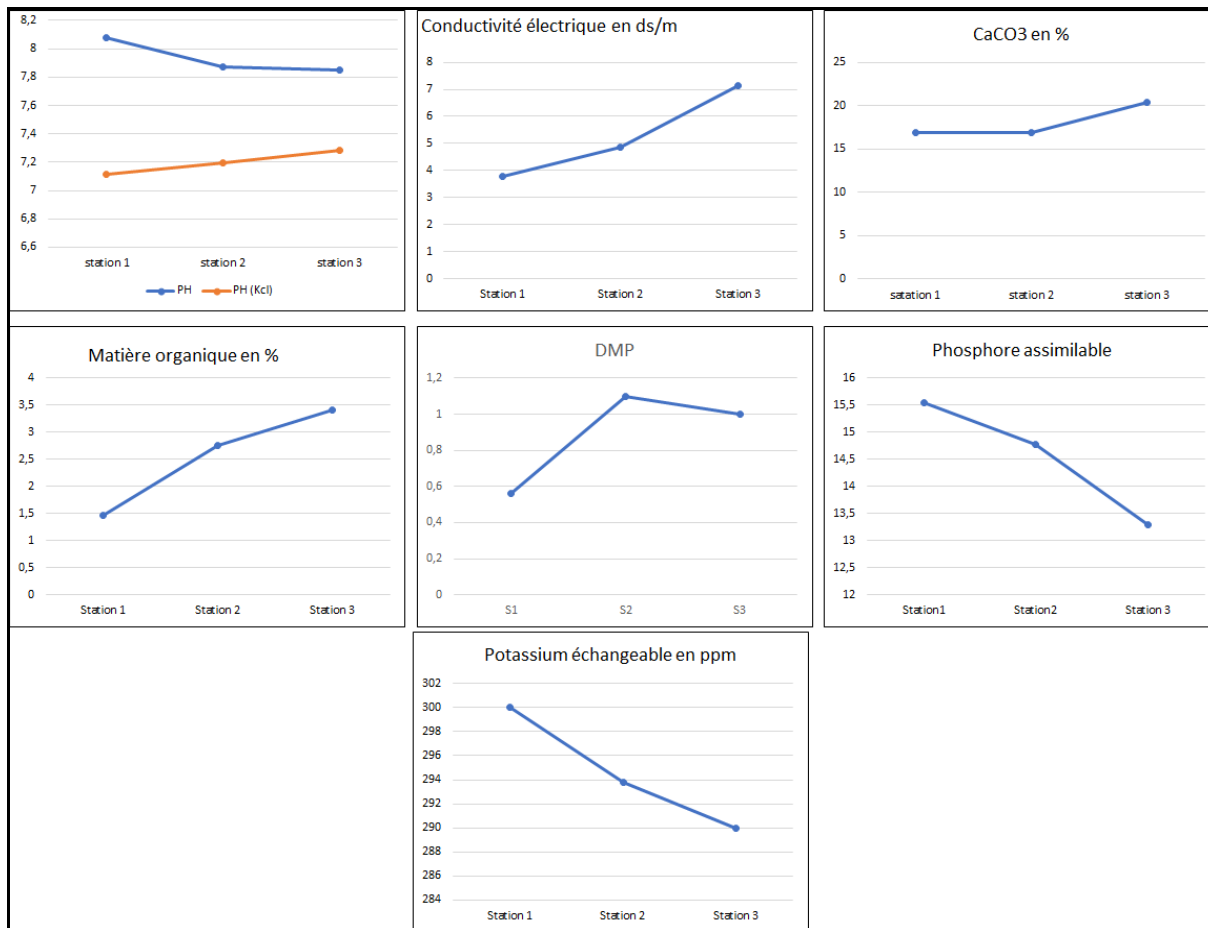


Figure 69: Courbes des évolutions des paramètres physico-chimiques dans les trois stations de la zone d'étude.

IV-Discussions

1- Le pH

Le pH du sol est une représentation synthétique des conditions physico-chimiques qui contrôlent la structure du sol, l'activité microbienne et la disponibilité des nutriments dans une certaine mesure. (Genot et al, 2007). Le pH joue un rôle crucial dans le mécanisme de libération des nutriments (Farah et al, 1979), c'est un indice du niveau général du sol en éléments chimiques assimilables.

En 1988, Baize a pu diviser les sols en trois groupes sur la base des valeurs de pH de l'eau : les sols acides dont le pH est compris entre 0 et 6, les sols neutres dont le pH est égal à 7, et les sols basiques ou alcalins dont le pH est supérieur à 8.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de variation significative de cette composante entre les sols des trois stations de notre région de recherche.

En réalité, le pH du sol de ces trois endroits est généralement comparable (fig. 2), avec des valeurs de 8,07SI, 7,87 SII et 7,84 SIII, respectivement. Cependant, les résultats d'une recherche effectuée par Naaman (2001) et Droussi (2005) ont révélé que le pH des différents secteurs du périmètre irrigué de Doukkala (pH moyen = 7,74) est moins basique qu'on ne le pensait.

L'alcalinité de ce sol peut être attribuée à divers facteurs, notamment à la présence de cations (tels que Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans le sol, ce qui est appelé " alcalinisation ", ou à la présence de sodium (Na^+), ce qui est appelé " sodication marine " en raison de la proximité du sol avec la mer.

Le pH du sol est directement lié aux cations et anions échangeables. Ce paramètre est positivement corrélé dans la station 3 avec tous les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique, matière organique, teneur en calcaire, phosphore assimilable et potassium échangeable). Alors que dans les stations 1 et 2, la corrélation est parfois négative. Il faut noter que lorsque la corrélation est positive elle permet de dire qu'il n'y a pas d'érosion et lorsque la corrélation entre les paramètres est négative elle permet de dire qu'il y a de l'érosion dans ces stations.

4.2 Carbonate de calcium

L'évolution du carbonate de calcium dans les sols étudiés indique une réduction au début, suivie d'une petite stabilisation (Figure 2). Cette évolution n'implique pas un changement majeur, suivi d'une modeste stabilisation (Figure 2). Il n'y a pas de distinction discernable entre les trois stations dans cette progression. Cependant, ces résultats contredisent les conclusions de Droussi (2005) dans le périmètre irrigué de la zone irriguée de Doukkala, où il a constaté que les sols de cette région ont de faibles niveaux de carbonate de calcium.

Les valeurs enregistrées sur ces sites reflètent, en effet, la richesse du sol en coquillages. Ces constatations nous permettent de désigner nos sols comme étant extrêmement calcaires en général. Nos sols sont classés comme fortement calcaires, selon les normes internationales pour l'interprétation du taux de calcaire dans les sols (NF ISO 10693), (Baize, 1988).

4.3 Matière organique

L'analyse des données (figure 2) montre que les sols des trois stations du bassin versant de l'oued Joumouaa présentent en moyenne les plus faibles valeurs de matière organique. En fait, nous pensons que les faibles valeurs enregistrées dans ces trois stations sont le résultat d'un vent fort.

En effet, nous pensons que les faibles valeurs obtenues dans ces trois stations sont liées à un manque d'application d'engrais verts (fumure organique). En effet, nos résultats concordent avec ceux de Badraoui et al. (2000) et Naaman et al. (2001), qui ont rapporté que la teneur en matière organique des sols des Doukkala est généralement inférieure à 1,5 % et ne dépasse pas 2 %. Les résultats montrent une bonne relation entre la stabilité et la teneur en matière organique dans les trois stations (fig.3).

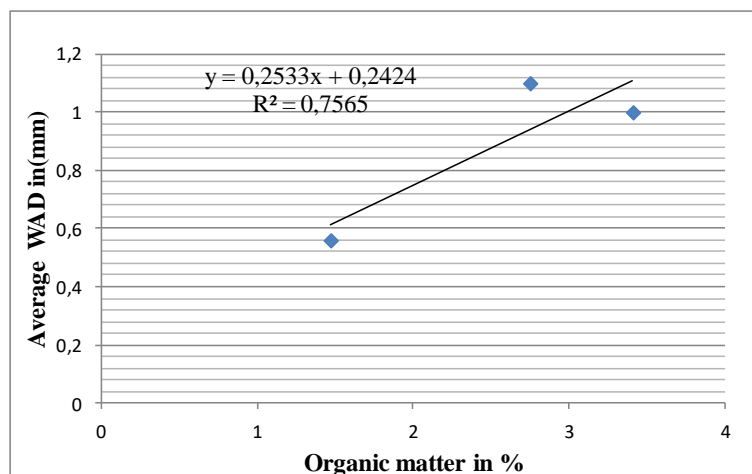


Figure 70 : Effet de la matière organique sur la stabilité structurale.

La bonne corrélation obtenue entre la matière organique et le diamètre moyen pondéré (fig. 3) fait de cette méthode une bonne estimation de la stabilité structurale.

V-Matrice de corrélation (Pearson (n)) des trois stations

Station 1

| | pH | CE ds/m | MO% | CaCO ₃ % | P ₂ O ₅ % | K ₂ O ppm |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------------------|---------------------------------|----------------------|
| pH | 1 | | | | | |
| CE ds/m | 0,0935 | 1 | | | | |
| MO% | 0,1651 | -0,2218 | 1 | | | |
| CaCO ₃ % | -0,2221 | 0,0634 | -0,0935 | 1 | | |
| P ₂ O ₅ % | -0,1117 | -0,2194 | -0,1293 | -0,1264 | 1 | |
| K ₂ O ppm | 0,4895 | 0,3287 | -0,2177 | -0,1919 | -0,3416 | 1 |

Station 2

| | pH | CE ds/m | MO% | CaCO ₃ % | P ₂ O ₅ % | K ₂ O ppm |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------------------|---------------------------------|----------------------|
| pH | 1 | | | | | |
| CE ds/m | -0,1556 | 1 | | | | |
| MO% | 0,6452 | 0,1591 | 1 | | | |
| CaCO ₃ % | -0,0632 | -0,1949 | -0,0413 | 1 | | |
| P ₂ O ₅ % | -0,0818 | 0,0302 | -0,4297 | 0,1211 | 1 | |
| K ₂ O ppm | 0,2081 | 0,3922 | 0,512 | 0,1145 | -0,4189 | 1 |

Station 3

| | pH | CE ds/m | MO% | CaCO ₃ % | P ₂ O ₅ % | K ₂ O ppm |
|---------------------------------|--------|---------|--------|---------------------|---------------------------------|----------------------|
| pH | 1 | | | | | |
| CE ds/m | 0,2859 | 1 | | | | |
| MO% | 0,1314 | 0,2425 | 1 | | | |
| CaCO ₃ % | 0,0803 | -0,0185 | 0,0499 | 1 | | |
| P ₂ O ₅ % | 0,1742 | 0,4245 | 0,3376 | -0,1947 | 1 | |
| K ₂ O ppm | 0,3251 | 0,3021 | -0,003 | -0,2704 | 0,1506 | 1 |

Conclusion

En raison de l'implication des processus d'altération dans la production des croûtes de sol et le début de l'érosion, il est juste de croire que la mesure de la stabilité structurale à l'aide d'une approche appropriée peut offrir une estimation décente de la susceptibilité du sol au recouvrement et à l'érosion. La technique suggérée doit tenir compte des nombreux processus d'altération ainsi que des divers aspects physiques et physico-chimiques de l'altération et de la sensibilité à l'érosion qui peuvent en découler. Les résultats démontrent l'utilité de l'approche et son applicabilité dans la prédiction du comportement des sols en conditions humides.

La qualité des sols du bassin versant de l'Oued Joumouaa, appréciée à travers les paramètres physicochimiques permet de conclure : La texture est de type limono-argilo-sableux ; Le pH reste identique dans les différentes stations et varie de 7.62 à 9.62 dans la station 1, de 6.83 à 8.38 dans la station 2 et 6.8 à 8.18 dans la station 3 ; La conductivité électrique est presque semblable entre S1 (3.8) et S2(4.7) puis augmente dans S3 (6.9).

Le taux de la matière organique augmente de la station S1 (1.73%) vers la station 3(3.94%) ; Le carbonate de calcium accroit de S1(16.86%) vers la S3 (20.36%) ; Le phosphore assimilable diminue de la S1 de (14.85%) vers la station 3 (13.46%) ; Le potassium échangeable décroît de la S1 (300ppm) vers la S3(293.5ppm) ; Les mesures de la stabilité structurale (DMP), déterminée par la méthode de Bissonais, ont montré que dans la station 1 les sols sont instables et le risque d'érosion et ruissellement est fréquent. Tandis que dans la station 2 et 3 les sols sont moyennement stables et le risque d'érosion est variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques.

Conclusions Générales

Conclusions Générales

Le bassin versant de l'Oued Joumouaa fait partie du grand bassin hydrologique de Sebou. IL est situé dans le préif occidental. Il couvre une superficie d'environ 60 Km² et un périmètre de 59Km. L'ensemble de facteurs géologiques, géomorphologiques, hydrologiques et climatiques, conditionnent le processus morphogénétique du paysage en termes (érosion hydrique, crues, glissements de terrains, sécheresse, feux de forêts, ...etc.

Du point de vue géomorphologique, le bassin versant de l'Oued Joumouaa correspond à une dépression allongée selon une direction N-S au sein préif occidental, délimité par deux domaines structuraux distincts le Rif au nord et le Moyen-Atlas au sud. L'analyse géomorphologique a permis de mettre en évidence des altitudes assez élevées qui dépassent 800 m notamment dans sa partie Nord, et des altitudes faibles dans sa partie Sud (Ain dorij).

Les facteurs climatiques (précipitations & températures) du bassin versant de l'Oued Joumouaa sont corrélés entre eux et contrôlent la nature, crues torrentielles, des glissements de terrain et de l'érosion hydrique dans tout le bassin.

Les différents paramètres morphométriques (linéaires, de forme et de relief) ont permis d'hierarchiser les sous-bassins versants et d'explorer la relation entre la morphométrie du drainage et les propriétés des formes de relief, des sols et des terres érodées. Sur la base des ordres de réseaux de drainage (méthode de Strahler) extraits à partir du modèle numérique d'élévation, le bassin de l'Oued Joumouaa a été classé comme un bassin du cinquième ordre. En effet, les processus d'érosion hydrique sont étroitement liés aux paramètres linéaires et de forme. Le calcul du facteur composé (Cp), à partir des résultats d'indices linéaires et de forme, a permis d'établir un classement de priorisation des zones à risque.

Ces résultats montrent que 16.6% des sous-bassins versants relèvent une faible priorité ; tandis que 58.33% des sous-bassins versants sont vulnérables à un risque d'érosion hydrique élevé. Ceci traduit une haute priorité en termes des mesures d'urgence appropriées à la protection et la conservation des sols et le contrôle du risque d'érosion hydrique dans ces sous-bassins versants par des pratiques antiérosives. Toutefois, 25% des sous-bassins versants ont une moyenne de priorité.

La méthode PAP/CAR a permis d'évaluer et de cartographier l'érosion hydrique en se basant sur les facteurs naturels. L'importance de cette méthode se vérifie dans la réalisation d'un rapport général du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Joumouaa à partir de trois phases :

D'abord La phase descriptive (lithologie, pente, couvert végétal et occupation des sols) qui se caractérise par la présence de formes d'érosion variées (laminaire et linéaire avec la prédominance d'érosion en nappe...);

La phase prédictive a donné des indications sur l'état actuel de la dégradation des sols en s'appuyant sur les degrés de gravité des différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique (60% d'érodibilité modérée, 36% d'érodibilité forte à extrême et seulement 3% d'érodibilité faible);

La phase d'intégration ou de superposition des deux précédentes (prédictive et descriptive) montre que les formes en nappe se trouvent dans les zones où le degré d'érosion est très élevé. Les zones protégées par un couvert végétal stable correspondent aux zones où le degré d'érosion est faible.

La qualité des sols du bassin versant de l'Oued Joumouaa, appréciée à travers les paramètres physicochimiques permet de conclure : La texture est de type limono-argilo-sableux ; Le pH reste identique dans les différentes stations et varie de 7.62 à 9.62 dans la station 1, de 6.83 à 8.38 dans la station 2 et 6.8 à 8.18 dans la station 3 ; La conductivité électrique est presque semblable entre S1 (3.8) et S2(4.7) puis augmente dans S3 (6.9).

La cartographie et la quantification du taux de perte des sols en utilisant l'équation universelle RUSLE (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeiere et Smith, intégrée dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) montre que le taux de l'érosion potentielle à l'échelle du bassin versant de l'Oued Joumouaa est évaluée à 26t/ha/an. La carte des pertes de sol montre que 86 % de la superficie du bassin présente des pertes relatives (classe 0,21 à 10 t/ha/an), 13% des pertes importantes (classe 10 à 50 t/ha/an), et le reste du bassin présente des pertes importantes (supérieures à 50 t/ha/an) qui occupent 1% de la superficie du bassin.

Le taux de la matière organique augmente de la station S1 (1.73%) vers la station 3(3.94%) ; Le carbonate de calcium accroit de S1(16.86%) vers la S3 (20.36%) ; Le phosphore assimilable diminue de la S1 de (14.85%) vers la station 3 (13.46%) ; Le potassium échangeable décroît de la S1 (300ppm) vers la S3(293.5ppm) ; Les mesures de la stabilité structurale (DMP), déterminée par la méthode de Bissonais, ont montré que dans la station 1 les sols sont instables et le risque d'érosion et ruissellement est fréquent. Tandis que dans la station 2 et 3 les sols sont moyennement stables et le risque d'érosion est variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont :

- ✓ Mener des études détaillées sur la dynamique érosive du bassin versant de l'Oued Joumouaa afin d'améliorer les résultats obtenus.
- ✓ Faire des études comparatives des résultats obtenus et les autres résultats des autres bassins versants afin de voir le degré de la vulnérabilité du bassin versant par rapport aux autres régions.
- ✓ Faire des analyses physico-chimiques et estimation de la stabilité structurale dans des différents points du bassin versant de l'Oued Joumouaa.
- ✓ Généraliser l'outil cartographique sur tout le piémont préifain dans un objectif d'aménagement et d'utilisation du sol.

Références Bibliographiques

- Abiven S. (2004) Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol''. Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes. Directeur de la thèse : Roger-Estrade J.
- Aboulabbas et al., 2005 O. Aboulabbas, F. Bencheikroun, A. Merzou Application des directives CAR/PAP pour la formulation d'un programme de gestion de contrôle de l'érosion et de la désertification, cas du bassin versant de Beni Boufrah.
- Afnor. (2004) Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol (NF X 31 107). In : Evaluation de la qualité des sols. Volume 1 : Méthodes d'analyse chimique. Afnor (Ed.). Paris.
- Al Karkouri, J. (2003). Dégradation du milieu naturel dans le bassin de Beni Boufrah (Rif Central-Maroc) : analyse des facteurs et des processus, essai de quantification et modélisation spatiale. Thèse doctorat d'État, université Mohamed V, Rabat, faculté des lettres, Rabat.
- Akram, Mohd Yousuf, rizwan A , 2009 Prioritization of Subwatersheds based on Morphometric and Land Use Analysis using Remote Sensing and GIS Techniques. J. Indian Soc. Remote Sensing 37: 261-274 Dundee, Dundee, Scotland.
- Andrieux, J. (1971). La structure du Rif central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. Notes et Mém. Ser. Géol. Maroc, Rabat, 235, 155p.
- Andrieux, J., et Mattauer, M. (1973). Précision sur un modèle explicatif de l'arc de Gibraltar. Bull. Soc. Géol. France, (7), t. XV, pp. 115-118.
- Aoyama M., Angers D.A., N'Dayegamiye A. (1999) Particular and mineral associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. Can. J. Soil Sci., 295-302.
- Baize D., Guide des analyses en pédologie: choix, expression, présentation, interprétation 2 e éd, INRA-paris 255 (2000).

- BenRhouma A, HermassiT, Bouajilak.(2018).water erosion modeling using PAP/CAR qualitative method :case of de sbaihiacatchement, Zaghouan.Journal of new sciences.agriculture and Biotechnology51 :3225-3236.
- Ben Yaich, A. (1991). Evolution tectono-sédimentaire du Rif externe Centro-Occidental (région de M'sila et Ouazzane, Maroc) : La marge africaine du Jurassique au Crétacé, les bassins néogènes d'avant-fosse. Thèse Doct. d'Etat, Univ. de Pau et des pays de l'Adour, 308p.
- Benzougagh B, Sarita G-M, Dridri A, Boudad L, Sadkaoui D, Mimich K, Khedher K-M. (2020). Mapping of soil sensitivity to water erosion by RUSLE model: case of the Inaouene watershed (Northeast Morocco). Arabian Journal of Geosciences (2020) 13:1153. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06079-y>
- Benzougagh, 2019 : « Élaboration des cartes décisionnelles par des méthodes multidisciplinaires pour la prévention contre les risques d'érosion et d'inondations. Cas du bassin versant Inaouène (Maroc). Thèse Doctorale de la Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc, 2019, 314p.
- Brahim, Benzougagh, Boudad Larbi, Dridri Abdallah, et SdkaouiDriss. « Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphométrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc) ». European Scientific Journal, ESJ 12, no 6 (29 février 2016): 266. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n6p266>.
- Bera, K., & Bandyopadhyay, J. (2013). Prioritization of watershed using morphometric analysis through geoinformatics technology: A case study of Dungra sub watershed, West Bengal, India. International Journal of Advances in Remote Sensing and GIS, 2(1), 1–8
- Bharadwaj, A., Joshi, P.K., Snehmani., Singh, M.K., Sam, L and Gupta, R.D. (2014): Mapping debris-covered glaciers and identifying factors affecting the accuracy. Elsevier Cold Regions Science and Technology Volumes 106–107, October–November 2014, pp 161-17
- Biswas, S., Sudhakar, S., & Desai, V. R. (1999). Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 27(3), 155–166.
- Boukrim, siham. « Étude d'impact des changements climatiques sur les ressources hydriques du

- bassin versant de l'ouergha (rif – maroc) impact of climate change on water resources of the ouerghawatershed (rif, morocco) », 2011, 14. Inaouene (Nord-Est Du Maroc) ». European Scientific Journal, ESJ 12, n° 6 (29 février 2016): 266.
- Boukrim, Lahrach Abderrahim. Cartographie De L'érosion Qualitative Des Sols Du Bassin Versant De L'aoudour (Rif-Maroc) ». 2016. European Scientific Journal 12 (11). <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n11p295>.
- Bonin, J., Olivet J.L., et Auzende, J.M. (1975). Structure en nappe à l'Ouest de Gibraltar. C. R. Acad. Sc. Paris, 280
- Bouillin et al ., (1970). Définition d'un flysh massylien et d'un flysch mauritanien au sein des flysch allochtones de l'Algérie. C. R Acad. Sci., Paris, 270-D, pp. 2249- 2252.
- Boughalem, M. (2013). Impact Des systemes de gestion sur la vulnérabilité des sols à l'érosion : cas du bassin versant de l'Isser-Tlemcen (Algerie). Thèse de doctorat. Université, Abou bekr Belkaid Tlemcen, 215p.
- Bruderer, W., et Levy, G. (1954). Considération sur la « Nappe pré-rifaine » d'après les travaux de la société chérifienne des Pétroles. C. R. 19ème Cong. Géol. Int. Alger, 1952, publ. 1954. Fasc. 21, Assoc. Serv. Géol. Afri., pp. 277- 294.
- Chakraborty, Rabin, Subodh Chandra Pal, Indrajit Chowdhuri, Sadhan Malik, et Biswajit Das. « Assessing the Importance of Static and Dynamic Causative Factors on Erosion Potentiality Using SWAT, EBF with Uncertainty and Plausibility, Logistic Regression and Novel Ensemble Model in a Sub-Tropical Environment ». Journal of the Indian Society of Remote Sensing 48, no 5 (mai 2020): 765-89. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01110-x>.
- Choubert, G., et Marcais. J. (1952). Aperçu structural, in : Géologie du Maroc. Notes et M. Serv. Géol. Maroc, 100, et 19 ème Congr. Géol. Intern., Alger, Monogr. Région., 3è sér. : Maroc, 6, p. 9-73.
- Chalouan, A. (1983). Mise en évidence d'une phase tectonique antéviséenne dans la nappe paléozoïque supérieure du Rif interne (Maroc). I.G.C.P. 5, Newsletters, 5 : 38-40
- Chalouan, A. (1986). Les nappes Ghomarides (Rif Septentrional, Maroc), un terrain varisque

dans la Chaîne Alpine. Thèse Doctoral, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 317 p

Chopra R, Dhiman RD, Sharma PK (2005) Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurudaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques. *J Indian Soc Remote Sens* 33(4):531–539

Chorley, RJ., Schumm, SA and Sugden, DE. (1984). *Geomorphology*. Methuen, London, p 318

Chamley H. (1966) *Guide des techniques du laboratoire de Géologie Marine de Luminy*’, 198 p.

Chenu C., Abiven S., Amblès A., Annabi M., Barray S., Bertrand M., Bureau F., Cosentino D., Darboux F., Duval O., Fourrié L., Francou C., Houot S., Jolivet C., Laval K., Le Bissonnais Y., Lemée L., Menasseri S., Pétraud J.-P., Verbeque B. (2011) Mise au point d’outils de prévision de l’évolution de la stabilité de la structure de sols sous l’effet de la gestion organique des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 18 (3), pp. 161-174.

Cirac, P. (1987). Le bassin sud- rifain occidental au Néogène supérieur. Evolution de la dynamique sédimentaire et de la Paléogéographie au cours d’une phase de comblement. Thèse de Doctorat d’Etat, n° 837. Univ Bordeaux I. 285 p.

Das, A., Mondal, M., Das, B., & Ghosh, A. R. (2012). Analysis of drainage morphometry and watershed prioritization in Bandu Watershed, Purulia, West Bengal through Remote Sensing and GIS technology—A case study. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(4), 995–1013.

Dridri A., Fadan A., (2001). Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et d’Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc). *Bulletin de l’Institut scientifique Rabat, section Science de la Terre*, 2001, n° 23, 67-77.

Dridri, A., Fedan, B., (2001). Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et d’Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc). *Bulletin de l’Institut scientifique Rabat, section Science de la Terre*, 2001, n° 23, 67-77.

Durand- Delga, M., Hottinger, L., Marçais, J., Mattauer, M., Lilliard, Y., and Suter, G. (1960-1962). Données actuelles sur la structure du Rif. *Mém. h. Ser. Soc. Géol., Fr. (livre mémoire P. FALLOT)*, T. 1, pp. 399-422.

- Durand-Delga, M. (1963). Essai sur les structures des domaines émergés autour de la Méditerranée occidentale. Géol. Rundsch., Bd.5-3-2 ; pp 534-535.
- Durand-Delga, M. (1980). La méditerranée occidentale : Etapes de genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci. In : livre jubilaire Soc. Géol. France. (1830- 1980), Mem. H. Ser. Soc. Géol. France, pp. 203- 226.
- Didon et al ; (1973). Homologie entre les deux rives du détroit de Gibraltar. Bull. Soc. Géol. Fr., Paris, (7), T. XV, n°2, pp. 77-105.
- DIAEA /DRHA /SEEN, Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace Agricole, Service des Expérimentations, des Essais et de la Normalisation -Rabat (2008)
- Dutartre P., Bartoli F., Andreux F., Portal J.M., Ange, A. (1993) Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa. Geoderma, 56, 459-478,1993.
- Delaunoy A., Ferrie Y., Bouche M., Colin .C et Rionde C., Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols (2008)
- DIAEA /DRHA /SEEN, Direction de l'irrigation et de l'aménagement de l'espace Agricole, Service des Expérimentations, des Essais et de la Normalisation -Rabat (2008)
- Dutartre P., Bartoli F., Andreux F., Portal J.M., Ange, A. (1993) Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa. Geoderma, 56, 459-478,1993.
- Dinon E., Gerstmans, L'Influence du pH sur l'assimilation des éléments nutritifs du sol par les plantes et sur la variété des plantes, Université de Liège, (2008).
- Delaunoy A., Ferrie Y., Bouche M., Colin .C et Rionde C., Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols (2008)
- Drouet Th. Pédologie BING-F-302,137 (2010)
- Durand.R, sols calciques mélanique du préif occidental, périmètre de boudaroua -Ouezzane-Maroc. sér. Pédol., vol. VIII, n0 2-1970.
- Elalaoui.A, Fertilisation Minérale des Cultures Les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium, Phosphore), Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTA (2007).

- El oumlouki K., Moussadek R., Zouahri A., DakakZ.,Chati M., El amrani M. (2014) Étude de la qualité physico-chimique des eaux et des sols de la région Souss Massa, (Cas de périmètre Issen), Maroc, *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (S2).
- E., Ait Yacine, Oudija F., Nassiri L., et EssahlaouiA.,. « Modélisation et Cartographie des Risques d'érosion Hydrique du Sol par l'application des SIG, Télédétection et Directives PAP/CAR. Cas du Bassin Versant de Beht, Maroc ». *European Scientific Journal ESJ* 15, no 12 (30 avril 2019). <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n12p259>.
- El Fellah, B. (1983). Contribution à l'étude morphologique du couloir de Taza. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Vol 7, pp 51-63.
- El Garouani, A. (2007). Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi au nord-est du Maroc. Fès: Faculté des Sciences et Techniques, Fès
- El Aroussi O., El Garouani A. &Jabrane R. 2013. Modelling and mapping of soil erosion on the Oued El Malleh catchment using remote sensing and GIS. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7, 02, 302-307.
- El Hatimi, N., Duee, G., et Hervouet, Y. (1991). La dorsale calcaire du Haouz: ancienne marge continentale passive téthysienne (Rif, Maroc).*Bull. Soc.Géol. France*.162, (1), pp 79- 90.
- El Mourabet, M. (1996). Evolution structurale du Prérif occidental et des bassins du Saiss et du Rharb du Trias au Néogène, basée sue les données de subsurface (sismique réflexion et Gravimétrie).Thèse d'études supérieures de troisième cycle. Univ Mohammed V. Rabat. 191p.
- Faleh, Ali. « Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode pap/car et sig en amont du barrage allal el fassi, moyen atlas (maroc) ». *Papeles de Geografía*, 2014, 12
- Faleh, Ali, et Abderrahim Maktite. 2014. « cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode pap/car et sig en amont du barrage allal el fassi, moyen atlas (maroc) ». *Papeles de Geografía*, 12.
- Faniran, A. (1968). The index of drainage intensity—A provisional new drainage factor.

- Australian Journal of Science, 31, 328–330.
- Farah H et al. (1979) Ph effect in the adsorption of heavy metal ions by clays CHem''. Geol, vol 25, 317-326pp.
- Fartas Najia, El Fellah Bouchta, Mastere Mohamed, et Benzougagh Brahim. « Evaluation of Morphometric Parameters and Prioritization of the Oued Joumouaa Watershed », Ecology, Environnement and Conservation, novembre 2021, 17.
- Fartas Najia, El Fellah Bouchta, Mastere Mohamed, Benzougagh Brahim and El brahimi Mohammed « Evaluation of Water Erosion by Mapping and Application of the PAP/RAC Method in the Prerif of Ouazzane », Ecology, Environnement and Conservation, novembre 2021, 12.
- Fartas Najia, El Fellah Bouchta, Mastere Mohamed, Benzougagh Brahim, & El Brahim Mohammed. (2022). Potential Soil Erosion Modeled with RUSLE Approach and Geospatial Techniques (GIS Tools and Remote Sensing) in Oued Joumouaa Watershed (Western Prerif-Morocco). The Iraqi Geological Journal, 47-61.
- Faugères, J. C. (1978). Les Rides sud-rifaines. Evolution sédimentaire et structurale d'un bassin atlantico-mésogéen de la marge africaine. Thèse Doct. d'Etat. Univ. Bordeaux I, 780p
- Feinberg, H. (1986). Les séries tertiaires des zones externes du Rif (Maroc). Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, n°315, 192 p.
- Flinch, J. (1993). Tectonic evolution of the Gibraltar arc. PH. D. Thesis, Rice University, Houston, 381 p.
- Frizon de Lamotte, D. (1985). La structure du Rif oriental (Maroc). Rôle de la tectonique longitudinale et importance des fluides. Thèse Es- Science, Mém. Sc. Terre, Univ. P et M. Curie, Paris, n° 8503, 436p.
- Gravelius H (1914) Grundrifi der gesamtenGewcisserkunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German). Germany: Goschen, Berlin.
- Gajbhiye, S., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2013a). Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: An RS and GIS perspective. Applied Water Science, 4(1), 51–61.
- Gajbhiye, S., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2013b). Prioritization of shakkar river catchment

- through morphometric analysis using remote sensing and gis techniques. *Journal of Emerging Technology in Mechanical Science and Engineering*, 4(2), 129–142.
- Horton, R. E. (1932). Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13, 350–361.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydro-physical approach to quantitative morphology. *Geological Society of American Bulletin*, 56, 275–370.
- Hénin S., Monnier G et Combeau A., 1958 méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 73-92.
- Humbert J., (1990). Intérêt de la densité de drainage pour régionaliser les données hydrologiques en zone montagneuse. *Hydrology in Mountainous Regions. I -Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990)*. IAHS Publ. no. 193, 1990, p 373- 380.
- John Wilson JS, Chandrasekar N, Magesh NS. (2012): Morphometric analysis of major subwatersheds in Aiyar and KaraiPottanar Basin, Central Tamil Nadu, India using remote sensing and GIS techniques. *Bonfring Int J Indus EngManag Sci* 2(1), pp 8–15
- Javed A, Khamday AY, Rais S (2011) Watershed prioritization using morphometric and land use/land cover parameters: a remote sensing and GIS based approach. *J Geo Soc India* 78:63–75
- Kartic B., Jatisankar B., (2013). Prioritization of Watershed using Morphometric Analysis through Geoinformatics technology: A case study of Dungra subwatershed, West Bengal, India. *Int. Journal of Advances in Remote Sensing and GIS*, Vol. 2, No. 1, 2013.
- Kumar V. (2017). « Prioritization of Sub-Watersheds Based on Morphometric Analysis of Drainage Basin- A Case Study of Medkhali River Basin in Lower Siwalik Basin, India ». *International Journal of Multidisciplinary Approach and Studies*, Vol 04, No.4, July - Aug 2017, pp 95-111
- Khallef, Boubaker, YaminaBiskri, Nabil Mouchara, et Khaled Brahamia. « Analysis of Urban Heat Islands Using Landsat 8 OLI / TIR Data: Case of the City of Guelma (Algeria) ».

Asian Journal of Environment & Ecology, 5 juin 2020, 42-51.
<https://doi.org/10.9734/ajee/2020/v12i430167>.

Kone, G. E. J. (2017). A Modeling Approach to Soil Erosion Control and Management using PAP/RAC Model and GIS: A Case Study of Boufekrane Watershed, Morocco (Master's thesis).

Koné M., Bonou L., Bouvet Y., Joly P.;Koulidiaty J., Etude de la pollution des eaux par les intrants agricoles : cas de cinq zones d'agriculture intensive du Burkina Faso 2IE, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement SST - Numéro 17 (2009).

Kornprobst, J. (1974). Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc septentrional). Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 251 : 256p.

Le Bissonnais Y., Cros-Cayot, S., Gascuel-Odoux, C. (2002) Topographicdependence of aggregatestability, overland flow and sediment transport''. Agronomie, 22, 489-501.

Le Bissonnais,. « Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion ». Étude et Gestion des Sols, 1995, 13.

Loveland P., Webb J. (2003) Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil and Tillage Research 70, 1-18

Lakhili, Ferdaouss, Mohammed Benabdelhadi, Abdel-AliChaouni, et NouzhaBouderka. « cartographie de l'érosion qualitative des sols du bassin versant de beht (maroc) », s. d., 12.

Lajat, D., Biju-Duval, B., Gonnard, R., Letouzey, J., et Winnock, E. (1975). Prolongement dans l'Atlantique de la partie externe de l'Arc bético-rifain. Bull. Soc. Géol. France,(7), XVII, N°4

Le Blanc, D. (1977). Stratigraphique et structure du Rif externe oriental au Nord de Taza (Maroc). Bull. Soc. Géol. France, 19, 2, pp 319- 330.

Le Blanc, D. (1979). Etude géologique du Rif externe orientale au Nord de Taza, Maroc.Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc. 281, 166p.

Le Blanc, D. (1990). Tectoniques extensive contemporaine de charriages sur la bordure autochtone du Rif oriental. C. R. Acad. Sci., Paris, T. 311, Série II, pp. 1437- 1441.

- Le Blanc, D., et Olivier, Ph. (1983) Role of strike-slip faults in the betic-rifian orogeny
Tectonophysics, 101: 345-355p.
- Lespinasse, P. (1975). Géologie des zones externes et des flyschs entre Chaouen et Zoumi
(Centre de la chaîne rifaine, Maroc). Thèse. Univ. Paris. VI, 248 p.
- Melton., (1958). Correlations structure of morphometric properties of drainage systems and their
controlling agents. Journal of Geology, 66: 442– 460.
- Melton, M. A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties
and geomorphology. Proj. NR 389-042, Tech.
- Miller V.C., (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics on the
Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Proj. NR 389-9042, Tech Rep 3,
Columbia University, Department of Geology, ONR, New York
- Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., &Jini, K. V. (2013). Geographical
information system-based morphometric analysis of Bharathapuzha river basin, Kerala,
India. Applied
- MASTERE Mohamed « la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la province de
chefchaouen (rif central, maroc) » thèse doctorale, pages 321.
- Mesa, L.M. (2006): Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina).
Environmental Geology September 2006, Volume 50, Issue 8, pp 1235–1242
- Mesrar H., Sadiki A., Faleh A. et al. 2012. Automatisation de la procédure de modélisation des
directives PAP/CAR, par utilisation de l'utilitaire « PAP/CAR Tools » et du SIG, pour
l'évaluation des tendances et des facteurs causaux de l'érosion hydrique, cas du bassin
versant de l'Oued Sahla. International Conference of GIS-Users, 421-424.
- Mesrar H., Sadiki A., Navas A. et al. 2015. Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs
causaux, Cas de l'Oued Sahla, Rif Central, Maroc. ZeitschriftfürGeomorphologie, 59, 4,
495-514.
- MESRARHaytam, SADIKI Abdelhamid, et FALEH Ali. s. d. « modelisation du risque de
l'érosion hydrique par utilisation des directives pap/car et des outils sig, cas du bassin
versant de l'Oued sahla, taounat, maroc. », 9.

- Morgan, R.P.C., 2005. SOIL Erosion and Conservation, 3rd ed. Blackwell Publishing, Oxford.
- MAITAUER (M.), 1962. - Sur les directions de courant mesurées dans le Crétacé inférieur du Rif central et leurs conséquences structurales. C.R. somm. Soc.
- Mc Lead E.O. (1982) pH and lime requirements. In: Page, A.L. et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, second ed., Agronomy, vol. 9 Soil Society of America, Madison, WI, pp: 199–244.
- Mrabet R., Lahlou S., Le Bissonnais Y et Duval O. (2004) Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains Influence des techniques culturales simplifiées”, Bulletin du Réseau Erosion, Vol. 23, n°.2, pp, 405- 415.
- Michard, A. (1976). Eléments de géologie marocaine. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, N. 194, pp. 123- 181.
- Milliard, Y. (1959). Sur la présence d’assises carbonifères dans le massif paléozoïque interne du Rif. C.R.Acad. Sci., Paris, 249, pp ; 1688- 1690.
- Nag, S. K., & Chakraborty, S. (2003). Influence of rock types and structures in the development of drainage network in hard rock area. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 31(1), 25–35.
- Nag, S.K. (1998): Morphometric Analysis Using Remote Sensing Techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia District, West Bengal. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 26, No. 1&2, 1998, pp 69-76
- Nooka Ratnam, K., Srivastava, Y. K., Venkateshwara Rao, V., Amminedu, E., & Murthy, K. S. R. (2005). Check dam positioning by prioritization of micro-watersheds using SYI model and morphometric analysis-remote sensing and GIS perspective. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 33(1), 25–38. <https://doi.org/10.1007/BF02989988>.
- Naimi, Mustapha, MhammedTayaa, et Said Ouzizi. « Cartographie des formes d’érosion dans le bassin- versant de Nakhla (Rif occidental, Maroc) », s. d., 5.
- Ousmana, Habiba, Abdellah EL HMAIDI, Ali ESSAHLAOUI, Hachem BEKRI, et Abdelhadi EL OUALI. s. d. « Modélisation et Cartographie Du Risque de l’érosion Hydrique Par l’application Des SIG et Des Directives PAP/CAR. Cas Du Bassin Versant de l’Oued

- Zgane (Moyen Atlas Tabulaire, Maroc) », 18.
- Olsen S.R. et al., (1954): Estimation of available phosphorous in soils by extraction with sodium bicarbonate. Cir. U.S. Dep. Agr., n° 939, p: 1-19.
- PAP/CAR 1998. Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO, p: XII+72.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement et Plan d'action pour la Méditerranée. Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. Split : Programme d'actions prioritaires, Centre d'activités Régionales, 1998.
- Programme d'Actions Prioritaires du Centre d'Activités Régionales (2005), p. 55Rabat.
- Rachid A. (1997). Les bassins néogènes du sillon sud rifain et du Rif nord oriental (Maroc) : sédimentologie, paléogéographie et évolution dynamique. Thèse Doctorat d'Etat Université Sidi Mohammed Ben Abdallah 331 p
- Robillard, D. (1978). Etude structurale du Moyen-Atlas septentrional : région de Taza, Maroc (Thèse Doctoral).
- Ritter, D. F., Kochel, R. C., & Miller, J. R. (1995). Process geomorphology (3rd ed., p. 539). Dubuque, IA: W.C. Brown Publishers.
- Romshoo, S. A., Bhat, S. A., & Rashid, I. (2012). Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus basin. *Journal of Earth System Science*, 121(3), 659–686.
- Rafik, Fadwa, Najib Saber, FatnaZaakour, Hajar Mohcine, KaoutarMoustarhfer, et ChakibMarrakchi. « caractérisation physico-chimique et estimation de la stabilité structurale des sols agricoles de la région sidi rahal, sahel (chaouia cotiere, maroc) », 2015, 16.
- Roche, M., (1963) : Hydrologie de surface, ORSTOM. Éditions Gauthier-Villars Paris.430p.
- Sadiki, Abdelhamid, HaytamMesrar, Ali Faleh, et Jamal Chaaouan. 2012. « modélisation et

cartographie des risques de l'érosion hydrique : cas du bassin versant de l'Oued larbaa, Maroc ». Papeles de Geografía,

Safae MAYCHOU : Étude morphostructurale et cartographie SIG du Rharb Septentrional et du Prérif (Maroc). Analyse sismotectonique et modélisation de la déformation de la région de Moulay Bousselham. thèse de doctorale en cotutelle « Univ. Chouaib Doukkali, Univ. de Bordeaux » pages 196.

Schumm S. A., (1963). Geological Society of America Bulletin Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains, (9). Doi:10.1130/0016-7606(1963)74.

Schumm, S. A. (1956a). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Bulletin of the Geological Society of America, 10, 1–12.

Smith, G.-H. (1935). The relative relief of Ohio. Geographical Review. <https://doi.org/10.2307/209602>.

Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. American Journal of Science, 248, 655–668.

Shiva Shankar., Dharanirajan., (2014). Drainage Morphometry of Flood Prone Rangat Watershed, Middle Andaman, India- A Geospatial Approach. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). Volume-3, Issue-11, April 2014, P15-22.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, 38, 913–920.

Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In V. T. Chow (Ed.), Handbook of applied hydrology (pp. 4–76). New York: McGraw Hill Book.

Sreedevi, P. D., Subrahmanyam, K., & Ahmed, S. (2004). The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain. Environmental Geology, 47(3), 412–420.

- Sreedevi, P. D., Owais, S., Khan, H. H., & Ahmed, S. (2009). Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. *Journal of the geological society of india*, 73(4), 543–552
- Sutradhar, Hemanta. « Assessment of Drainage Morphometry and Watersheds Prioritization of Siddheswari River Basin, Eastern India ». *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 48, no 4 (avril 2020): 627-44. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01108-5>.
- Suter., (1964). Carte géologique du Maroc au 1/500000: Notes et Mémoires Service Géologique, Maroc n° 245.
- Sunil, C., Somashekar, R.K &Nagaraja, B.C. (2010): Riparian vegetation assessment of Cauvery river basin of South India. *Environment Monitoring Assessment*170: pp 545-553
- Suter G. (1980). Carte structurale de la chaîne rifaine au 1/500 000. Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, 245b
- Suter G. 1965. La région du moyen Ouergha (Rif, Maroc). Etude préliminaire sur la stratigraphie et la tectonique. *Not. &Mém. Serv. Géol. Maroc*, t 24, 183, 7-17.
- Suter G. 1980. Carte structurale de la chaîne rifaine. Notes &Mém. Serv. géol. Maroc, 245b
- Spaccini R., Mbagwu J.S.C., Igwe C.A., Conte P., Piccolo A. (2004) Carbohydrates and aggregation in lowlands soils of Nigeria as influenced by organic inputs. *Soil Till. Res.*, 75, 161-172.
- Suter, G. (1965). La région du moyen Ouergha (Rif, Maroc). Etude préliminaire sur la stratigraphie et la tectonique. *Not. &Mém. Serv. Géol. Maroc*, t 24, 183, 7-1
- Suter, G. (1980). Carte géologique de la chaine rifaine au 1/500.000. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 245
- Suter, G., 1990. Carte géologique du Rif, Terwal-Oulad Aïssa a` 1/50000. Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 224.
- Schumm S.A. (1956): The Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboi, New Jersey. *Geological Society of America Bulletins*, 67(5).
- Taoussi A et al., (2009). Karst et ressources en eau au moyen atlas Nordoriental. *Géomaghreb* n° 05, P41-59.

- Thomas J, Joseph S, Thrivikramji KP, Abe G. (2011): Morphometric analysis of the drainage system and its hydrological implications in the rain shadow regions, Kerala, India. *J GeographicalSci.* 21(6), pp 1077–1088.
- Tejera de León, J. (1993). Les bassins néogènes d'avant-pays du Rif externe occidental liés à la transformante Jebha-Arbaoua (Maroc). Thèse d'Etat, Univ. Pau, France, 323 p
- Umair A., Syed A A., (2014). Analysis of Drainage Morphometry and Watershed Prioritization of Romushi-Sasar Catchment, Kashmir Valley, India using Remote Sensing and GIS Technology. *International Journal of Advanced Research* (2014), Volume 2, Issue 12,P5 23.
- U.S.S.L.S. (United State Salinity Laboratory Staff): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC, (1954).
- Umak, D. K., Punwatkar, V.L., Parasher, V.K. (2017): Morphometric Analysis and Prioritization of Sub-Watersheds of Barna Watersheds, Raisen District, Madhya Pradesh, India using Remote Sensing and GIS Techniques, 4(1), pp 99–106.
- Umrikar, B. N. (2017). Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. *Applied Water Science*, 7(5), 2231–2243. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0390-7>.
- Van Rast, E., Verloo, M., Demeyer, A., Pauwels, J.M., 1999. *Manual for the Soil Chemistry and Fertility Laboratory*. Ed, 1999. 7.
- Vestappen H., (1983). *The applied geomorphology*, International Institute for Aerial Survey and Earth Science (ITC), Enschede
- Vincy MV, Rajan B, Pradeepkumar AP. (2012): Geographic information system-based morphometric characterization of sub-watersheds of Meenachil river basin, Kottayam district, Kerala, India.
- Walkley A. et Black C. A., (1934): An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Vol. 37, p. 29-38.

- Waikar, M.L. & Nilawar, A.P. (2014): Morphometric Analysis of a Drainage Basin Using Geographical Information System: A Case study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, Vol.2 (Jan/Feb 2014 issue), pp 179-18.
- Walkley A. et Black C. A., (1934): An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposal modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Vol. 37, p. 29-38.
- Wildi, W. (1981). Le Ferrysch : cône de sédimentation détritique en eau profonde à la bordure nord- ouest de l'Afrique au Jurassique moyen à supérieur (Rif externe, Maroc). *Ecolog. Géol. Helv.*, Vol. 74/2, pp. 481- 527. 191 *
- Wildi, W. (1983). Lachaine Tello-Rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie), structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, Vol. 24, Fasc.3, pp. 201-297.
- Yadav, S. K., Singh, S. K., Gupta, M., & Srivastava, P. K. (2014). Morphometric analysis of upper tons basin from northern foreland of peninsular India using CARTOSAT satellite and GIS. *Geocarto International*.
- Yadav, S.K., Dubey, A., Szilard, S., & Singh, S.K. (2016). Prioritization of sub-watersheds based