Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences Dhar El Mahraz
Formation Doctorale :
Ressources naturelles, environnement et développement durable.

N° d'Ordre : /20

Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable

Discipline : Géodynamique actuelle de surface

Spécialité : Géosciences et Ressources Naturelles

Laboratoire : Géosystèmes, Environnement et Développement Durable

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

EL KAMEL Touria

Géodynamique de surface du bassin versant Allal Al Fassi (Moyen Atlas, Maroc)

Soutenue le 18/06/2021 devant le jury composé de :

Pr. Boushaba Abdellah	***Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah***	***Président***
Pr. Baali Abdennasser	***Faculté des Sciences Dhar El Mahraz – Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah***	***Directeur de thèse***
Pr. Dridri Abdallah	***Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah***	***Rapporteur***
Pr. Labbassi Kamal	***Faculté des sciences - EL Jadida***	***Rapporteur***
Pr. Maatouk Mustapha	***Faculté des Sciences et Techniques de Tanger***	***Rapporteur***
Pr. Belhaj Ali Atef	***Faculté des lettres et sciences humaines, Université Roi Abdulaziz, Djeddah, Arabie saoudite***	***Examinateur***
Pr. Kacimi Ilias	***Faculté des Sciences-Rabat***	***Examinateur***
Dr. Benmansour Moncef	***Centre National de l'Énergie des Sciences et des Techniques Nucléaires. Rabat, Maroc***	***Invité***
Dr. Gashut El Hadi	***Centre Régional de Télédétection des Etats de l'Afrique du Nord***	***Invité***

Année universitaire : 2020/2021

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences Dhar El Mahraz
Formation Doctorale :
Ressources naturelles, environnement et développement durable.

Thèse de doctorat par : El Kamel Touria
Formation doctorale : RNE2D
Spécialité : Géosciences et Ressources Naturelles
Laboratoire : GE2D
Titre : Géodynamique de surface du bassin versant Allal Al Fassi (Moyen Atlas, Maroc)

Résumé

Le bassin versant Allal Al Fassi a la particularité d'être à la fois sous le climat méditerranéen à caractère instable et les perturbations océaniques humides, auxquels s'ajoutent les effets de l'altitude, la continentalité, la couverture végétale, la couverture pédologique et l'action de l'homme. A partir de ce constat, la principale contrainte à son développement et au bon fonctionnement de son infrastructure est la dynamique érosive intense. Pour évaluer celle-ci, il serait impératif de mener une étude pluridisciplinaire sur les processus de l'érosion, les facteurs causaux, les paramètres physico-chimiques et les variables biogéographiques. La géologie, la pédologie, le relief, le climat, l'occupation des sols, l'action anthropique et la vulnérabilité socioéconomique ont fait part de cette étude. Deux modèles (PAP/CAR et RUSLE) sont appliqués à cet égard en utilisant différentes technologies de la géographie numérique et de la télédétection. Les résultats sont soumis à une analyse statistique multivariée (corrélation de Pearson r, régression linéaire R^2 simple et multiple et Analyse en Composantes Principales ACP). Le bassin versant M'Dez inclus dans le bassin versant Allal Al Fassi a été traité de la même façon pour bien saisir l'effet de la construction du barrage sur la retenue Allal Al Fassi en aval. 30 % de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi présente une susceptibilité au risque de l'érosion hydrique élevée à très élevée et 54.6% de la superficie présente des tendances à l'expansion ou à l'intensification de l'érosion localisée. Par contre, les degrés du risque de l'érosion fort à très fort ne représentent que 11,24% et correspondent à une susceptibilité et une vulnérabilité fortes à très fortes. Les pertes en sols annuelles moyennes sont estimées à 624,07 t.h-1.an-1, avec un intervalle très large qui varie entre 3,57 et 3521,07 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ et une médiane égale à 335,48 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. En amont et principalement à l'Est, les pertes en sols sont plus importantes à cause des pentes fortes et longues et les sols fortement érodibles avec peu ou pas d'aménagements en dépit de la conservation très variable et de l'érosivité très faible à faible. Par contre, les pertes en sols sont faibles dans les zones à érosivité, longueur et degré des pentes et érodibilité faibles à très faibles, à pratiques antiérosives faibles et à conservation des sols forte. L'analyse statistique des résultats combinés de l'érodibilité K, des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, densité et pourcentages des argiles, des silts, des sables, de $CaCO_3$ et de matière organique) et des variables biogéographiques des sols (pente, pédologie, lithologie et occupation des sols) a montré que l'érodibilité K augmente avec le pourcentage de la fraction silteuse et inversement avec le pourcentage de la matière organique. Elle est faible pour les sols structurés et évolués (vertisols, sesquioxydes et calcimagnésiques) et élevée pour les sols moins structurés et remaniés (sols à minéraux bruts, sols peu évolués et complexes C2 et C3). Elle est relativement faible sur les sols sous matorrals et importante sur les sols sous steppes et sols agricoles et non cultivés. L'analyse statistique multivariée a permis de démontrer aussi que l'état érosif (PAP/CAR) s'aggrave avec l'augmentation de la raideur des pentes et la diminution de la protection des sols et que les pertes en sols (RUSLE) sont régies par le degré et la longueur des pentes LS, l'érodibilité K et les pratiques antiérosives P. Les pourcentages de la matière organique, de sables et de silts possèdent une incidence significative sur la variation des pertes en sols qui s'avèrent importantes pour les sols de types complexe C1 et minéraux bruts, les sols sur terrains à substrat dolomitique et les sols occupés par les matorrals et les steppes. En ce qui concerne le bassin versant M'Dez, plus de la moitié de sa superficie (59,5%) est vulnérable à l'érosion (états érosifs notables, élevés et très élevés). Les processus d'érosion y sont diversifiés, dominés par le décapage superficiel (76,8% de la superficie). Les zones à rigoles et ravins superficiels occupent 11,2% de la superficie. 55,36% de la superficie présente des tendances à l'expansion ou l'intensification localisées. Les pertes en sols qui sont estimées à 596,08 t.h-1.an-1 de moyenne, sont fortes à très fortes dans 13,14% de la superficie où les sols sont fortement érodibles à forts degré et longueur de pente et avec peu ou pas d'aménagements. Enfin il s'avère très important de mener une opération de grande vigueur pour instaurer les différents aménagements antiérosifs dans le bassin versant M'Dez, pourvoyeur principal des sédiments vers les deux retenues Allal Al Fassi et M'Dez.

MOTS CLES : Géodynamique de surface ; Bassin versant Allal Al Fassi ; Erosion hydrique ; Facteurs causaux ; Modèles PAP/CAR et RUSLE ; Susceptibilité et tendance de l'érosion ; Vulnérabilité ; Pertes en sols, Bassin versant M'Dez ; Statistiques multivariées ; Moyen Atlas ; Maroc ; Méditerranée.

Année universitaire : 2020/2021

AVANT-PROPOS

À LA MÉMOIRE
DE MON PÈRE

Avec l'expression de ma gratitude, je dédie ce modeste labeur à une personne physiquement inexistante, mais à jamais présente dans mon cœur. À mon plus précieux don céleste ! À mon père que dieu lui donne sa miséricorde!

Quel que soient les expressions enlacées, je n'arriverai jamais à lui exprimer ma reconnaissance et mon amour inconditionnels. Je dédie cet événement marquant à mon père **Abdelkader EL KAMEL** pour son énorme amour, ses douaes et sa grande confiance tant en moi qu'en son éducation. J'aurais souhaité que cette *main de fer dans un gant de velours* soit présente pour cueillir un petit fruit du grand champ qu'elle a pu semer.

Que ce modeste succès soit le meilleur hommage que je puisse lui rendre pour toutes les valeurs qu'il a pu précieusement m'inculquer, tous les défis qu'il m'a initié à relever, en me partageant ses connaissances et ses expériences, tout en m'accordant sa confiance et une vaste indépendance qui m'ont été d'une grande aide dans l'exécution des missions valorisantes comme celle-ci.

J'aurais souhaité mettre entre tes mains chaque ligne de cette dédicace afin de t'exprimer ma gratitude et discerner la fierté sur ton visage. Or, j'espère que dans le monde qui est tien présentement, tu apprécieras cet hommage et que tu le considéreras comme un douae, une Sadaka ou un salut de ton âme.
Puisse Allah, le glorieux t'avoir en sa sainte miséricorde !

Tounia et Kamel



Remerciements

De prime abord, je tiens à remercier **ALLAH** le glorieux de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme cette thèse.

En guise de reconnaissance, mes remerciements s'adressent particulièrement à mon Professeur **BAALI Abdennasser**. J'ai eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances et compétences, de ses précieux conseils et de son suivi tout au long de la préparation de ma thèse. Je vous remercie infiniment cher Professeur, pour votre confiance, votre encadrement de qualité, vos conseils et critiques constructives, vos corrections ainsi pour le temps que vous avez consacré à la réalisation de ce travail.

Subséquemment, pour le grand honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail, mes sincères remerciements au professeur **BOUSHABA Abdellah** de l'honneur qu'il m'avait fait en acceptant de présider ce jury, du grand soutien moral et des précieux conseils. Je vous remercie chers jurés, Professeur **DRIDRI Abdallah**, Professeur **LABBASSI Kamal**, Professeur **MAATOUK Mustapha**, Professeur **BEL HADJ ALI Atef**, Docteur **BENMANSOUR Moncef**, Docteur **GASHUT El Hadi** et Professeur **KACIMI Ilias**, de l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de rapporter et examiner mon travail. Je suis très reconnaissante de bien vouloir porter intérêt à mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur **BENLEMLIH Mohammed**, Doyen de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, à Monsieur **AMAKDOUF Hicham** secrétaire général et à Messieurs les Vices-doyens, Professeur **ELACHQAR Abdelrhani**, Professeur **HASSOUNI Mohammed** et Professeur **BELKASMI Mohammed** pour leur disponibilité, leurs services et leur soutien académique durant toute la période de la thèse.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers toute mon équipe de recherche, mes collègues et compères qui ont tout

mis à ma disposition pour me permettre de travailler dans les meilleures conditions. Je remercie **Haytam MESRAR**, **Amine COUSCOUS**, **Oualid HAKAM**, **Khalil Azennoud**, **Mohamed MROURTI**, **Aziza LYAZIDI**, **Kaoutar MOUNIR**, **Nadia Hamdani**, **Lamia KHEMIRI**, **Fatima Ezzahra BOUCHNEB**, **Mannoubi KHELIL**, **Seif GAIDI**, qui m'ont apporté leur soutien moral, spirituel et intellectuel tout au long de ma démarche. Je tiens à remercier aussi Professeur **LOUAYA Abdelkarim** pour sa disponibilité et son aide si précieuse et Professeur **KOUDIA Jilali** pour la correction des manuscrits en anglais et les précieux conseils.

Mes plus chaleureux remerciements s'adressent à Madame **ABDELMALEK BABBOU Chiraz**, Professeur **GHANMI Mohamed**, Professeur **SEBEI Abdelaziz** et toute l'équipe de recherche du laboratoire Géosciences, Ressources Minérales, Énergies et Environnement de l'Université Tunis El Manar et Monsieur **GASHUT El Hadi** directeur du Centre Régional de Télédétection des États d'Afrique du Nord pour leur soutien et leur encadrement durant nos collaborations et stages.

Je remercie les techniciens des laboratoires du département de géologie de la Faculté des Sciences Dhar Mahraz, Monsieur **BAHOU Rachid** et Monsieur **MHENED Mohamed** pour leur disponibilité et leur aide précieuse.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à Madame **KARKOURI Malika** et Madame **EL HARZLI Fatma** pour leurs efforts fournis afin de maintenir la propreté et l'hygiène dans le bureau et dans les laboratoires me permettant de travailler dans les meilleures conditions.

Évidemment, l'achèvement de ce mémoire a été possible grâce à plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude. En premier lieu et avec énormément d'amour et d'émotion, je remercie ma chère mère pour tous les sacrifices et perpétuel soutien, pour son amour inconditionnel, ses douaes et toutes les valeurs qu'elle a su m'inculquer. Je remercie mon oncle **LARGOU Abderrazak** pour son soutien inconditionnel et ses encouragements. Un grand merci à mes frères et sœurs et plus

spécifiquement ma chère **Karima** pour sa constante présence physique, son renfort et son appui. Un grand merci à ma chère **Assia** pour sa complicité et son assiduité malgré l'écart et la distance qui nous dissocie. Je remercie également la chère **Laila** qui, étant Psychorééducatrice et Maitre praticienne en coaching, a pu m'outiller et m'accompagner dans la gestion du stress tout au long de la démarche qui donne fruit aujourd'hui.

De crainte d'en avoir omis, je désire remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail. Merci à vous tous.

TABLES DES MATIERES

Table des matières

Avant-propos II

Remerciements III

Table des matières 2

Liste des figures 12

Liste des tableaux 20

Liste des équations 24

Liste des abréviations 26

Abstract 31

Introduction générale 34

Première partie

Facteurs contrôlant la géodynamique de surface du bassin versant Allal Al Fassi

- **Chapitre I : Facteur géologie et pédologie** 41

I. Cadre géologique 42

I.1. Lithostratigraphie 46

I.2.1. Soubassement paléozoïque 46

I.2.2. Trias 46

I.2.3. Jurassique 47

I.2.3.1. Dolomies et calcaires du Lias 47

I.2.3.2. Contraste lithologique du Dogger 48

I.2.4. Crétacé 49

I.2.5. Paléogène 49

I.2.6. Miocène 50

I.2.7. Pliocène et Quaternaire 50

I.2. Cadre morphostructural 52

I.2.1. Moyen Atlas tabulaire 53

I.2.2. Moyen Atlas plissé 53
I.2.2.1. Rides anticlinales 54
I.2.2.2. Synclinaux 56
II. Cadre pédologique 57
II.1. Classification des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi 58
II.1.1. Classes 59
II.1.2. Sous-classes 59
II.1.3. Groupes 60
II.2. Répartition des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi 60
II.2.1. Sols peu évolués 60
II.2.2. Sols calcimagnésiques 61
II.2.3. Sols isohumiques 61
II.2.4. Sols minéraux bruts 61
II.2.5. Vertisols 62
II.2.6. Sols à sesquioxydes de fer 62
II.2.7. Unités complexes 62
III. Conclusion 63
 Chapitre II : Facteur topographie et caractéristiques physiques 66
I. Caractéristiques géométriques 68
I.1. Surface 68
I.2. Forme 68
II. Relief 69
II.1. Hypsométrie 70
II.2. Courbe hypsométrique 71
II.3. Rectangle équivalent 72
II.4. Altitudes caractéristiques 73
II.4.1. Altitudes maximale et minimale 73

II.4.2. Altitude moyenne 73

II.4.3. Altitude médiane 74

III. Pentes 74

III.1. Répartition des pentes 74

III.2. Pente moyenne 75

III.3. Indice de pente de Roche Ip 76

III.4. Indice de pente globale 76

IV. Réseau de drainage 77

IV.1. Topologie de l'écoulement 78

IV.2. Topologie du réseau de drainage 79

IV.3. Ordres des cours d'eau 79

V. Développement du réseau de drainage 81

V.1. Densité de drainage 81

V.2. Densité hydrographique 82

V.3. Coefficient de torrentialité C_t 82

V.4. Temps de concentration Tc 83

VI. Lois de composition du réseau de drainage 83

VI.1. Rapport de confluence 83

VI.2. Rapport de longueur 84

VII. Conclusion 85

Chapitre III : Facteur climatologie 89

I. Précipitations 90

I.1. Données pluviométriques 90

I.1.1. Inventaire des données 92

I.1.2. Critique des données 93

I.1.3. Homogénéisation des données 95

I.1.4. Correction et comblement des lacunes des données 97

I.2. Régime des précipitations 98

I.2.1. Précipitations mensuelles moyennes 98

I.2.2. Précipitations annuelles moyennes 99

I.2.3. Variations interannuelles des précipitations 101

I.3. Lame d'eau moyenne tombée 106

I.3.1. Moyenne arithmétique 106

I.3.2. Méthode des polygones de Thiessen 106

I.3.3. Méthode des isohyètes 108

I.3.4. Lame d'eau moyenne 110

II. Températures 112

III. Interaction précipitations et températures 113

III.1. Indice xérothermique de Gaussen (diagramme ombrothermique) 113

III.2. Indice bioclimatique d'Emberger (climagramme d'Emberger) 115

III.3. Indices d'aridité de De Martonne (IDM) 117

IV. Evapotranspiration 119

V. Relief et exposition des versants 121

VI. Vents 123

VII. Indices de sécheresse hydrométéorologique 123

VIII. Conclusion 129

Chapitre IV : Facteur couvert végétal et occupation des sols 132

I. Effets du couvert végétal sur l'érosion hydrique 132

I.1. Rôle de la végétation contre l'ablation 133

I.2. Rôle du couvert végétal dans l'accumulation des sédiments (Piégeage des sédiments) 134

II. Occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi 134

II.1. Pré-traitement des données satellitaires 136

II.2. Traitement des données satellitaires 136

II.3. Données de références 137

II.4. Validation et évaluation de la qualité de la classification 139

II.5. Carte d'occupation des sols 142

II.5.1. Végétation naturelle 143

II.5.2. Agriculture 143

II.5.3. Terrains nus et zones de parcours 144

II.5.4. Plans d'eau 144

II.6. Comparaison des occupations des sols entre 1997 et 2017 dans le bassin versant Allal Al Fassi 146

III. Dynamique spatio-temporelle de la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi 147

III.1. Indice de végétation par différence normalisé NDVI 149

III.2. Indice de végétation ajusté pour le sol SAVI 152

III.3. Comparaison des indices NDVI et SAVI 154

III.4. Evolution sol nu/végétation par les indices NDVI et SAVI 155

IV. Conclusion 157

Chapitre V : Facteur anthropique et vulnérabilité 160

I. Caractéristiques démographiques 161

II. Erosion anthropique et lutte antiérosive 163

II.1. Facteurs d'érosion anthropique 164

II.2. Lutte antiérosive 166

II.2.1. Aménagements des terrains agricoles 168

II.2.2. Aménagements fonciers 169

II.2.3. Aménagements hydro-agricoles 169

II.2.4. Aménagements forestiers 170

II.2.5. Aménagements des parcours 170

II.2.6. Aménagements du réseau hydrographique 171

II.2.7. Entretiens des plantations fruitières existantes 171

II.2.8. Infrastructures et équipements 171

III. Vulnérabilité 172

III.1. Evaluation et pondérations des critères 174

III.2. Combinaison SIG-AHP 175

III.3. Evaluation des préjudices corporels 177

III.3.1. Population 178

III.3.2. Bâtiments 180

III.3.3. Routes 181

III.4. Evaluation des dommages structurels 183

III.4.1. Bâtiments 184

III.4.2. Routes 186

III.4.3. Occupation des sols 188

III.5. Evaluation des pertes fonctionnelles 192

III.6. Méconnaissances de l'aléa 193

III.7. Cartes des composantes de la vulnérabilité 197

III.8. Carte de vulnérabilité 198

IV. Conclusion 199

Deuxième partie

Évaluation de l'érosion et effet du barrage M'Dez dans le bassin versant Allal Al Fassi

Chapitre I : Tendances de l'érosion et érosion potentielle dans le bassin versant Allal Al Fassi 203

I. Modèle probabiliste PAP/CAR 203

I.1. Approche prédictive 204

I.1.1. Carte d'érodibilité 206

I.1.2. Carte de protection des sols 208

I.1.3. Carte des états érosifs 209

I.2. Approche descriptive 210

I.3. Approche d'intégration 213

I.3.1. Carte consolidée 213

I.3.2. Carte des tendances 215

II. Relations entre les facteurs causaux et l'érosion hydrique 216

II.1. Coefficient de corrélation de Pearson (r) 217

II.2. Régression linéaire R^2 218

II.3. Analyse en composantes principales (ACP) 219

III. Evaluation du risque de l'érosion hydrique 222

IV. Conclusion 224

Chapitre II : Quantification des pertes en sols et statistiques multivariées dans le bassin versant Allal Al Fassi 227

I. Modèle mathématique RUSLE 229

I.1. Érosivité des pluies (R) 234

I.2. Érodibilité (K) 235

I.3. Longueur et degré de pente (LS) 237

I.4. Conservation des sols (C) 238

I.5. Pratiques antiérosives (P) 239

I.6. Pertes en sols (Y) 240

II. Statistiques multivariées 242

II.1. Pertes en sols en fonction des facteurs causaux 243

II.1.1. Coefficient de corrélation de Pearson r 243

II.1.2. Analyse de la variance ANOVA 244

II.1.3. Régression linéaire R^2 246

II.1.4. Analyse en composantes principales ACP 249

II.2. Pertes en sols en fonction des paramètres physico-chimiques 250

II.2.1. Coefficient de corrélation de Pearson r 251

II.2.2. Analyse de la variance ANOVA 251

II.2.3. Régression linéaire R^2 254

II.2.4. Analyse en composantes principales ACP 258

II.3. Pertes en sols en fonction des variables biogéographiques 259

III. Conclusion 262

Chapitre III : Influence des paramètres physico-chimiques et des variables biogéographiques sur l'érodibilité des sols du bassin versant Allal Al Fassi 265

I. Echantillonnage 266

II. Analyses physico-chimiques 267

III. Calcul de l'érodibilité (K) 269

IV. Résultats et discussions 270

IV.1. Erodibilité des sols en fonction des paramètres physico-chimiques et variables biogéographiques 271

IV.2. Variations des paramètres physico-chimiques et de l'érodibilité des sols en fonction des occupations des sols 275

IV.3. Variations des principaux paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur des sols de certaines occupations des sols 276

IV.4. Transect Ahermoumou 277

V. Conclusion 280

Chapitre IV : Effet de l'installation du barrage M'Dez sur l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi 283

I. Morphométrie du bassin versant M'Dez 284

II. Evaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant M'Dez 290

II.1. Evaluation de la susceptibilité et des tendances de l'érosion 291

II.1.1. Approche prédictive 291

II.1.1.1. Carte des pentes 291

II.1.1.2. Carte lithologique 292

II.1.1.3. Carte d'érodibilité 293

II.1.1.4. Carte d'occupation des sols 295

II.1.1.5. Carte de densité du couvert végétal 296

II.1.1.6. Carte de protection des sols 297

II.1.1.7. Carte des états érosifs 298

II.1.2. Approche descriptive 299

II.1.3. Approche d'intégration 300

II.1.3.1. Carte consolidée 300

II.1.3.2. Carte des tendances de l'érosion 302

II.2. Quantification des pertes en sols 303

II.2.1. Érodibilité (K) 303

II.2.2. Longueur et degré de pente (LS) 304

II.2.3. Érosivité des pluies (R) 305

II.2.4. Conservation des sols (C) 306

II.2.5. Pratiques antiérosives (P) 307

II.2.6. Pertes en sols (Y) 308

III. Statistiques multivariées 309

III.1. Pertes en sols et facteurs causaux 310

III.1.2. Régression linéaire (R^2) 311

III.1.3. Analyse en composantes principales (ACP) 313

III.2. Etats érosifs et facteurs causaux 314

III.2.1. Coefficient de corrélation de Pearson (r) 314

III.2.2. Régression (R^2) 315

III.2.3. Analyse en composantes principales (ACP) 317

IV. Conclusion 318

Conclusion générale 321

Références bibliographiques 327

Annexes 347

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique du bassin versant Allal Al Fassi 41

Figure 2: Carte géologique du bassin versant Allal Al Fassi (Bronner et al. 1985 ; Sabaoui, 1998 ; Martin, 1981, modifiée) 45

Figure 3: Log stratigraphique du Moyen Atlas (Sabaoui, 1998 modifié) 51

Figure 4: Coupe géologique transversale passant par les ensembles structuraux du bassin versant Allal Al Fassi 53

Figure 5: Carte pédologique du bassin versant Allal Al Fassi 63

Figure 6: Organigramme méthodologique 68

Figure 7: Carte hypsométrique du bassin versant Allal Al Fassi 70

Figure 8: A - Classification de l'aspect général des courbes hypsométriques selon l'état d'érosion. (1 : vieux bassins versant, 2 : bassins versants matures, 3 : jeunes bassins versants) ; B - Courbe hypsométrique du bassin versant Allal Al Fassi 72

Figure 9: Rectangle équivalent du bassin versant Allal Al Fassi 73

Figure 10: Carte des pentes du bassin versant Allal Al Fassi 75

Figure 11: Hydrographie du bassin versant Allal Al Fassi 78

Figure 12: Carte de l'ordre des cours d'eau du bassin versant Allal Al Fassi 80

Figure 13: Localisation géographique des stations pluviométriques dans le bassin versant Allal Al Fassi 91

Figure 14: Méthode du simple cumul des données pluviométriques annuelles des stations du bassin versant Allal Al Fassi 96

Figure 15:Exemples de la méthode du double cumul des données pluviométriques des stations du bassin versant Allal Al Fassi 97

Figure 16: Diagrammes de dispersion des stations Aguelmam Sidi Ali et Dar El Hamra 98

Figure 17: Précipitations mensuelles moyennes dans le bassin versant Allal Al Fassi 99

Figure 18: Evolution interannuelle des précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi (1980-2020) 100

Figure 19: Variations interannuelles des précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi (1980-2020) 102

Figure 20: Indice pluviométrique Ip dans les stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *103*
Figure 21: Indice pluviométrique Ip des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *105*
Figure 22: Carte des polygones de Thiessen du bassin versant Allal Al Fassi ____ *107*
Figure 23: Carte des isohyètes du bassin versant Allal Al Fassi ____ *109*
Figure 24: Pluviométrie moyenne annuelle (1980-2020) en fonction de l'altitude des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *110*
Figure 25: Tendances des températures moyennes mensuelles au niveau des stations du bassin versant Allal Al Fassi ____ *112*
Figure 26: Diagrammes ombrothermiques des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *114*
Figure 27: Répartition des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi dans le climagramme d'Emberger ____ *116*
Figure 28: Indices mensuels d'aridité de De Martonne pour les stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *118*
Figure 29: Courbes d'évapotranspiration potentielle mensuelle au niveau des stations du bassin versant Allal Al Fassi ____ *120*
Figure 30: Carte de l'exposition des versants du bassin versant Allal Al Fassi ____ *122*
Figure 31:Indices de sècheresse SPI et SDI à l'échelle annuelle (12 mois) du bassin versant Allal Al Fassi ____ *126*
Figure 32: Matrice de corrélation entre SPI_{-12} et SDI_{-12} au niveau des quatre stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *127*
Figure 33: Fréquence des classes de l'indice SPI_{-12} des quatre stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *128*
Figure 34: Fréquence des classes de l'indice SDI_{-12} des quatre stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *128*
Figure 35: Processus de la classification supervisée ____ *135*
Figure 36: Photos des différentes occupations des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *138*

Figure 37: Photos de compagnes de terrain du site de référence Aït Quassou (Timahdite, province d'Ifrane) _____ *139*
Figure 38: Matrice de confusion associée à l'évaluation de la carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi _____ *141*
Figure 39: Carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi _____ *145*
Figure 40: Superficies (%) de l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi _ *145*
Figure 41: Variations des occupations des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi après deux décennies (1997/2017) _____ *147*
Figure 42: Variations interannuelles de l'indice NDVI et SPI3 dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *149*
Figure 43: Variations interannuelles de l'indice NDVI moyen dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *150*
Figure 44: Dynamique spatio-temporelle de l'indice NDVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *151*
Figure 45: Variations interannuelles de l'indice SAVI et SPI_3 dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *152*
Figure 46: Dynamique spatio-temporelle de l'indice SAVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *153*
Figure 47: : Variations interannuelles de l'indice SAVI moyen dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *154*
Figure 48: Comparaison des indices NDVI et SAVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *154*
Figure 49: Courbe de régression des indices NDVI et SAVI _____ *155*
Figure 50:Evolution spatio-temporelle de la végétation et du sol nu par l'indice NDVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *156*
Figure 51: Evolution spatio-temporelle de la végétation et du sol nu par l'indice SAVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020) _____ *156*
Figure 52: Régression des pourcentages de la végétation et du sol nu par les indices SAVI et NDVI _____ *157*

Figure 53: Evolution démographique du bassin versant Allal Al Fassi (1982-1994-2002-2014) ____ *163*
Figure 54: Transitions de l'occupation des sols (Foley et al., 2005) ____ *165*
Figure 55: Modèle conceptuel reliant occupation des sols et gestion et changement environnemental (Mather, 2006) ____ *166*
Figure 56: Carte des différents aménagements réalisés dans le bassin versant Allal Al Fassi (DREFLCD-FB, 2010) ____ *168*
Figure 57: Organigramme méthodologique de l'évaluation de la vulnérabilité dans le bassin versant Allal Al Fassi (inspiré de Léone, 1996)) ____ *173*
Figure 58: Composantes de la vulnérabilité du bassin versant Allal Al Fassi ____ *177*
Figure 59: Composantes des préjudices corporels ____ *178*
Figure 60: Réseau routier du bassin versant Allal Al Fassi ____ *182*
Figure 61: Bâtiments en pierre, en bois/métal et autres dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *184*
Figure 62: Bâtiments vulnérables dans la région de Boulemane ____ *185*
Figure 63: Dégradation de l'infrastructure routière dans le bassin versant Allal Al Fassi *188*
Figure 64: Formes d'érosion des terrains agricoles ____ *191*
Figure 65: Composantes de la méconnaissance de l'aléa ____ *194*
Figure 66: Cartes des composantes de la vulnérabilité du bassin versant Allal Al Fassi __ *197*
Figure 67: Carte de vulnérabilité du bassin versant Allal Al Fassi ____ *199*
Figure 68: Organigramme méthodologique du modèle PAP/CAR ____ *204*
Figure 69: Carte de l'érodibilité du bassin versant Allal Al Fassi ____ *207*
Figure 70: Carte de protection des sols du bassin versant Allal Al Fassi ____ *209*
Figure 71: Carte des états érosifs du bassin versant Allal Al Fassi ____ *210*
Figure 72: Carte des formes d'érosion du bassin versant Allal Al Fassi ____ *211*
Figure 73: Exemples de formes d'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *213*
Figure 74: Carte consolidée du bassin versant Allal Al Fassi ____ *214*
Figure 75: Carte des tendances de l'érosion du bassin versant Allal Al Fassi ____ *216*
Figure 76: Matrice de corrélation des états érosifs et des facteurs causaux ____ *217*
Figure 77: Courbes de régression des états érosifs et des facteurs causaux ____ *219*

Figure 78: Diagramme des composantes principales et des poids des variables _____ *221*
Figure 79: Organigramme de l'évaluation du risque potentiel _____ *222*
Figure 80: Composantes du risque potentiel de l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *223*
Figure 81: Carte du risque potentiel de l'érosion hydrique du bassin versant Allal Al Fassi _____ *224*
Figure 82 : Organigramme méthodologique du modèle mathématique RUSLE _____ *228*
Figure 83 : Nomographe de l'érodibilité des sols (Wischmeier et Smith, 1978) _____ *230*
Figure 84 : Répartition du facteur m dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *232*
Figure 85 : Corrélation entre les valeurs du facteur C et les valeurs NDVI _____ *233*
Figure 86 : Carte d'érosivité R du bassin versant Allal Al Fassi _____ *235*
Figure 87 : Carte de l'érodibilité K du bassin versant Allal Al Fassi _____ *236*
Figure 88: Carte de longueur et degré de pente LS du bassin versant Allal Al Fassi _____ *237*
Figure 89 : Carte de conservation des sols C du bassin versant Allal Al Fassi _____ *239*
Figure 90 : Carte des pratiques antiérosives P du bassin versant Allal Al Fassi _____ *240*
Figure 91 : Carte des pertes en sols Y du bassin versant Allal Al Fassi _____ *241*
Figure 92: Diagramme de distribution de fréquence des pertes en sols dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *242*
Figure 93: Matrice de corrélation des pertes en sols et facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *244*
Figure 94: Résultats de l'analyse de la variance ANOVA des pertes en sols et facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *245*
Figure 95: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sols et des facteurs causaux du bassin versant Allal Al Fassi _____ *247*
Figure 96: : Courbes de régression des pertes en sols et des facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *248*
Figure 97: Diagramme des composantes principales et poids des variables _____ *250*
Figure 98: Matrice de corrélation des pertes en sols et paramètres physicochimiques _____ *251*
Figure 99: Résultats de l'analyse de la variance ANOVA entre les pertes en sols et les paramètres physico-chimiques _____ *253*

Figure 100: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sol et des paramètres physico-chimiques _____ *255*
Figure 101: Courbes de régression des pertes en sols et des paramètres physico-chimiques _____ *257*
Figure 102: Diagramme des composantes principales et poids des variables _____ *258*
Figure 103: Résultats de l'analyse de la variance ANOVA entre les pertes et les variables biogéographiques _____ *260*
Figure 104: Répartition des occupations des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi (surface en %) _____ *260*
Figure 105: Répartition des formations lithologiques dans le bassin versant Allal Al Fassi (surface en %) _____ *261*
Figure 106: Pédologie en fonction de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi (surface en %) _____ *261*
Figure 107:Organigramme du calcul de l'érodibilité K par la méthode RUSLE _____ *265*
Figure 108:Photos montrant quelques manipulations pendant l'échantillonnage dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *266*
Figure 109: Quelques étapes de préparation et d'analyses physico-chimiques des échantillons de sols _____ *267*
Figure 110: Matériels et méthodes de préparation et analyses physico-chimiques des échantillons de sols _____ *268*
Figure 111: Equations de calcul de l'érodibilité K _____ *269*
Figure 112: Cartes pédologique et de l'érodibilité K du bassin versant Allal Al Fassi ____ *270*
Figure 113: Matrice de corrélation de l'érodibilité K avec les paramètres physico-chimiques du bassin versant Allal Al Fassi _____ *272*
Figure 114: Variance de l'érodibilité K en fonction des paramètres physico-chimiques des sols du bassin versant Allal Al Fassi _____ *273*
Figure 115: Variance de l'érodibilité K en fonction de la texture, l'occupation des sols et la lithologie dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *274*
Figure 116: Variations de l'érodibilité K et de quelques paramètres des sols sous trois occupations des sols _____ *275*

Figure 117: Evolution de quelques paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur de sols de trois occupations des sols ____ *277*
Figure 118: Situation des échantillons de sols du transect Ahermoumou ____ *278*
Figure 119: Paramètres physico-chimiques et érodibilité K de chaque échantillon de sols du transect Ahermoumou (El Kamel et al., 2020b) ____ *279*
Figure 120. Situation géographique du bassin versant M'Dez ____ *284*
Figure 121 : A - Courbe hypsométrique du bassin versant M'Dez ; B - Classification de l'aspect général des courbes hypsométriques selon l'état d'érosion ____ *286*
Figure 122. Rectangle équivalent du bassin versant M'Dez ____ *286*
Figure 123. Carte de l'ordre des cours d'eau du bassin versant M'Dez ____ *287*
Figure 124: Organigramme méthodologique de l'évaluation de l'érosion dans le bassin versant M'Dez ____ *290*
Figure 125: Carte des pentes du bassin versant M'Dez ____ *292*
Figure 126: Carte lithologique du bassin versant M'Dez ____ *293*
Figure 127: Carte d'érodibilité du bassin versant M'Dez ____ *294*
Figure 128: Carte d'occupation des sols du bassin versant M'Dez ____ *295*
Figure 129: Carte de densité du couvert végétal du bassin versant M'Dez ____ *296*
Figure 130: Carte de protection des sols du bassin versant M'Dez ____ *297*
Figure 131: Carte des états érosifs du bassin versant M'Dez ____ *298*
Figure 132: Carte des formes de l'érosion du bassin versant M'Dez ____ *300*
Figure 133: Carte consolidée du bassin versant M'Dez ____ *301*
Figure 134: Carte des tendances de l'érosion du bassin versant M'Dez ____ *302*
Figure 135: Carte de l'érodibilité K du bassin versant M'Dez ____ *304*
Figure 136: Carte de longueur et degré de pente du bassin versant M'Dez ____ *305*
Figure 137: Carte de l'érosivité des pluies du bassin versant M'Dez ____ *306*
Figure 138: Carte de la conservation des sols du bassin versant M'Dez ____ *307*
Figure 139: Carte des pratiques antiérosives du bassin versant M'Dez ____ *308*
Figure 140: Carte des pertes en sols du bassin versant M'Dez ____ *309*
Figure 141: Matrice de corrélation des pertes en sols et facteurs causaux du bassin versant M'Dez ____ *311*

Figure 142: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sol et des facteurs causaux du bassin versant M'Dez _____ *311*
Figure 143: Courbes de régression des pertes en sols et des facteurs causaux dans le bassin versant M'Dez _____ *312*
Figure 144: Diagramme des composantes principales et poids des variables _____ *314*
Figure 145: Matrice de corrélation des facteurs causaux et des états érosifs du bassin versant M'Dez _____ *315*
Figure 146: Courbes de régression des états érosifs et des facteurs causaux du bassin versant M'Dez _____ *316*
Figure 147: Diagramme des composantes principales et poids des variables _____ *318*

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *58*

Tableau 2: Calculs hypsométriques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *71*

Tableau 3: Répartition des pentes dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *74*

Tableau 4: Classification du relief selon l'Ig donné par l'ORSTOM ____ *77*

Tableau 5: Ordre et longueur des cours d'eau du bassin versant Allal Al Fassi ____ *81*

Tableau 6: Rapport de confluence dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *84*

Tableau 7: Rapport de longueur du réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi ____ *85*

Tableau 8: Récapitulatif des caractéristiques morphométriques du bassin versant Allal Al Fassi ____ *87*

Tableau 9: Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin versant Allal Al Fassi _ *91*

Tableau 10: Stations météorologiques retenues dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *92*

Tableau 11: Test de la Médiane ____ *94*

Tableau 12: Résultats du test de la Médiane ____ *95*

Tableau 13: Récapitulatif des principaux indicateurs de la variabilité pluviométrique ___ *102*

Tableau 14:Récaputilatif des résultats de l'indice Ip ____ *103*

Tableau 15: Moyenne pluviométrique dans le bassin versant Allal Al Fassi selon la méthode de Thiessen ____ *108*

Tableau 16: Moyenne pluviométrique selon la méthode des isohyètes dans le bassin versant Allal Al Fassi ____ *110*

Tableau 17: Lame d'eau annuelle moyenne tombée (la méthode de la moyenne arithmétique des précipitations au niveau des stations, la méthode de Thiessen et la méthode des isohyètes) ____ *111*

Tableau 18: Indice annuel d'aridité de De Martonne et climat associé ____ *117*

Tableau 19: Evolution du climat le long des douze mois de l'année selon De Martonne ___ *119*

Tableau 20: Classification humide/sec des indices SPI et SDI ____ *125*

Tableau 21: Spécification des images LANDSAT 8 ____ *135*

Tableau 22: Degré d'accord et coefficient de Kappa (Landis et Koch, 1977) ____ *141*

Tableau 23: Résultat du calcul des indices de précision ____ *142*

Tableau 24: Variations de l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi après deux décennies (1997/2017) _____ *146*
Tableau 25: Caractéristiques des données satellitaires utilisées _____ *148*
Tableau 26: Echelle de Saaty de comparaisons binaires (Saaty 1980) _____ *174*
Tableau 27: Échelle de Saaty pour l'attribution des poids (Saaty 1980) _____ *175*
Tableau 28: Indice randomisé _____ *175*
Tableau 29: Indices de perte selon l'âge, le genre, le nombre de personnes par famille et la qualité de vie de la population du bassin versant Allal Al Fassi _____ *179*
Tableau 30: Matériaux de construction selon le type de logement _____ *180*
Tableau 31: Indices de perte selon l'âge, le nombre d'étages, la fonction et les matériaux de constructions des bâtiments dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *180*
Tableau 32: Indices de perte en fonction de la densité d'automobilistes par catégorie de route _____ *182*
Tableau 33: Circulation et réseau routier national d'après le recueil du trafic routier 2018 (METLE, 2018). _____ *183*
Tableau 34: Indices de perte en fonction des coûts de reconstruction des bâtiments _____ *185*
Tableau 35: Indices de perte en fonction du coût de réhabilitation des routes _____ *186*
Tableau 36: Indices de perte en fonction de la réhabilitation des terrains agricoles et forestiers _____ *190*
Tableau 37: Indices de perte en fonction de la production agricole _____ *191*
Tableau 38: Indices de perte en fonction de la production animale _____ *191*
Tableau 39: Indices de perte en fonction de la production forestière _____ *191*
Tableau 40: Indices des pertes fonctionnelles _____ *192*
Tableau 41: Indices de perte selon le niveau culturel et le taux d'analphabétisme _____ *195*
Tableau 42: Indices de perte selon la production agricole et forestière _____ *196*
Tableau 43: Classification des paramètres d'entrée de la méthode PAP/CAR _____ *205*
Tableau 44: Matrices croisées de l'approche prédictive de la méthode PAP/CAR _____ *206*
Tableau 45: Classification des paramètres de sortie de l'approche prédictive de la méthode PAP/CAR _____ *206*
Tableau 46: Classification des formes d'érosion de la méthode PAP/CAR _____ *211*

Tableau 47: Classification des tendances de l'érosion de la méthode PAP/CAR _____ *215*

Tableau 48: Matrice IV de l'approche d'intégration de la méthode PAP/CAR _____ *215*

Tableau 49: Tableaux des poids des composants _____ *220*

Tableau 50: Signification des codes pour la structure et la perméabilité du sol (Wischmeier et Smith, 1978) _____ *230*

Tableau 51: Quelques résultats d'analyses des échantillons et K ajustée calculée _____ *231*

Tableau 52: Valeurs du facteur P et références bibliographiques _____ *234*

Tableau 53: Statistiques sommaires des pertes en sols et facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *243*

Tableau 54: Analyse des moyennes de la variance et de l'homogénéité des groupes _____ *246*

Tableau 55: Tableaux des poids des composantes _____ *249*

Tableau 56: Statistiques sommaires des paramètres physicochimiques des sols du bassin versant Allal Al Fassi _____ *250*

Tableau 57 : Analyse des moyennes de la variance et de l'homogénéité des groupes _____ *254*

Tableau 58: Tableaux des poids des composantes _____ *259*

Tableau 59: Statistiques sommaires des paramètres physico-chimiques et de l'érodibilité des sols du bassin versant Allal Al Fassi _____ *271*

Tableau 60: Calculs hypsométriques du bassin versant M'Dez _____ *285*

Tableau 61: Ordres et longueurs des cours d'eau du bassin versant M'Dez _____ *288*

Tableau 62: Rapport de confluence dans le bassin versant M'Dez _____ *288*

Tableau 63: Rapport de longueur du réseau hydrographique du bassin versant M'Dez ___ *289*

Tableau 64: Caractéristiques morphométriques du bassin versant M'Dez _____ *289*

Tableau 65: Statistiques sommaires _____ *310*

Tableau 66: Tableaux des poids des composantes du modèle RUSLE _____ *314*

Tableau 67: Tableaux des poids des composantes du modèle PAP/CAR _____ *317*

Tableau 68: Age, genre de nombre de personnes par famille de la population du bassin versant Allal Al Fassi _____ *347*

Tableau 69: Indice de perte selon l'âge le genre le nombre de personne par famille de la population du bassin versant Allal Al Fassi _____ *348*

Tableau 70: Indice de perte selon la qualité de vie de la population du bassin versant Allal Al Fassi _____ *349*
Tableau 71: Vulnérabilité fonctionnelle selon la méconnaissance _____ *350*
Tableau 72: Indice de perte selon la qualité de vie _____ *351*
Tableau 73: Types de logement par communes _____ *352*
Tableau 74: Indice de perte par matériaux de construction _____ *353*
Tableau 75: Ages, étages et fonctions des constructions par communes _____ *354*
Tableau 76: Indice de perte par âge, étages et fonctions des constructions _____ *355*
Tableau 77: Linéaire par catégorie de route dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *356*
Tableau 78: Estimation du nombre de véhicule par jour _____ *357*
Tableau 79: Indice de perte par nombre de véhicules _____ *358*
Tableau 80: Estimation du Coût de réhabilitation par catégorie de route _____ *359*
Tableau 81: Indice de perte de production agronomique et forestière _____ *360*
Tableau 82: Indice de perte par coût de réhabilitation des routes _____ *361*
Tableau 83: Indice de perte selon le type de ménage _____ *362*
Tableau 84: Production agricole par province dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *363*
Tableau 85: Production de l'élevage par province dans le bassin versant Allal Al Fa ____ *363*
Tableau 86: Forêts reboisées et naturelles dans le bassin versant Allal Al Fassi _____ *363*

Liste des équations

Equation 1 : ____ *69*
Equation 2 : ____ *72*
Equation 3: ____ *72*
Equation 4: ____ *73*
Equation 5: ____ *75*
Equation 6: ____ *76*
Equation 7: ____ *76*
Equation 8: ____ *81*
Equation 9: ____ *82*
Equation 10: ____ *82*
Equation 11: ____ *83*
Equation 12: ____ *84*
Equation 13: ____ *84*
Equation 14: ____ *98*
Equation 15: ____ *102*
Equation 16: ____ *106*
Equation 17: ____ *106*
Equation 18: ____ *108*
Equation 19: ____ *115*
Equation 20: ____ *117*
Equation 21: ____ *117*
Equation 22: ____ *119*
Equation 23: ____ *124*
Equation 24: ____ *125*
Equation 25: ____ *125*
Equation 26: ____ *140*
Equation 27: ____ *147*
Equation 28: ____ *148*
Equation 29: ____ *175*

Equation 30: _____ *218*
Equation 31: _____ *219*
Equation 32: _____ *229*
Equation 33: _____ *229*
Equation 34: _____ *230*
Equation 35: _____ *231*
Equation 36: _____ *231*
Equation 37: _____ *232*
Equation 38: _____ *233*
Equation 39: _____ *233*
Equation 40: _____ *246*
Equation 41: _____ *249*
Equation 42: _____ *254*
Equation 43: _____ *255*
Equation 44: _____ *259*
Equation 45: _____ *311*
Equation 46: _____ *313*
Equation 47: _____ *315*
Equation 48 : _____ *317*

Liste des abréviations

^{137}Cs : Césium 137

ACP : Analyse en Composantes Principales

AEFCS : Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols

AFNOR : Association française de normalisation

AHP : Analyse Hiérarchique des Procédés

ANOVA : Analysis Of Variance (analyse de la variance)

BV : Bassin Versant

C : Conservation des sols

C1 : ravinement

C2 : ravins moyennement profonds

C3 : ravins profonds

CE : Conductivité Electrique

C_t : Coefficient de torrentialité

CX : zone à bad-lands et ravinements généralisés

D : érosion en rigole et ravins

D2 : rigoles et ravinement superficiel

DREF : Direction Régionale des Eaux et Forêts

DREFLCD : Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification

DREFLCD-FB : La Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification Fès-Boulemane

DRS : Défense et Restauration des Sols

EN : European Norm (Norme européenne)

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus

FAO : Food and Agriculture Organization (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

HCEFLCD : le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification

IDH : Indice de Développement Humain

IDS : Indice de Développement Social

Ig : Indice de pente globale

Ii : Indice mensuel d'aridité de De Martonne

I_p : Indice de pente de Roche

IR : Infra Rouge

ISO : International Standardization Organization (Organisation internationale de normalisation)

K : érodibilité des sols

K_G : indice de compacité de Gravelius

L : érosion en nappe et décapage

L1 : érosion en nappe et diffuse

L3 : décapage superficiel et ruissellement diffus

LS : longueur et degré de pente

M1 : glissement de terrain et solifluxion

MAPM : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime

MENFPESRS : Ministère de l'Education Nationale, de la Formation professionnelle, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

METLE : Ministère de l'Equipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MO : Matière Organique.

Moy. : moyenne

NAO : North Atlantic Oscillation (Oscillations Nord-Atlantique)

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation par différence normalisé)

NF : Norme Française

OLI : Operational Land Imager

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

P : pratiques antiérosives

PABV-HCEFLCD : Plan d'Aménagement des Bassins Versants- le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification

PAM : Plan d'Action pour la Méditerranée

Pan : panchromatique

PAP/CAR : Programme d'Action Prioritaire/ Centre d'Activité Régional

PIB : Produit Intérieur Brut

PIR : Proche Infrarouge

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

PPA : Parité du Pouvoir d'Achat

r : coefficient de corrélation de Pearson

R : érosivité des pluies

R^2 : coefficient de détermination de la régression linéaire

R_c : Rapport de confluence

R_L : Rapport de longueur

ROI : Region Of Interest (régions d'intérêt)

RUSLE : Revised Universal Soil Loss Equation (équation universelle des pertes en sols révisée)

SAU : Surface Agricole Utile

SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index (Indice de végétation ajusté pour le sol)

SDI : Streamflow Drought Index (indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial)

SIG : Système d'Information Géographique

SP : Site Protégé

SPI : Standardized Precipitation Index (Indice de précipitation normalisé)

Ss : code de la structure du sol

SWAT : Soil and Water Assessment Tool (outil d'évaluation du sol et de l'eau)

SWIR : Short-Wave Infrared (infrarouge à ondes courtes)

Tc : Temps de concentration

TIRS : Thermal Infrared Sensor (capteur infrarouge thermique)

TM : Thematic Mapper

USLE : Universal Soil Loss Equation (équation universelle des pertes en sols)

UTM : Universal Transversal Mercator (projection Transverse universelle de Mercator)

WGS 84 : World Geodetic System 84 (système géodésique mondial 84)

Y : pertes en sols

Résumé

Le bassin versant Allal Al Fassi a la particularité d'être à la fois sous le climat méditerranéen à caractère instable et les perturbations océaniques humides, auxquels s'ajoutent les effets de l'altitude, la continentalité, la couverture végétale, la couverture pédologique et l'action de l'homme. A partir de ce constat, la principale contrainte à son développement et au bon fonctionnement de son infrastructure est la dynamique érosive intense. Pour évaluer celle-ci, il serait impératif de mener une étude pluridisciplinaire sur les processus de l'érosion, les facteurs causaux, les paramètres physico-chimiques et les variables biogéographiques. La géologie, la pédologie, le relief, le climat, l'occupation des sols, l'action anthropique et la vulnérabilité socioéconomique ont fait part de cette étude. Deux modèles (PAP/CAR et RUSLE) sont appliqués à cet égard en utilisant différentes technologies de la géographie numérique et de la télédétection. Les résultats sont soumis à une analyse statistique multivariée (corrélation de Pearson r, régression linéaire R^2 simple et multiple et Analyse en Composantes Principales ACP). Le bassin versant M'Dez inclus dans le bassin versant Allal Al Fassi a été traité de la même façon pour bien saisir l'effet de la construction du barrage sur la retenue Allal Al Fassi en aval. 30 % de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi présente une susceptibilité au risque de l'érosion hydrique élevée à très élevée et 54.6% de la superficie présente des tendances à l'expansion ou à l'intensification de l'érosion localisée. Par contre, les degrés du risque de l'érosion fort à très fort ne représentent que 11,24% et correspondent à une susceptibilité et une vulnérabilité fortes à très fortes. Les pertes en sols annuelles moyennes sont estimées à 624,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$, avec un intervalle très large qui varie entre 3,57 et 3521,07 $t.ha^{-1}$.an-1 et une médiane égale à 335,48 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. En amont et principalement à l'Est, les pertes en sols sont plus importantes à cause des pentes fortes et longues et les sols fortement érodibles avec peu ou pas d'aménagements en dépit de la conservation très variable et de l'érosivité très faible à faible. Par contre, les pertes en sols sont faibles dans les zones à érosivité, longueur et degré des pentes et érodibilité faibles à très faibles, à pratiques antiérosives faibles et à conservation des sols forte. L'analyse statistique des résultats combinés de l'érodibilité K, des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, densité et pourcentages des argiles, des silts, des sables, de $CaCO_3$ et de matière organique) et des variables biogéographiques des sols (pente, pédologie, lithologie et occupation des sols) a montré que l'érodibilité K augmente avec le pourcentage de la fraction silteuse et inversement avec le pourcentage de la matière organique. Elle est faible pour les sols structurés et évolués (vertisols, sesquioxydes et calcimagnésiques) et élevée pour les sols moins structurés et remaniés (sols à minéraux bruts,

sols peu évolués et complexes C2 et C3). Elle est relativement faible sur les sols sous matorrals et importante sur les sols sous steppes et sols agricoles et non cultivés. L'analyse statistique multivariée a permis de démontrer aussi que l'état érosif (PAP/CAR) s'aggrave avec l'augmentation de la raideur des pentes et la diminution de la protection des sols et que les pertes en sols (RUSLE) sont régies par le degré et la longueur des pentes LS, l'érodibilité K et les pratiques antiérosives P. Les pourcentages de la matière organique, de sables et de silts possèdent une incidence significative sur la variation des pertes en sols qui s'avèrent importantes pour les sols de types complexe C1 et minéraux bruts, les sols sur terrains à substrat dolomitique et les sols occupés par les matorrals et les steppes. En ce qui concerne le bassin versant M'Dez, plus de la moitié de sa superficie (59,5%) est vulnérable à l'érosion (états érosifs notables, élevés et très élevés). Les processus d'érosion y sont diversifiés, dominés par le décapage superficiel (76,8% de la superficie). Les zones à rigoles et ravins superficiels occupent 11,2% de la superficie. 55,36% de la superficie présente des tendances à l'expansion ou l'intensification localisées. Les pertes en sols qui sont estimées à 596,08 t.h-1.an-1 de moyenne, sont fortes à très fortes dans 13,14% de la superficie où les sols sont fortement érodibles à forts degré et longueur de pente et avec peu ou pas d'aménagements. Enfin il s'avère très important de mener une opération de grande vigueur pour instaurer les différents aménagements antiérosifs dans le bassin versant M'Dez, pourvoyeur principal des sédiments vers les deux retenues Allal Al Fassi et M'Dez.

MOTS CLES : Géodynamique de surface ; Bassin versant Allal Al Fassi ; Erosion hydrique ; Facteurs causaux ; Modèles PAP/CAR et RUSLE ; Susceptibilité et tendance de l'érosion ; Vulnérabilité ; Pertes en sols, Bassin versant M'Dez ; Statistiques multivariées ; Moyen Atlas ; Maroc ; Méditerranée.

Abstract

Allal Al Fassi watershed has the particularity of being both under the unstable Mediterranean climate and wet oceanic disturbances, to which are added the effects of altitude, continentality, plant cover, soil cover and the action of man. From this observation, the main constraint to its development and to the proper functioning of its infrastructure is the intense erosive dynamic. To assess this, it would be imperative to conduct a multidisciplinary study on erosion processes, causal factors, physicochemical parameters and biogeographic variables. Geology, pedology, relief, climate, land use, human action and socioeconomic vulnerability were part of this study. Two models (PAP / RAC and RUSLE) are applied in this regard using different technologies of digital geography and remote sensing. The results are subjected to multivariate statistical analysis (Pearson's correlation coefficient r, single and multiple linear regression R^2 and PCA Principal Component Analysis). The M'Dez watershed included in Allal Al Fassi watershed was treated similarly to capture the effect of the construction of the dam on Allal Al Fassi restraint downstream. 30% of the area of Allal Al Fassi watershed has high to very high susceptibility to the risk of water erosion and 54.6% of the area shows tendency to expansion or localized intensification. On the other hand, the degrees of risk of high to very high erosion represent only 11.24% and correspond to high to very high susceptibility and vulnerability. Average annual soil losses are estimated at 624.07 $t.h^{-1}. y^{-1}$, with a very wide interval varying between 3.57 and 3521.07 $t. ha^{-1}. y^{-1}$ and a median equal to 335.48 $t. ha^{-1}. y^{-1}$. Upstream and mainly to the east, soil losses are greater because of the steep and long slopes and the highly erodible soils with little or no development despite the very variable conservation and very low erosivity at low. On the other hand, soil losses are low in areas with low to very low erosivity, slope length and steepness and erodibility, weak soil conservation practices and high cover management. Statistical analysis of the combined results of K erodibility, physico-chemical parameters (pH, conductivity, density and percentages of clays, silts, sands, $CaCO_3$ and organic matter) and biogeographic variables of soils (slope, pedology, lithology and land use) has shown that the K erodibility increases with the percentage of the silty fraction and conversely with the percentage of organic matter. It is low for structured and evolved soils (Vertisols, Alfisols and Mollisols) and high for less structured and disturbed soils (Entisols, Undeveloped minerals and C2 and C3 complex soils). It is relatively low on under matorrals soils and high on soils under steppes and agricultural and non-cultivated soils. The multivariate statistical analysis also made it possible to demonstrate that the erosion status (PAP / RAC) worsens with

the increase in the steepness of the slopes and the decrease in soil protection and that soil losses (RUSLE) are governed by the slope length and steepness LS, erodibility K and the soil conservation practices P. The percentages of organic matter, sands and silts have a significant impact on the variation in soil losses which are important for soils of complex C1 types and Entisols, soils on dolomitic substrate and soils occupied by matorrals and steppes. Regarding the M'Dez watershed, more than half of its area (59.5%) is vulnerable to erosion (appreciable, high and very high erosion status). The erosion processes are diverse, dominated by sheet erosion generalized with soil profile removal (76.8% of the area). The shallow gullies and ravines occupy 11.2% of the surface area. 55.36% of the area shows tendency to expansion or localized intensification. Soil losses, which are estimated at 596.08 t. h^{-1}. y^{-1} on average, are high to very high in 13.14% of the area where the soils are highly erodible at high slope length and steepness and with little or no soil conservation practices. Finally, it is very important to carry out a very vigorous operation to establish the various soil conservation practices in the M'Dez watershed, the main supplier of sediments to the two restraints Allal Al Fassi and M'Dez.

KEY WORDS: Surface geodynamics; Allal Al Fassi watershed; Water erosion; Causal factors; PAP / RAC and RUSLE models; Susceptibility and tendency of erosion; Vulnerability; Soil losses, M'Dez watershed; Multivariate statistics; Middle Atlas; Morocco; Mediterranean.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La dégradation des sols détruisant leur productivité, constitue un problème majeur quant à l'avenir de notre planète de plus en plus anthropisée, notamment dans les pays en développement. Le phénomène de l'érosion hydrique, longtemps considéré comme local, fait désormais partie des problèmes planétaires. Il est à la fois naturel et anthropique. La diminution graduelle des ressources en sols, conséquence de cette destruction, a été à l'origine du déclin des civilisations historiques *(Robinson, 1977)*. Sachant que les pertes annuelles mondiales en sols sont estimées à 35,9 milliards de tonnes pour l'année 2012 *(Borrelli et al., 2017 ; Schmidt et al., 2019)*, la région méditerranéenne est particulièrement sujette à l'érosion des sols de par son climat. Elle est soumise à de longues périodes sèches suivies de fortes pluies érosives, sur des pentes abruptes et des sols peu évolués et fragiles. Dans certaines parties de la région méditerranéenne, l'érosion a atteint un stade irréversible et dans d'autres, il ne reste plus de sol *(Karydas et al., 2009)*. L'érosion des sols est l'un des principaux problèmes environnementaux qui affecte la durabilité des systèmes agro-forestiers méditerranéens *(García-Ruiz, 2010 ; Arnaez et al., 2011 ; Almagro et al., 2016)*. Dans ce contexte s'inscrit notre sujet de recherche qui tente, dans un premier temps, de fournir des éléments nécessaires pour une meilleure compréhension de la géodynamique de surface du bassin versant Allal Al Fassi et ses enjeux. Le sol, étant l'épiderme de la terre, est en perpétuel contact direct avec les agents atmosphériques et biologiques et les diverses actions anthropiques. Il est clair que sa dégradation est en rapport avec sa nature constituée de matériau meuble, squelette, plasma et organismes vivants. L'intensité de l'érosion hydrique, productrice de sédiments, est sous l'influence des caractéristiques des facteurs des bassins versants tels la lithologie *(Dietrich et Dune, 1978)*, le relief *(Meade et al., 1990a ; Milliman et Syvitski, 1992)*, le climat et la végétation *(Martins, 1988)*. La variation et l'interaction de ces facteurs causaux affectent le patrimoine pédologique en entrainant souvent de graves conséquences sur le plan socio-économique et écologique. Cet effet se traduit par le décapage de la couche organominérale des sols entrainant une baisse notable de leur fertilité *(Guerra et al., 2016 ; Panagos et al., 2016)* et un enrichissement des retenues de barrages en apports sédimentaires, en aval, suivi d'une réduction progressive de leur volume utile aboutissant souvent au comblement et à leur mort. Les apports sédimentaires y cumulés peuvent avoir également un impact sur la qualité de l'eau, principalement lorsqu'ils sont chargés en nutriments provoquant l'eutrophisation *(Didon et al., 1973 ; Forsberg, 1989 ; Jigorel et Morin, 1994)*, sur la biodiversité et sur le colmatage du lit de l'oued en aval du barrage pendant les vidanges *(Poirel et al., 1994 ; Merle et al., 1996)*.

Au Maroc, la protection des bassins versants à travers la lutte contre l'érosion hydrique est alors devenue l'une des priorités du Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification *(HCEFLCD, 2010)*. Ce dernier a mis 1,5 million d'hectares comme tranche prioritaire et urgente à traiter à l'horizon 2020, dont le bassin versant Allal Al Fassi en amont de la retenue du barrage. Depuis sa construction sur le cours supérieur de l'Oued Sebou et dans un bassin versant à contexte climatique allant du semi-aride à l'humide, sous influence des crues d'orages, la retenue du barrage Allal Al Fassi n'a cessé de subir l'effet combiné de la nature et des activités humaines. En optant la problématique à laquelle est soumis le bassin versant Allal Al Fassi, l'objectif est de déterminer les facteurs causaux responsables de l'érosion hydrique et leurs interactions afin d'avoir une visibilité sur le taux d'envasement de la retenue, de développer des mesures de contrôle pour éviter d'éventuelles dégradations et d'estimer avec précision les pertes en sols *(Boardman et Poesen, 2006)*. Les informations spatiales, tant qualitatives que quantitatives, contribuent de manière significative à la gestion de la conservation des sols, au contrôle de l'érosion et à l'aménagement du bassin versant *(Prasannakumar et al., 2011)*.

Plusieurs méthodes de modélisation basées sur les représentations mathématiques des processus érosifs, appliquées à des zones géographiques restreintes, notamment à l'échelle d'une parcelle ou d'un sous bassin versant, nécessitent de nombreuses mesures de terrain tel que le modèle SWAT « Soil and Water Assessment Tool » *(Arnold et al., 1995)*.

L'objectif n'est pas seulement de quantifier les pertes en sols mais aussi de définir les facteurs contrôlant le risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi moyennant une étude statistique multivariée. A ce propos, deux modèles ont été choisis, le premier est probabiliste par la méthode PAP/CAR (Centre d'Activités Régionales du Programme d'Actions Prioritaires), visant à définir les tendances de l'érosion et l'érosion potentielle. Il s'agit d'un ensemble de directives pour la formulation d'un programme de lutte antiérosive dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qui permet de cartographier l'érosion. Cette méthode se base sur un ensemble de facteurs naturels qui conditionnent le régime érosif : facteurs invariants comme la lithologie et la topographie et facteurs variants comme la densité de la couverture végétale et l'occupation des sols. Le deuxième est mathématique par la version révisée de l'Equation Universelle des Pertes en Sols (USLE) *(Wischmeier et Smith, 1978)*) RUSLE *(Renard et al., 1997)*. Appliqué largement à toutes les échelles *(Napoli et al., 2016)*, *(Jinkuo et al., 2020 ; El Kamel et al., 2020a ; Mahoney et al., 2021)*, le modèle RUSLE avec

un minimum de données-sources, permet d'apporter une estimation des pertes en sols et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion en nappe, sans prendre en considération la dynamique des matières terrigènes. Il permet de quantifier l'érosion hydrique en tonnes par hectare par an et intègre cinq facteurs associés au climat, au sol, à la topographie, à la végétation et à la gestion, à savoir l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité (K), la longueur et degré de pente (LS), la conservation des sols (C) et les pratiques antiérosives (P). L'équation universelle des pertes en sols révisée (RUSLE) est le modèle le plus largement utilisé et accepté pour la quantification des pertes en sols *(Renard et al., 1997 ; Alexakis et al., 2013)*.

Les deux modèles ont été choisis pour leurs données parcimonieuses et leur compatibilité avec les technologies de télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) *(Chen et al., 2017)* pour établir le diagnostic de l'état de l'érosion de point de vue qualitatif et quantitatif. Les SIG par leurs outils de traitement et d'exploitation des données et la télédétection par sa capacité à fournir et traiter des images multispectrales et multidates, permettent de donner une vue d'ensemble sur une grande échelle en réduisant les coûts des investigations de terrain et d'élaborer des cartes délimitant les zones subissant l'érosion *(Kheir et al., 2001)*. Les outils de la télédétection ont permis d'évaluer, à l'aide des images satellitaires, la carte d'occupation des sols, du couvert végétal et aussi l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal à travers les deux indices de végétation NDVI et SAVI. La combinaison des modèles de l'évaluation de l'érosion avec les outils des systèmes d'information géographique (ArcGIS) permet de spatialiser les tendances de l'érosion, l'érosion potentielle et les pertes en sols avec précision sur les zones étendues *(Willward et Mersey, 1999 ; Lu et al., 2004 ; Jasrotia et Singh, 2006)* et contribue significativement à la gestion de la conservation des sols, au contrôle de l'érosion et à la gestion générale du bassin versant *(Prasannakumar et al., 2011)*. Les paramètres physico-chimiques et les variables biogéographiques des sols sont intégrés dans la compréhension de la variation de l'érodibilité (K), calculée par le biais de l'équation universelle des pertes en sols révisée (RUSLE) *(Renard et al., 1997)*. L'ensemble est soumis à une analyse statistique multivariée pour comprendre les combinaisons et les interactions entre les différents facteurs causaux, paramètres physicochimiques et variables biogéographiques dans le processus de l'érodibilité. Le bassin versant M'Dez en amont de son barrage en cours de construction, inclus dans le bassin versant Allal Al Fassi, fait partie intégrante de cette étude. La retenue du barrage M'Dez aura d'importantes retombées socio-économiques, environnementales et écologiques, notamment vis-à-vis de la retenue Allal Al Fassi. Sachant que celle-ci a subi l'effet combiné de la nature et des activités humaines, le barrage M'Dez

pourrait être une solution pour diminuer le taux d'envasement de sa retenue et assurer sa pérennité.

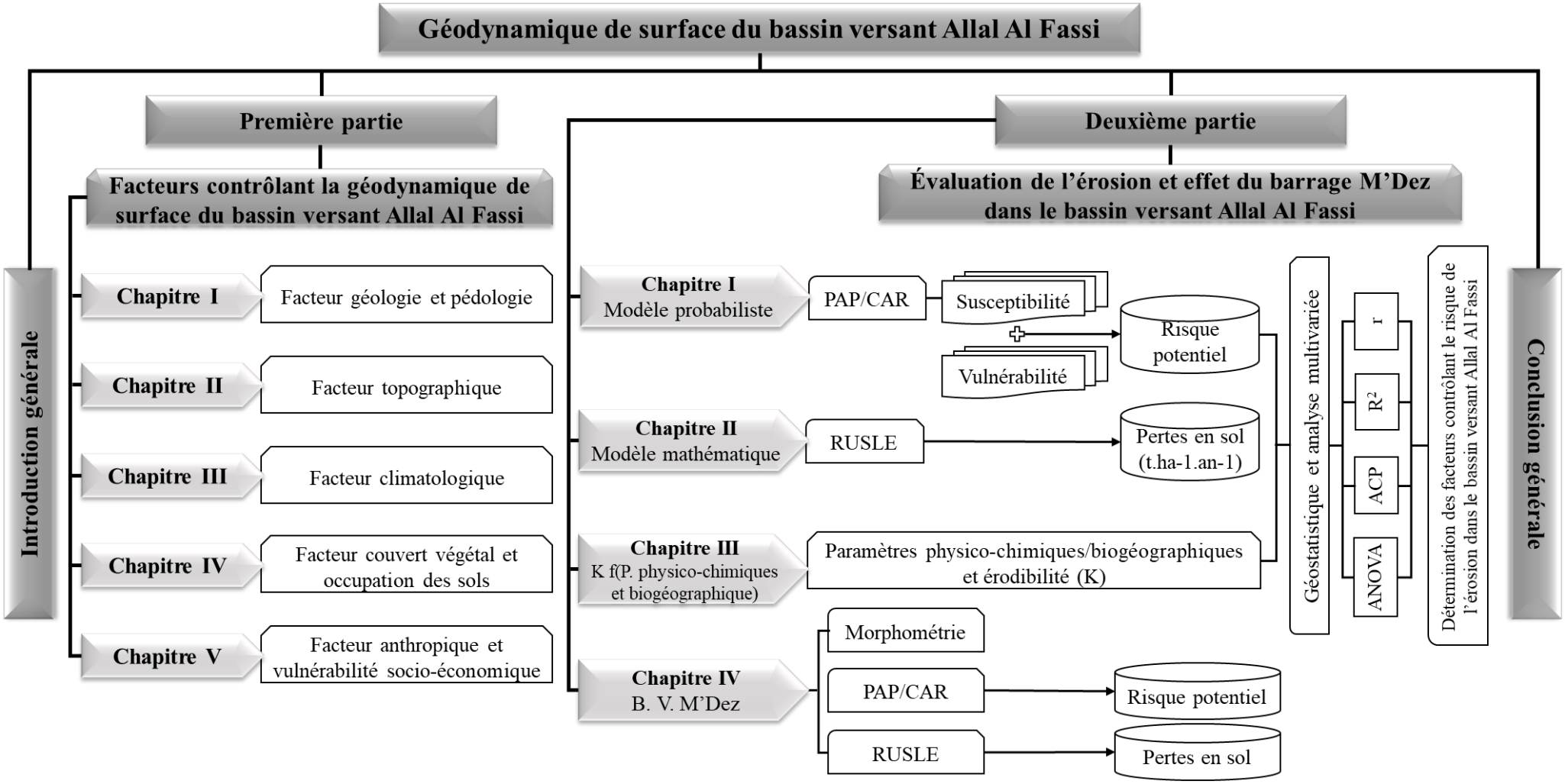
Les stratégies élaborées pour réduire l'ampleur des phénomènes d'érosion des sols et de leurs impacts, s'appuient essentiellement sur la connaissance des processus locaux. En effet, en dehors des territoires agricoles et des coulées boueuses, de nombreuses conséquences importantes sur les activités humaines se manifestent. Les plus notables concernent la dégradation des biens (privés et publics), l'augmentation des risques d'accidents sur les routes, le comblement des réseaux et des ouvrages de protection contre les inondations, la pollution des nappes phréatiques (notamment en région karstique), le transfert de produits phytosanitaires dissouts ou associés aux matières en suspension et les coûts importants de nettoyage et de curage. Ainsi le phénomène d'érosion hydrique, n'est pas seulement une question d'environnement ou un problème technique, mais aussi un risque pour les personnes et les biens, un enjeu agricole, un enjeu pour l'eau potable et un enjeu économique important.

La mise au point des stratégies permettant de lutter contre ce phénomène demande la compréhension de la géodynamique de surface du bassin versant en tant que système qui permettrait de traiter le problème dans sa globalité afin de mieux adapter des stratégies réparatrices et préventives. La réponse à toutes les questions déjà mentionnées concernant la dynamique spatiale et temporelle du processus de l'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi, chacun des facteurs causaux fait l'objet d'un chapitre de la première partie de ce travail.

Quant à la deuxième partie, elle est répartie en quatre chapitres, les deux premiers traitent les deux modèles d'évaluation de l'érosion, qualitative dans le premier et quantitative dans le deuxième. Le troisième chapitre explique l'érodibilité en fonction des paramètres physico-chimiques et des variables biogéographiques. Le quatrième traite l'érosion dans le bassin versant M'Dez (Architecture de la thèse).

La validation des résultats obtenus nécessite la mesure du taux sédimentaire dans la retenue, la susceptibilité magnétique des sédiments ou la mesure de l'érosion par traceurs radioactifs *(Ait Fora, 1995)*. Dans le cas du bassin versant Allal Al Fassi, le modèle physique est adopté pour traçage de l'érosion par Césium ^{137}Cs, et 150 échantillons représentatifs sont préparés dans l'attente d'une confirmation pour analyse.

ARCHITECTURE DE LA THESE



Première partie

Facteurs contrôlant la géodynamique de surface du bassin versant ***Allal Al Fassi***

CHAPITRE I

Facteur géologie et pédologie

▪ Chapitre I : Facteur géologie et pédologie

Après construction du barrage sur le cours supérieur de l'Oued Sebou, le bassin versant Allal Al Fassi est devenu un des sous bassins versant de l'Oued Sebou et recouvre les provinces de Boulemane, Sefrou, Taza et Ifrane sur une superficie de 5352 km^2 (Figure 1).

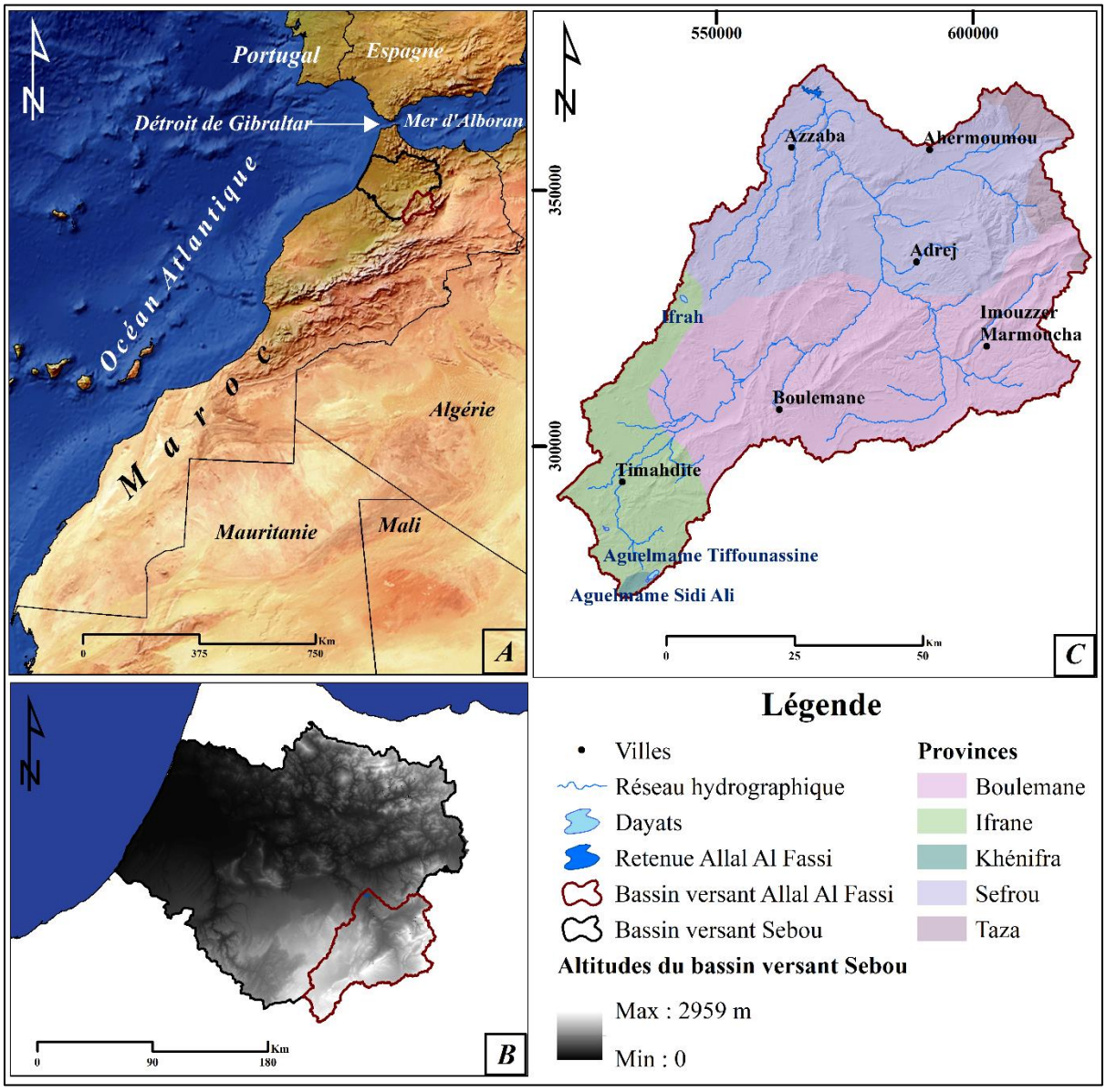


Figure 1: A-Situation géographique du bassin versant Allal Al Fassi au Maroc. B-Bassin versant Sebou. C-Bassin versant Allal Fassi

Il se situe entièrement dans le domaine moyen atlasique. Les formations géologiques y sont diversifiées, d'âge allant du Paléozoïque jusqu'au Quaternaire avec prédominance de calcaires et dolomies du Lias *(Charrière, 1990 ; Sabaoui, 1998)*. Il est considéré comme une zone d'altitude, 88% de sa superficie totale a une altitude supérieure à 1000 m, une altitude

moyenne de 1549 m, un sommet à 2959 m et un exutoire à 344 m. Il est caractérisé par une prédominance de pentes faibles à moyennes, environ 84% de sa totalité est caractérisé par une pente inférieure à 14 %. Son indice de compacité de 1.77 montre qu'il est bien drainé. Il est drainé par l'Oued Guigou, l'Oued Zeloul et l'Oued Maasser, qui sont ses principaux cours d'eau à écoulement pérenne grâce aux apports en eau des sources telles Ain Sebou, Ain Timedrine et Ain Ouender. Plusieurs étages bioclimatiques coexistent dans le bassin versant Allal Al Fassi allant de l'humide à hiver froid au semi-aride et comportent une diversité importante en espèces végétales, constituée essentiellement de chêne vert (*Quercus rotundifolia*), de thuya (*Tetraclinisarticulata), de* genévrier rouge (*Juniperusphoenicea*), de cèdre de l'Atlas (*Cedrusatlantica*) et de pin d'alep (*Pinus halepensis*) *(HCEFLCD, 2010)*.

Le facteur géologique relatif aux roches de surface est l'un des facteurs importants dans le processus de l'érosion hydrique. Les roches en surface et à degrés variables sont susceptibles à la météorisation par les agents atmosphériques. Les glissements de terrains, les chutes de roches au bord des falaises, les coulées de débris et les avalanches dures à la rupture des roches et à plus faible compacité peuvent favoriser l'érosion hydrique.

La vulnérabilité des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique dépend principalement de leur état de l'évolution pédologique manifesté par le degré d'équilibre de leurs textures et le degré d'agencement de leurs constituant en structures.

I. Cadre géologique

Le Maroc constitue une zone de transition entre le domaine méditerranéen au Nord et le craton africain au Sud. Sa configuration actuelle résulte de plusieurs cycles orogéniques qui se sont succédés au cours des temps géologiques : cycles précambriens, hercynien et alpin *(Sabaoui, 1998)*. Trois domaines structuraux majeurs sont habituellement distingués *(Choubert et Marçais, 1952)* : le domaine de l'Anti-Atlas, le domaine atlasique et mesetien et le domaine rifain. Le bassin versant Allal Al Fassi se situe entièrement dans le domaine moyen atlasique.

Le Moyen Atlas est une chaîne montagneuse intracontinentale orientée NE-SW *(Michard, 1976)* dont la majeure partie est constituée d'une couverture mésozoïque et de formations tertiaires *(Sabaoui, 1998)*. Ces affleurements reposent sur un substratum paléozoïque d'âge carbonifère *(Du Dresnay, 1988)*. Le socle paléozoïque affleure sous forme de boutonnières au SE de Séfrou et près d'Imouzzer du Kandar *(Lepoutre et al., 1967)*. Cette chaîne est délimitée par la plaine de Saïs et le front de la nappe rifaine au Nord et par le bassin

de Guercif au Nord-Est, les Hauts plateaux à l'Est, la Meseta côtière à l'Ouest et la dépression de la Moulouya au Sud et Sud-Est *(Michard, 1976)*.

Généralement, sa structure correspond à de larges cuvettes synclinales d'axes parallèles à la chaîne et de rides anticlinales étroites intrudées parfois de roches gabbroïques *(Fedan, 1988)*. Elle se divise, en deux domaines structuraux qui sont le Causse moyen atlasique au Nord-Ouest et le Moyen Atlas plissé au Sud-Est et auquel est rattaché le massif paléozoïque de Tazekka. Ils sont séparés par une ligne tectonique majeure appelée Accident Nord moyen-atlasique *(Colo, 1961)*. La bordure septentrionale de cet ensemble est orientée NE-SW et rejoint le Prérif au niveau du col de Touaher *(Dridri, 1987 ; Dridri, 2004)*.

Le bassin versant Allal Al Fassi, couvrant une bonne partie du Moyen Atlas, est allongé aux édifices montagneux et structuraux orientés NE-SW. Il est traversé longitudinalement par une ligne tectonique majeure appelée Accident Nord moyen-atlasique séparant le Causse (NW) du Moyen Atlas plissé (SE). Le Causse moyen atlasique est composé essentiellement de faciès carbonatés généralement lités et de structure subhorizontale, du Lias inférieur (dolomies) à moyen (calcaires). Le Moyen Atlas plissé est plus déformé et caractérisé par une succession de longues rides anticlinales et de larges gouttières synclinales *(Sabaoui, 1998)*. Les formations géologiques y sont diversifiées, d'âge allant du Paléozoïque jusqu'au Quaternaire avec prédominance de calcaires et dolomies du Lias *(Charrière, 1990 ; Sabaoui, 1998)*.

La carte géologique du bassin versant Allal Al Fassi réalisée en se basant sur la carte géologique du Maroc 1/1000 000 *(Bronner et al., 1985)*, montre une grande diversité de formations géologiques d'âge allant du Paléozoïque jusqu'au Quaternaire avec prédominance des faciès du Jurassique inférieur (39,29% de la superficie) et du Jurassique moyen (30,68% de la superficie), avec environ 70% de la superficie du bassin versant (Figure 2).

Le plus important affleurement paléozoïque dans la chaîne moyen-atlasique se trouve au niveau du massif de Tazekka. Il est situé dans l'extrémité nord-orientale de la bordure septentrionale du Moyen Atlas. Il constitue le prolongement, au Nord-Est, du substratum paléozoïque du panneau de l'oued Zra-el Menzel qui est limité au Nord-Ouest par l'Accident Nord moyen atlasique *(Sabaoui, 1998)*. Les affleurements paléozoïques n'affleurent que sous forme de boutonnières à extension limitée dans des gorges profondes creusées par des oueds du Moyen Atlas ou à la faveur d'accidents tectoniques.

Les terrains du Trias, dont l'extension est très réduite, sont en discordance angulaire sur les terrains paléozoïques. Ils affleurent sous formes de trois faciès : à la base trois membres gréso-

conglomératiques attribués au Trias moyen. Ces dépôts grossiers sont surmontés par des argiles gypso-salifères qui encadrent les basaltes doléritiques au milieu desquels peuvent s'intercaler un ou plusieurs niveaux sédimentaires. Les niveaux suprabasaltiques sont constitués de couches d'argilites ou de marnes rouges.

Dans le Causse moyen atlasique, les trois principaux faciès du Lias sont : les dolomies peu résistantes, les dolomies massives plus résistantes et les dolomies litées *(Sabaoui, 1998)*. Les couches du Lias inférieur et moyen couvrent la plus grande partie du Moyen Atlas central. Elles sous-tendent la quasi-totalité de la topographie du Causse. Elles sont parfois masquées par les épanchements basaltiques et des formations superficielles du Quaternaire. Dans le Moyen Atlas plissé, le Lias n'affleure que sur des surfaces plus réduites *(Fedan, 1988)*.

Après le Dogger et la lacune du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur, le Crétacé apparait surtout à l'Ouest de Boulemane avec un ensemble conglomératique, discordant sur le Jurassique, des marnes calcaires rouges et ensuite des marnes à gypse, des dépôts phosphatés et des schistes bitumineux *(Fedan, 1988)*.

Le Paléogène est représenté, à l'Ouest du méridien de Boulemane, par des dépôts variés *(Fedan, 1988)*. Le Paléogène inférieur et moyen, montre des dépôts argileux, gréseux et microconglomératiques ; l'Eocène inférieur et moyen montre des dépôts carbonatés et l'Eocène supérieur et l'Oligocène indiquent une succession de marnes à gypse à la base, des calcaires à silex à la partie moyenne et un complexe conglomératique au sommet.

Le principal affleurement du Miocène supérieur est celui du bassin néogène de Skoura. D'autres affleurements, dont l'extension est très réduite, apparaissent au niveau de l'Oud Zra et de Ribat Al Khir. Les premiers dépôts sont de nature d'abord continentale ensuite laguno-lacustre à laguno-marin. Il s'agit de calcaire lacustre à intercalations volcaniques, de grès et de marnes à gypse. La série se continue par des faciès marins dans lesquels se sont succédés des dépôts de marnes gréseuses, de calcaires récifaux et enfin de marnes blanches à caractère régressif *(Charrière, 1990 ; Sabaoui, 1998)*.

Les terrains pliocènes et quaternaires, qui sont discordants sur le Miocène, sont très peu développés dans le Moyen Atlas. La plus ancienne de ces formations est celle des poudingues de Skoura *(Termier, 1936)* qui affleurent au Sud et Sud-Est de Tazouta *(Martin, 1981 ; Charrière,1991)*.

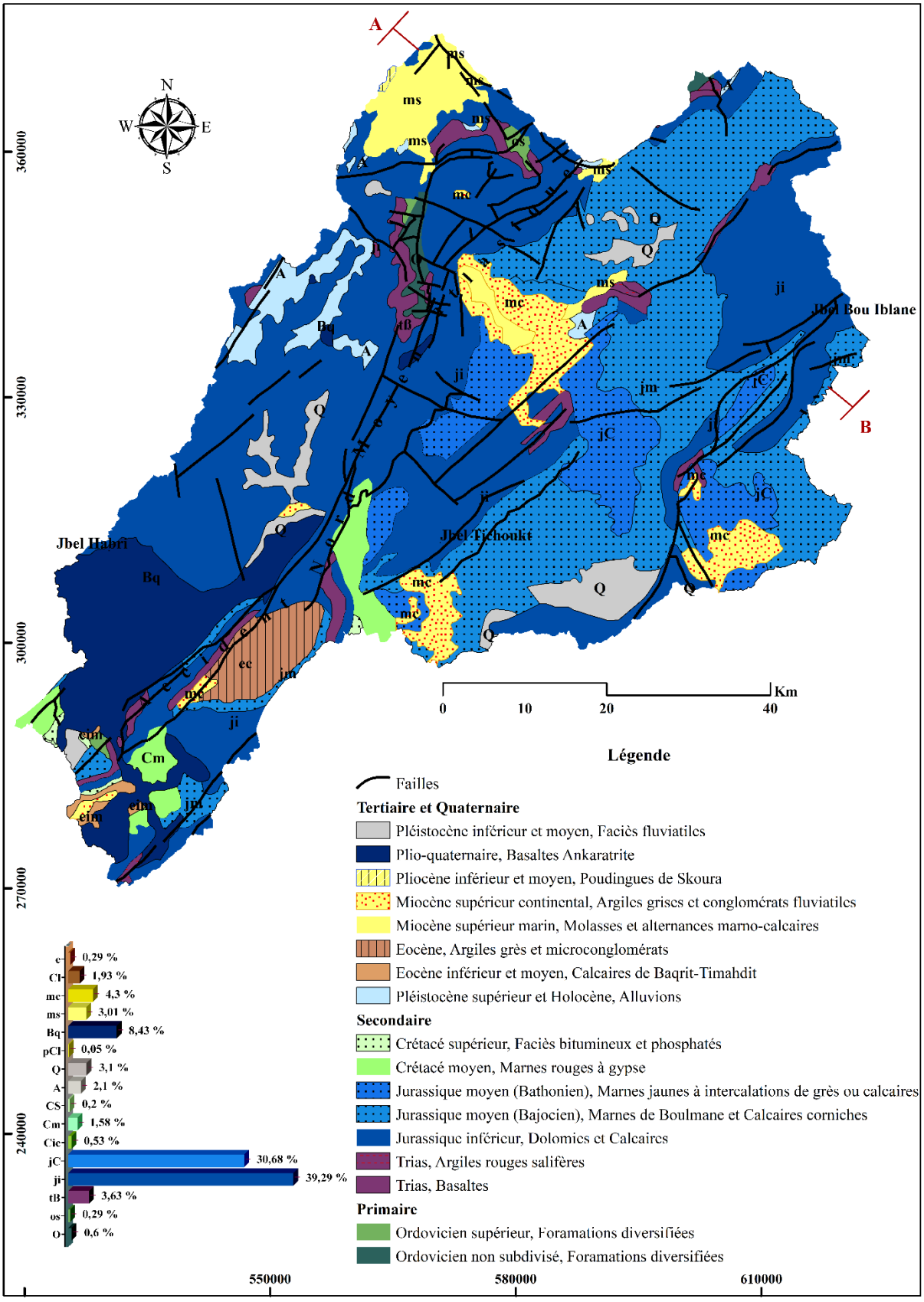


Figure 2: Carte géologique du bassin versant Allal Al Fassi (Bronner et al. 1985 ; Sabaoui, 1998 ; Martin, 1981, modifiée)

D’autres formations quaternaires notamment les terrasses alluviales, des épandages d’éboulis et des cônes de déjection ont été cartographiés par différents auteurs *(Beaudet et Ruellan, 1971 ; Martin, 1981 ; Fedan, 1988 ; Charrière, 1991 ; Sabaoui, 1998 ; Baali, 1998)*. Le Moyen Atlas a connu aussi une importante activité volcanique *(Moukadiri, 1983 ; Harmand et Moukadiri, 1986)*.

Le Quaternaire est caractérisé par une intense karstification liée à des phases tectoniques et par des formations de travertins, d'encroûtement et de croûtes calcaires. Les formes courantes de karstification sont représentées par le réseau de vallées sèches, dolines, ouvalas, poljés les cuvettes fermées à fond plat colmatées par des dépôts argilo-silteux, occupées souvent par des dayats temporaires ou permanentes (Dayat Aoua, Dayat Ifrah) *(Baali, 1998, Dridri, 2004)*.

I.1. Lithostratigraphie

I.2.1. Soubassement paléozoïque

A la faveur d’accidents tectoniques ou d’un défoncement accusé des couches triasiques, les séries paléozoïques sont mises en affleurement. Elles apparaissent sous forme de larges affleurements de schistes dans la boutonnière de Bsabis, de quartzites au niveau de la bordure nord du causse de Sefrou *(Martin, 1981)*. Elles affleurent aussi sous forme de schistes de grès et de pélites d’âge ordovicien, localisés surtout dans la vallée de l'Oued Sebou, Oued Azzaba, El Adrej, Ribat El Khir et en rive gauche de l'Oued Sebou dans la boutonnière de Bsabis *(Sabaoui, 1998)* (Figure 3). Ces séries ont été déformées pendant l'orogenèse hercynienne et suivie par une pénéplanation totale.

I.2.2. Trias

Le substratum hercynien est surmonté, en discordance angulaire majeure, par des séries, successivement, détritiques et argileuses azoïques, basaltiques doléritiques et argilo-salifères *(Sabaoui, 1998)*. Les séries détritiques, décrites par Sabaoui *(1998)* en trois membres gréso-conglomératiques, sont attribuées au Trias moyen à supérieur. Leur dépôt est lié au jeu des branches des Accidents Nord-moyen-atlasique et Médian-moyen-atlasique. Ces séries sont surmontées par des argiles gypso-salifères qui encadrent les basaltes doléritiques. Le dépôt de ces argiles gypso-salifères est lié à une paléogéographie continentale, lacustre et lagunaire. Les épanchements volcaniques (basaltes doléritiques) correspondent à de nombreux épisodes séparés des périodes de rémission matérialisés par différents niveaux sédimentaires qui se superposent dans le temps et peuvent disparaitre latéralement.

Au niveau du bassin versant Allal Al Fassi, il affleure sous forme d'argilites rouges souvent gypsifères et salifères et de basaltes doléritiques brunâtres et verdâtres. Il est représenté dans la vallée encaissée de l'Oued Sebou à l'Ouest d'Azzaba, dans la cuvette d'El Menzel, dans le versant nord d'El Adrej et dans le secteur de Tazouta (Figure 3).

I.2.3. Jurassique

Les séries sédimentaires jurassiques sont subdivisées en trois grands ensembles successifs :

- l'ensemble inférieur carbonaté du Lias inférieur et moyen ;
- l'ensemble moyen marneux et marno-calcaire du Toarcien au Bajocien ;
- l'ensemble supérieur terrigène du Bajocien supérieur au Callovien.

I.2.3.1. Dolomies et calcaires du Lias

Dans le bassin versant Allal Al Fassi, le Lias inférieur et moyen couvre des surfaces étendues des causses de Sefrou, d'El Menzel et apparait le long des failles tectoniques et le long des anticlinaux où il forme leur ossature. Le Lias supérieur est surtout caractérisé par un faciès marneux avec des passées calcaires.

Les couches du Lias inférieur et moyen, couvrant une grande partie du Moyen Atlas, sont représentées par des roches carbonatées, dolomies, calcaires dolomitiques et calcaires.

- **Dolomies du Lias inférieur**

Les couches dolomitiques du Lias inférieur reposent en concordance sur les formations triasiques *(Colo, 1961)*. Elles occupent sans partage le causse de Sefrou, dominent le causse d'El Menzel et forment l'ossature des anticlinaux de la région de Jbel Tichoukt.

Ces dolomies azoïques et tectonisées, ont subi différents types d'altération. Cinq faciès dolomitiques sont définis et reconnus *(Baali, 1998)* :

- le faciès grenu est massif et non altéré. La roche est organisée en blancs pluridécimétriques à métriques. Il s'agit d'une dolomie gris-blanchâtre à grains jointifs dont la taille moyenne est de 0.5 mm. La rubéfaction superficielle de ce faciès a développé des argiles et des oxydes de fer ;
- le faciès meuble, est composé de fragments polyédriques ayant 5 à 6 cm de diamètre. Ce faciès est très développé le long des zones tectonisées où le broyage est intense ;

- le faciès « fausse brèche » : localisé au niveau des failles. Ce faciès, classique des dolomies *(Colo, 1952)*, est constitué d'éléments anguleux jointifs ayant quelques centimètres à quelques décimètres de diamètre. Le ciment, lorsqu'il existe, est représenté par des carbonates jaune à rougeâtre, riche en oxydes de fer ;
- le faciès sableux est composé de boules dolomitiques qui sont emballées dans une arène à grains dolomitiques blanchâtre.
- le faciès caverneux : au sein des dolomies cohérentes, apparaissent des cavités décimétriques qui attestent d'une dissolution météorique superficielle.

- **Calcaires du Lias moyen**

Les calcaires du Lias moyen sont très fossilifères et occupent des surfaces moindres que les dolomies du Lias inférieur. La stratigraphie du Lias moyen se présente de bas en haut comme suit (Figure 3) :

- gros bancs de calcaires à silex à la base ;
- dolomies intercalaires : dolomies litées, des dolomies pures aux calcaires francs peu épais, en passant par des calcaires dolomitiques ;
- calcaires épais constitués de lits minces, séparés par des interlits marneux au sommet.

Cette superposition n'est pas généralisée sur toute la chaîne, mais observée dans l'ensemble des causses avec quelques nuances ; en revanche le Lias moyen, de quelques anticlinaux, présente des séries calcaires en bancs très épais dessinant leurs flancs de gros chevrons (anticlinal de Tichoukt).

- **Faciès exceptionnels du Lias**

Les récifs dolomitisés du causse de Guigou représentent un faciès exceptionnel sous forme de collines arrondies en forme de grandes taupinières dont certaines atteignent 100 m de hauteur. Leur couleur et l'absence de stratification expliquent le contraste avec les zébrures des calcaires domériens qui les entourent *(Martin, 1981)*.

I.2.3.2. Contraste lithologique du Dogger

- **Marne de Boulemane et calcaire corniche**

Ils se présentent sous forme de séquence caractérisée par une grande épaisseur de roches tendres (marnes et marno-calcaires) dégagées par l'érosion en dépressions monoclinales entre les formations du Domérien à la base et le Bajocien supérieur au sommet *(Martin, 1981)*. Les

marnes grises ou gris-bleu peuvent atteindre 300m d'épaisseur et sont surmontées par des marno-calcaires d'âge Bajocien *(Termier, 1936 ; Sabaoui, 1998)*.

- **Série bathonienne du Nord-Est**

Le Jbel Tichoukt est flanqué par deux grands synclinaux : le synclinal de Guigou au Nord et le synclinal d'El Mers au Sud dont l'âge peut atteindre la fin du Bathonien. Les formations d'El Mers 1 et 2, d'âge bathonien, varient en épaisseur de 30m à 200m et constituées de marnes jaunes parfois versicolores à intercalations de grès ou de calcaires quartzeux. Elles surmontent localement en discordance angulaire les formations sous-jacentes *(Du Dresnay, 1988 ; Charrière, 1990 ; Sabaoui, 1998)*. La formation de Skoura est formée de marnes à gypses entrecoupées de bancs de grès et de niveaux noduleux. Elle est attribuée au Bathonien moyen à Callovien moyen.

I.2.4. Crétacé

Contrairement aux formations jurassiques, la répartition des formations crétacées est strictement limitée aux aires synclinales du Moyen Atlas plissé et à la bordure des plaines de la Moulouya. Les premières formations crétacées sont attribuées au Crétacé moyen. Elles reposent en discordance angulaire sur les différents termes du Jurassique inférieur et moyen. Les affleurements du Crétacé sont représentés par des marnes rouges à gypse que couronnent des calcaires noduleux blancs à ammonites et à faune benthique variée. Ils sont épais à Tighboula et Bakrit-Timahdit-Guigou et attribués au Turonien supérieur-Sénonien inférieur. Le Campanien et le Maestrichtien sont marqués par l'apparition des faciès bitumineux et phosphatés *(Sabaoui, 1998)*. Les affleurements du Crétacé reconnus au Sud d'Imouzzer Marmoucha *(Fedan, 1984)* sont représentés par une alternance marno-calcaire d'âge Cénomano-Turonien *(Sabaoui, 1998)* (Figure 3).

I.2.5. Paléogène

Les affleurements paléogènes sont exclusivement rencontrés à l'Ouest du méridien de Boulemane. Ils sont représentés par une série de dépôts argileux, gréseux et microconglomératiques, traduisant l'installation du milieu fluviatile, des cordons dunaires et des lagunes. L'Eocène inférieur et moyen est représenté par les calcaires de Baqrit-Timahdit. L'Eocène supérieur et l'Oligocène sont représentés par une succession de marnes à gypse à la base, de calcaires à silex au milieu et d'un complexe conglomératique au sommet *(Sabaoui, 1998)*. Dans le synclinal de Tighboula, l'Eocène est marqué par une série marno-calcaire et de

marnes roses et blanches coiffée par une couche calcaire plus épaisse au-dessus affleurent des marnes rouges gypseuses minces recouvertes par des dalles calcaires à silex (Figure 3).

I.2.6. Miocène

Au niveau du bassin versant Allal Al Fassi, le Miocène est représenté par un faciès de molasse dans la vallée encaissée de l'Oued Sebou puis par des marnes grises ou bleues du Tortonien. Au pied du causse de Sefrou, le Miocène est représenté par des marnes sableuses et du grès. Il couvre aussi le couloir Pont Mdez- El Adrej, la région de Tazouta (marnes, grès et calcaires) et le secteur de l'Oued Maasser (microconglomérats et marnes).

Le Miocène supérieur affleure essentiellement dans le bassin de Zra et le bassin de Skoura *(Charrière, 1990)* qui font partie de la zone synclinale limitée au NW par l'Accident Nord moyen atlasique et au SE par l'Accident central moyen atlasique.

Les premiers dépôts sont constitués par les formations de l'Oued Zra et de l'Oued M'Dez, de nature argileuse au niveau de l'Oued Zra et conglomératiques au niveau de l'Oued M'Dez ; suivis par des alternances marno-calcaires blancs et crayeux au niveau de l'Oued Zra et par des grès, des marnes et des marnes gypseuses. Au niveau de Aghram Amellal et du col de Tazouta, le Tortonien supérieur et le Messinien sont représentés par des molasses, des calcaires récifaux, des grès et des calcaires gréseux et des marnes sableuses de couleur jaune à blanche. Cette dernière affleure aussi au niveau de Ribat Al Khayr *(Sabaoui, 1998)* (Figure 3).

I.2.7. Pliocène et Quaternaire

Les terrains pliocènes et quaternaires correspondent à des formations superficielles principalement d'origine continentale, discordantes sur le Miocène, et sont peu développés dans le Moyen Atlas. Plusieurs formations pliocènes et quaternaires sont développées dans la région de l'Adrej. Le Pliocène inférieur et moyen est représenté par les poudingues de Skoura. Du Pliocène supérieur au Quaternaire, plusieurs faciès variés sont différenciés, notamment les travertins, les encroûtements calcaires, les alluvions, les cônes de déjection, les épandages d'éboulis sur les versants, les éluvions des zones déprimées et les coulées basaltiques. Les travertins affleurent au niveau de l'Adrej, de Ribat Al Khayr et la terminaison NE de la ride de Tichoukt. Les terrasses alluviales correspondent à des épandages argilo-silteux emballant des blocs et galets au voisinage des vallées situées entre Ribat Al Khayr et Skoura. Le long et en bordure des Oueds Zloul et M'Dez, ainsi que leurs affluents, les alluvions constituent des terrasses étagées et parfois emboitées.

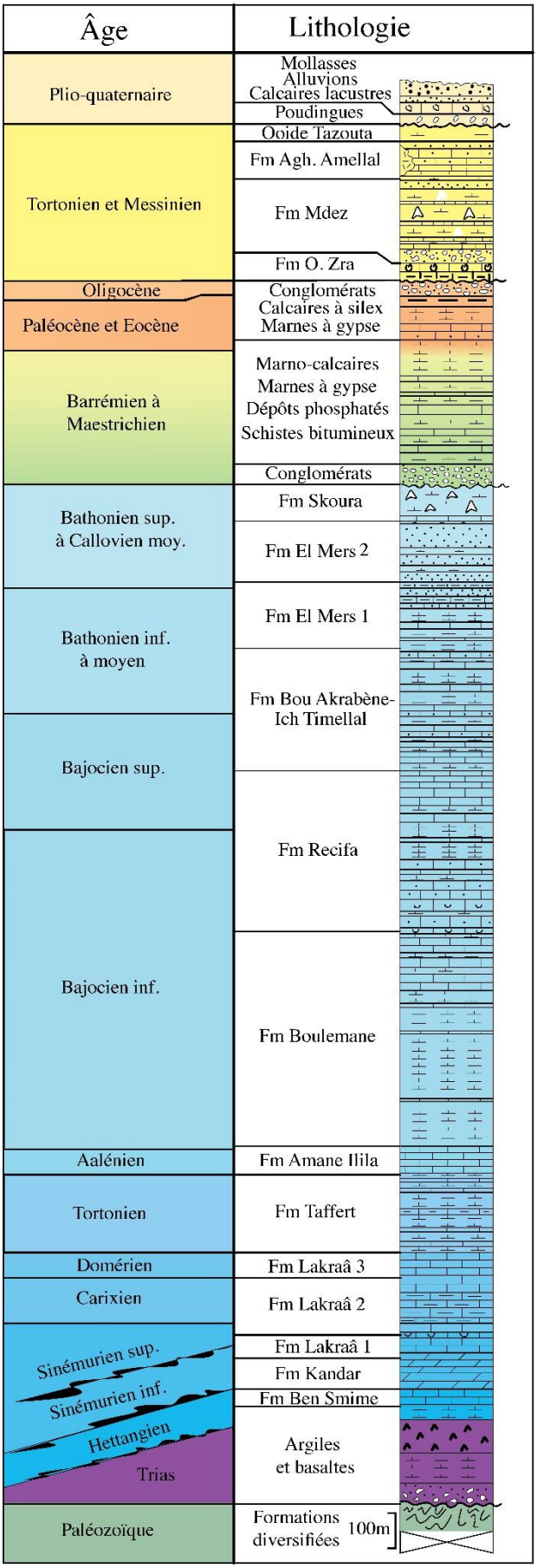


Figure 3: Log stratigraphique du Moyen Atlas (Sabaoui, 1998 modifié)

Les éboulis sont constitués d'éléments non consolidés, généralement observés sur les versants des escarpements, notamment le long des trois rides anticlinales majeures. Les cônes de déjection sont observés sur les versants NE et SE des rides anticlinales, notamment au niveau de Bou Iblane. Les formations basaltiques recouvrent principalement les environs de Timahdite et Jbel Habri. (Figure 3).

I.2. Cadre morphostructural

Le Moyen Atlas constitue une chaîne intracontinentale dont les édifices montagneux et structuraux sont allongés essentiellement dans la direction NE-SW *(Choubert et Marçais, 1952 ; Sabaoui, 1998)*. Il est subdivisé par l'Accident Nord moyen atlasique en deux domaines structuraux, le Moyen Atlas tabulaire et le Moyen Atlas plissé. Ce dernier est caractérisé par quatre grande rides anticlinales. Généralement, leur flancs nord-occidentaux sont affectés par des bandes de failles qui se manifestent localement par des chevauchements vers le NW et parfois au SE. Ces longues crêtes séparent de larges zones synclinales. Aux grandes lignes d'accidents longitudinaux s'en ajoutent d'autres qui leurs sont obliques, de direction E-W et NW-SE *(Sabaoui, 1998)* (Figure 4).

Le bassin versant Allal Al Fassi couvre une grande partie du Moyen Atlas. Il est à cheval sur les deux principaux domaines structuraux de la chaine :

- le Causse moyen atlasique au Nord-Ouest où affleurent essentiellement le Lias et localement le Trias (panneau de l'Oued Zra-El Menzel dont le substrat paléozoïque affleure sous forme de schistes et de quartzites). Il se trouve localiser surtout dans la vallée de l'Oued Sebou, Oued Azzaba, El Adrej, Ribat El Khir et en rive gauche de l'Oued Sebou dans la boutonnière de Bsabis ;
- le Moyen Atlas plissé au Sud-Est, auquel appartient la première, la deuxième et la troisièmes rides anticlinales modelées dans les formations du Lias inférieur et moyen et les larges dépressions synclinales qui correspondent aux zones d'accumulation sédimentaire.

Le bassin versant Allal Al Fassi est à cheval sur le Moyen Atlas plissé et le Causse moyen atlasique. Le Moyen Atlas est formé de plateaux étagés formant le Causse moyen atlasique au NW et de rides anticlinales étroites orientées SW-NE encadrant de larges bassins synclinaux dessinant le Moyen Atlas plissé.

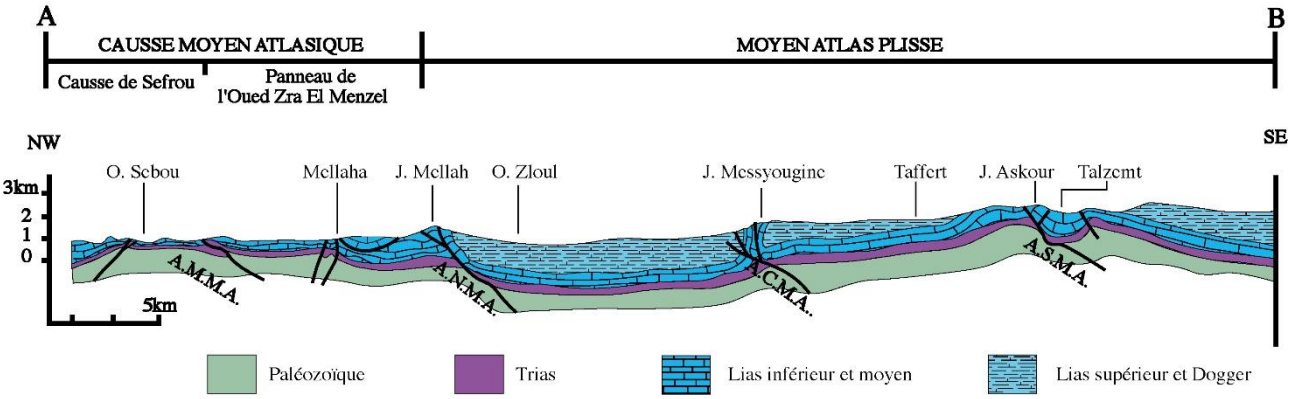


Figure 4: Coupe géologique transversale passant par les ensembles structuraux du bassin versant Allal Al Fassi (Sabaoui, 2009 modifié)

A.M.M.A : accident médian moyen atlasique ; A.N.M.A : accident nord moyen atlasique ; A.C.M.A : accident central moyen atlasique ; A.S.M.A : accident sud moyen atlasique

I.2.1. Moyen Atlas tabulaire

Le Moyen Atlas tabulaire, classiquement appelé Causse moyen atlasique est recoupé par un faisceau de failles de direction N40 : l'accident du Tizi n'Trettène. Il présente une structure sub-tabulaire, épanouie au Nord, abaissé au contact du Sillon Sud-rifain et étranglé au Sud. Ses assises constituées de dolomies et calcaires du Lias reposent en discordance sur un matelas triasique. Le Lias est relativement peu épais témoignant des mouvements tectoniques par plusieurs failles héritées de l'orogenèse hercynienne. Il est formé par des plateaux étagées appelés Causses *(Martin, 1981)* soumis, dès le début de l'ère tertiaire, à une longue phase de pénéplanation. Seules les assises ondulées du Lias sont nivelées et les formations sous-jacentes du Trias affleurent exceptionnellement dans les horsts et au cœur des plis. Après une longue période de stabilité durant l'Eocène, les Causses sont soumis à des mouvements tectoniques attribués à l'Oligocène. En effet cette topographie correspond à une surface d'aplanissement généralisée, façonnée à l'Eocène, basculée et flexurée dès l'Oligocène. La structure de ces Causses est due essentiellement à des réseaux de failles, d'accidents cassants et de fossés. La structure ondulée est accentuée par le jeu des fractures formant des plis faillées et des grabens *(Martin, 1981)*.

I.2.2. Moyen Atlas plissé

Le Moyen Atlas plissé présente une succession de plis anticlinaux, de structures monoclinales étroites et faillées et de larges plis synclinaux à fond plat montrant une succession de dépressions communicantes entre elles.

I.2.2.1. Rides anticlinales

Les quatre rides anticlinales constituent l'ossature du pli du Moyen Atlas plissé. Elles sont formées de dolomies du Lias inférieur et d'une carapace de calcaire du Lias moyen. Ces rides se succèdent dans une direction NW-SE et forment des lignes de crêtes plus élevées. Le bassin versant Allal Al Fassi n'est concerné que par les trois premières rides.

La première ride souligne la transition entre le Causse et le Moyen Atlas plissé et constitue la bordure nord occidentale du Moyen Atlas plissé. Cette dernière trace une ligne structurale presque sans discontinuité le long de toute la chaîne. Cette ride constitue une structure continue, composée de deux virgations au passage des accidents transverses de Sidi Saïd et l'Oued Zra. Elle est découpée en quatre tronçons du NE au SW *(Sabaoui, 1998)* :

- tronçon des Jbels Lakraâ-Azrou Ouassès (RIa) ;
- tronçon de Bou Hachem (RIb) ;
- trançon de Jbel Hamda (RIc) ;
- trançon de Jbel Tazrakht (RId).

Seuls les trançon RIb, RIc et RId traversent le bassin versant Allal Al Fassi.

Le flanc SE de cette ride forme un monoclinal non affecté par des failles longitudinales, hormis le tronçon RIc qui est affecté par la faille de Bab Biata. Le tronçon RIb montre des failles inverses : failles de Bou Hachem et de Tahayant. Celui de RIc est affécté par des failles chevauchantes et à vergences opposées lui conférant une structure en éventail : faille de Taghit 2 et faille de Bab Biata. Le tronçon RId situé au SE de l'accident transverse de l'Oued Zra, montre un enfoncement de l'Accident Nord moyen atlasique représenté par un réseau de failles fortement redréssées délimitant une zone injectée de matériel agrileux et basaltique *(Sabaoui, 1998)*.

La deuxième ride correspond à un pli anticlinal étroit. Elle est matérialisée par Jbel Tichoukt dont l'altitude de sa ligne de crête augmente du Nord-Est (1859 m) au Sud-Ouest pour atteindre 2794 m au piton de Lalla Oum El Bent. Elle est généralement affectée par une ou plusieurs failles inverses de direction NW constituant l'Accident moyen atlasique (Colo 1961). De par sa position entre l'Accident Nord moyen atlasique (A.N.M.A.) au NW et l'Accident sud Moyen Atlasique (A.S.M.A) au SE, Sabaoui *(1987)* la nomme Accident Central moyen-atlasique (A.C.M.A) (Figure 4). Cette ride est subdivisée en cinq tronçons dont chacun est marqué par un style de déformation particulier. Du NE au SW *(Sabaoui, 1998)* :

- tronçon de Jbel Sahrij (RIIa) ;

- tronçon de Jbel Nerkibat (RIIb) ;
- tronçon d'Ich d'Erramouz (RIIc) ;
- tronçon d'Ich n'Bouk (RIId) ;
- tronçon de Tizi Issoulitène (RIIe).

Seules les tronçons RIIc, RIId et RIIe traversent le bassin versant Allal Al Fassi.

La structure de cette ride n'est pas homogène et présente différents types de déformations. Le tronçon RIIc est un monoclinal délimité principalement par une faille inverse à chevauchante et se termine par une structure péri-anticlinale à Benicha. Le tronçon RIId est aussi un monoclinal, incliné légèrement au Sud et montre une terminaison de l'A.C.M.A.

Le tronçon RIIe est un pli dissymétrique marqué par le déversement du flanc NW sur le synclinal de Skoura. Il montre une terminaison périclinale, au niveau de son extrémité NE, marquée par des structures en extension d'un côté et par des déformations plicatives d'âge jurassique de l'autre côté.

La troisième ride est plus longue que la seconde mais discontinue et faillée au niveau du bassin versant. Sa ligne de crête atteint des altitudes très élevées au Nord-Est du bassin versant où le point culminant atteint 3000 m à la crête de Jbel Bou Iblane. Le long de cette ride, l'altitude varie de 1800 à 2900 m. Elle est affectée par plusieurs failles longitudinales constituant l'Accident Sud moyen atlasique.

Cette ride est découpée en cinq tronçons. Du NE au SW *(Sabaoui, 1998)* :

- tronçon de Jbel Tanout (RIIIa) ;
- tronçon de Jbel Bou Iblane (RIIIb) ;
- tronçon d'Ich Askour-Ich n'Tilli (RIIIc) ;
- tronçon d'Ich Azzouz (RIIId) ;
- tronçon de Jbel Abdous (RIIIe).

Les tronçons RIIIb, RIIIc, RIIId et RIIIe traversent le bassin versant Allal Al Fassi. Le tronçon RIIIb est constitué par deux monoclinaux dissymétriques longés par deux failles. L'une affecte la charnière en montrant un pendage variable, l'autre est inverse à pendage SE délimitant le monoclinal NW. Les tronçons RIIIc, RIIId et RIIIe montrent une structure monoclinale délimitée par une faille inverse à pendage variable, vers le NW ou le SE. Ces trois tronçons présentent chacun une terminaison périclinale dont les extrémités montrent des structures jurassiques en extension pour l'une et en compression pour l'autre *(Sabaoui, 1998)*.

I.2.2.2. Synclinaux

Les gouttières synclinales correspondent à de larges plis synclinaux à fond plat dont les terrains sont principalement d'âge Lias supérieur et Dogger. Elles montrent une succession de dépressions qui se communicantes entre elles.

Au niveau du bassin versant Allal Al Fassi les trois principales rides anticlinales séparent deux larges dépressions synclinales.

La première dépression synclinale encadrée par les rides RI et RII est constituée d'un ensemble de synclinaux qui communiquent entre eux et correspondent à des bassins sédimentaires du Lias supérieur et du Jurassique *(Sabaoui et al., 2009)*. Elle est découpée en cinq tronçons du NE au SW *(Sabaoui, 1998)* :

- tronçon de Bled Mitek (DIa) ;
- tronçon de Merhraoua (DIb) ;
- tronçon de Tissidal (DIc) ;
- tronçon de Tazarine (DId) ;
- tronçon de Zloul-Adrej (DIe).

Seules les dépressions synclinales DId et DIe sont logées dans le bassin versant Allal Al Fassi. Le synclinal de Tazarine est orienté N45, resserré dans sa partie SW et élargie vers le NE. L'axe du synclinal se situe dans sa partie E. Il est constitué essentiellement de terrains d'âge jurassique moyen avec un affleurement Miocène supérieur d'extension limité au niveau de Tazarine. Le flanc NW de ce synclinal est constitué de terrains d'âge jurassique inférieur, non affectés par les failles longitudinales de la ride RI. En revanche, le flanc SE est limité par l'Accident Central moyen atlasique (A.C.M.A). Les couches sédimentaires, près de cet accident, sont verticalisées, voire renversées. Le tronçon de Zloul-Adrej est encadré par le tronçon de Tazarine au NE et par le bassin néogène de Skoura au SW. Il est limité par des formations d'âge jurassique moyen. Le flanc NW est affecté par des failles transverses qui se prolongent plus à l'Ouest dans le Causse dont les plus importantes sont celles de l'Oued Zra et d'El Menzel. Il montre une série complète du Lias et du Dogger, réduite au niveau du flanc SE et butte contre la faille principale du versant NW de la ride RII *(Sabaoui, 1987)*.

La deuxième dépression synclinale est encadrée par la ride RII au NW et la ride RIII au SE. Elle est découpée en quatre tronçons du NE au SW *(Sabaoui, 1998)* :

- tronçon de Taourirt-Bou Saad (DIIa) ;
- tronçon de Taffert (DIIb) ;

- tronçon d'El Mers-Tilmirat (DIIc) ;
- tronçon de Talzemt-Aït Youb (DIId).

Seules les dépressions synclinales DIIb, DIIc et DIId sont logées dans le bassin versant Allal Al Fassi. Le synclinal de Taffert communique largement avec le tronçon DIIc au SW. Les formations de Taffert et d'Amane Ilila dessinent une structure synclinale dont l'axe est orienté E-W et s'incurve à l'Ouest vers le NW-SE. Le tronçon d'El Mers-Tilmirat est allongé dans la direction NE-SW et communique avec les tronçons de Skoura et Zloul-Adrej à l'Ouest et Talzemt-Aït Youb à l'Est, grâce aux terminaisons périclinales des rides RII et RIII. Le tronçon de Talzemt-Aït Youb, de forme triangulaire et ouvert vers le Sud, est orienté NNE-SSW. Il est encadré par deux branches de la ride RIII au NW et à l'E et communique à l'Ouest avec le synclinal d'El Mers-Tilmirat.

Généralement, la deuxième dépression synclinale présente des séries de comblement d'âge Lias supérieur et Dogger dont l'épaisseur est maximale au niveau de l'axe et réduite sur les bordures.

II. Cadre pédologique

Le sol, objet d'étude pédologique, est défini comme étant la couche superficielle ayant des caractéristiques morphologiques et minéralogiques ainsi que des propriétés physico-chimiques distinctes de celles du substrat géologique dont il dérive. Selon Baize et Girard *(1992)*, il s'agit d'un objet naturel, continu et tridimensionnel formé de constituants minéraux et organiques, d'air, d'eau et d'organismes vivants organisés entre eux en "structures" spécifiques. Les sols sont souvent continus, mais il arrive qu'ils soient très réduits, voire inexistants. En outre, ils sont continuellement modifiés par les activités anthropiques et soumis à l'érosion, principale cause de leur destruction. L'appréciation de la résistance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique est l'aptitude à contrecarrer l'action érosive de l'eau. Elle dépend de la stabilité structurale orchestrée par les constituants minéraux et organiques et la texture *(Monnier et Stengel, 1982 ; Le Bissonnais et Le Souder, 1995)*.

Selon la classification de Duchaufour *(1977)* adoptée, il existe trois classes de sols en fonction de leur pédogénèse *(Birot, 1966) :*

1. Sols dont la pédogenèse est étroitement liée à l'évolution des matières organiques. Sols des régions soumises à des climats froids ou tempérés ;

2. Sols dont la pédogenèse est étroitement liée au climat chaud et humide, mais assez indépendante de l'évolution des matières organiques. Comportement particulier des sesquioxydes de fer et d'alumine ;
3. Sols dont la pédogenèse est liée aux conditions locales.

II.1. Classification des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

La classification des sols conçue constitue une référence permettant d'ordonner les sols en unités de carte pédologique suivant un plan commun. Pour aboutir à une cohérence de la nomenclature des sols dans le bassin versant, l'objectif est la simplification de la désignation des sols soumis à la description et aux analyses. De ce fait, la classification française est adoptée en unissant les sols en classes, sous-classes et groupes (Tableau 1).

Tableau 1: Classification des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

Pédogenèse	Classe	Sous-classe	Groupe
1. Pédogenèse très liée à l'évolution des matières organiques. Sols des régions sous climats froid ou tempéré.	Sols peu évolués	D'érosion	Régosols, lithosols
		D'apport	Sols alluviaux et colluviaux
	Sols calcimagnésiques	Humifères	Rendzines
		Peu humifères	Sols bruns calcaires
			Sols bruns calciques
		Très humifères	Sols humo-calcaires
			Sols lithocalciques humifères
	Sols isohumiques	À complexe saturé	Sols châtains
		À complexe désaturé	Brunizems
	Minéraux bruts	D'érosion	Régosols, lithosols
		D'apport	Sols alluviaux, colluviaux, éoliens et volcaniques
	Vertisols	Foncés	Vertisols
		Colorés	Sols vertiques
2. Pédogenèse très liée au climat chaud et humide, mais assez indépendante de l'évolution des matières organiques. Comportement des sesquioxydes de fer et d'alumine.	Sesquioxydes de fer (Fersiallitiques)	Rubéfaction incomplète	Sols bruns fersiallitiques
		Rubéfaction complète, complexe saturé ou presque	Sols rouges fersiallitiques

II.1.1. Classes

Au niveau le plus élevé, les sols sont répartis en classes. Elles regroupent les sols ayant en commun les caractères majeurs :

- degré de développement du profil ou d'évolution du sol. Les matériaux qui n'ont subi aucune évolution constituent la classe des sols minéraux bruts, ceux dont l'évolution est faible constituent la classe des sols peu évolués. Les autres sols possèdent au moins un horizon dans lequel le matériau primitif a été altéré et modifié dans sa nature chimique ;
- mode d'altération des minéraux en relation avec les caractères généraux des conditions physico-chimiques régnant dans la partie supérieure du sol, caractérisé par la nature des sesquioxydes libérés qui se maintiennent individualisés, ou constituent des complexes caractéristiques. L'importance relative de cette libération, ainsi que la dominance de certains types d'argiles traduisent divers types d'altération. Elles s'expriment dans le profil soit par des couleurs, soit par des propriétés physiques (structure) de certains horizons, soit par des propriétés chimiques de saturation du complexe) ;
- composition et répartition typique de la matière organique susceptible d'influencer l'évolution du sol et la différenciation des horizons du profil. Par exemple : concentration dans les horizons supérieurs ou répartition dans tout le profil ; humus évolué calcique, humus évolué de type mull, apte à favoriser la migration des colloïdes minéraux ; humus grossier de type mor', capable de dégrader le complexe minéral des sols ;
- facteurs fondamentaux d'évolution du sol qui deviennent prédominants. C'est le cas de la présence d'eau (hydromorphie) ou de sels très solubles (halomorphie).

II.1.2. Sous-classes

La différenciation des sous-classes repose sur des critères résultant des conditions de pédoclimat. Les sols peuvent avoir acquis certains caractères majeurs sous l'action des facteurs climatiques, comme la faible évolution des sols due à un climat très froid ou à un climat sec et chaud. Les sols dans lesquels la matière organique, d'origine principalement racinaire, s'accumule sur une forte épaisseur peuvent se former sous climats à hiver froid tempéré ou chaud. Aussi l'absence de relations avec le climat est prise comme critère de détermination des sous-classes. C'est le cas des sols minéraux bruts et des sols peu évolués qui ne doivent leurs caractères de classe qu'à leur faible durée d'existence où les processus majeurs n'ont pas eu le temps d'agir. Le pédoclimat est une notion très élargie qui dépond non seulement de température et d'humidité (liées ou non au climat local), mais aussi de la concentration des

solutions du sols en certains ions, que ce soient des cations comme le sodium ou le calcium. L'ion d'hydrogène, lui aussi intervient, au moins indirectement par l'intermédiaire de la notion de milieu réducteur ou oxydant. Cependant, c'est l'ambiance physico-chimique qui est utilisée pour définir les sous-classes, orchestrée par les éléments principaux à savoir, la température, l'humidité, l'état réduit ou oxydé, la concentration des solutions du sol en cations, suivant des variations annuelles, saisonnières ou même journalières.

II.1.3. Groupes

Les groupes sont définis par des caractères morphologiques du profil correspondant à des processus d'évolution des sols : différenciation de certains horizons, lessivage du calcaire, des éléments colloïdaux, etc.

Parfois deux groupes voisins peuvent être caractérisés par un même processus pédologique général ; ils sont alors différenciés par une forte variation de son intensité correspondant à des profils nettement distincts.

II.2. Répartition des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

Les sols dans le bassin versant Allal Al Fassi sont classés en dix classes (minéraux bruts, peu évolués, vertisols, calcimagnésiques, isohumiques, sesquioxydes de fer, complexe C1, complexe C2, complexe C3 et complexe C4) (Tableau 1). La carte pédologique résultante a été numérisée à partir de la carte réalisée par le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification *(HCEFLCD, 2010)* et corrigée en tenant compte des données bibliographiques *(Baali, 1998 ; Baali et al. 2007)* et celles de terrain (Figure 5). La répartition des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi montre une prédominance de la classe des sols peu évolués couvrant 22,96% de sa superficie, suivie de la classe des sols calcimagnésiques avec 21,15%. La classe des vertisols ne dépasse pas 0,5% de la superficie du bassin versant.

II.2.1. Sols peu évolués

Les sols peu évolués sont des jeunes sols qui se distinguent par une faible altération des minéraux et une faible teneur en matière organique. Le climat sépare ces sols au stade de la sous-classe en sols climatiques et sols non climatiques groupant les sols d'érosion et les sols d'apport ; la roche mère et le drainage les subdivisent ensuite respectivement. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, les sols peu évolués appartiennent à la sous-classe des sols non climatiques dans la mesure où l'action du climat local n'a pas eu le temps de se manifester. Ils sont constamment rajeunis par l'érosion hydrique qui empêche leur évolution pédologique. Ils

sont peu évolués parce que l'apport des matériaux est récent ou parce que l'érosion vient de décaper la roche mère. Quatre groupes sont distinguées (régosols, lithosols, sols alluviaux et sols colluviaux) et subdivisés en 15 unités pédologiques. Ces unités sont choisies en fonction de la nature de la roche mère, de matériaux apportés et de certains caractères secondaires. Cette classe est dominante et représente 22,96 % de la superficie totale du bassin versant (Figure 5).

II.2.2. Sols calcimagnésiques

Ce sont des sols dont les caractères morphologiques des horizons supérieurs sont déterminés par la présence d'ions alcalinoterreux et la partie inférieure du solum, quand elle existe, ne montre ni les caractères des vertisols ni ceux des sols isohumiques.

Ils couvrent 21,15 % de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi. Trois sous classes et cinq groupes sont différenciés. Les rendzines et les sols bruns calcaires sont les deux groupes essentiels de cette classe (Figure 5).

II.2.3. Sols isohumiques

Ce sont des sols évolués, très profonds sur de faibles pentes. Ils peuvent comporter en profondeur un horizon de pseudogley ou un horizon induré, croûte calcaire ou gypseuse. L'ensemble des horizons nettement marqués par la matière organique, constitue une part importante d'au moins de la moitié, du profil du sol jusqu'à son matériau originel. Cette classe représente 3,13 % de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi avec deux sous classes, sous un pédoclimat frais (à complexe saturé ou désaturé), composées de deux groupes : châtains et bruns isohumiques. Le groupe de sols châtains occupe les dépressions karstiques ou tectoniques. Le groupe de sols bruns se développe sur des alluvions de texture argileuse des terrasses récentes (Figure 5).

II.2.4. Sols minéraux bruts

Ce sont des sols sans différenciation en horizons. La matière minérale y subit une désagrégation et une fragmentation mécaniques plus ou moins poussées mais l'altération chimique reste insensible. Ils se trouvent dans les zones où l'alluvionnement se poursuit actuellement (sols alluviaux) et où l'érosion hydrique se manifeste, notamment sur des pentes fortes sans couvert végétal. Selon le substrat géologique qui apparaît parfois en surface, deux groupes existent (lithosols et régosols). Ces sols occupent 8,95 % de la superficie globale du bassin versant Allal Al Fassi (Figure 5).

II.2.5. Vertisols

Ce sont des sols généralement bien développés dont les horizons ne se différencient que par la structure. Du fait des mouvements internes, ils comportent souvent des éléments grossiers, irrégulièrement remontés à travers le profil. Ils présentent de larges fentes de dessiccation avec une structure polyédrique ou prismatique grossière. Ils sont de couleurs généralement foncée, riches en argiles gonflantes et en matière organique. Ils sont surtout localisés sur des formations argileuses quaternaires dans des milieux confinés et des cuvettes. Deux sous classes se distinguent selon le type de drainage externe (possible ou nulle) et comprennent deux sous-groupes modaux et deux sous-groupes vertiques. Cette classe couvre 0.45% de la superficie du bassin versant (Figure 5).

II.2.6. Sols à sesquioxydes de fer

Ce sont des sols caractérisés par une altération très poussée aboutissant à la concentration des hydroxydes de fer et souvent d'alumine (fersiallitiques). Ils sont caractérisés par l'individualisation des sesquioxydes de fer ou de manganèse qui leur confère une couleur rouge, rouille (parfois noire si les oxydes de manganèse dominent). Deux sous-classes sont distinguées (rubéfaction incomplète et rubéfaction complète) composées de deux groupes : sols rouges et sols bruns. Ils se trouvent sur les rebords nord des Causses atlasiques et par endroit sur le Causse d'El Menzel. Ces sols sont cartographiés comme unités simples quand les affleurements rocheux sont moins nombreux et comme unités complexes quand les affleurements rocheux sont plus abondants. Cette classe représente 2,28 % de la superficie du bassin versant (Figure 5).

II.2.7. Unités complexes

Elles correspondent dans le bassin versant aux zones de forêts et de parcours. Quatre unités complexes sont distinguées en fonction de la roche mère et du couvert végétal. La roche mère correspond essentiellement aux dolomies et calcaires du Lias. En dehors de la végétation forestière qui contribue à la formation de rendzines humifères, les autres sols sont des sols peu évolués d'érosion associés à certains sols fersiallitiques. Ils s'étendent sur 41,1% de la superficie du bassin versant (Figure 5).

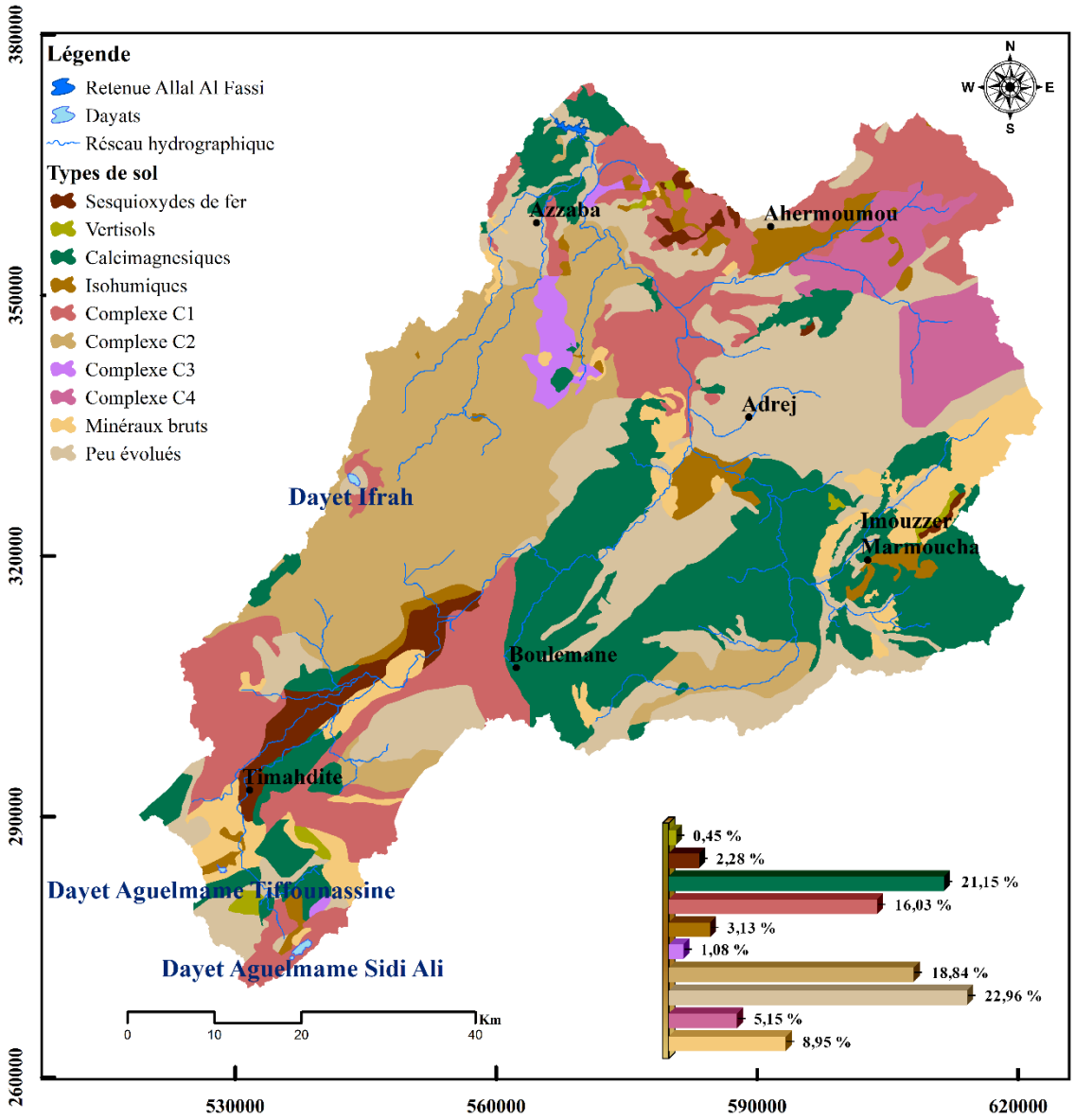


Figure 5: Carte pédologique du bassin versant Allal Al Fassi (HCEFLCD, 2010 modifiée)

III. Conclusion

Le bassin versant Allal Al Fassi couvrant une bonne partie du Moyen Atlas est allongé suivant ses édifices montagneux et structuraux orientés NE-SW. Les formations géologiques y sont diversifiées, d'âge allant du Paléozoïque jusqu'au Quaternaire, avec prédominance des faciès calcaires du Jurassique inférieur et moyen (environ 70% de sa superficie). Les séries paléozoïques affleurent sous forme de boutonnières (schistes, quartzites, grès, pélites…), surmontées, en discordance, par des séries triasiques (argiles rouges, basaltes doléritiques et argiles rouges salifères). Le Crétacé est représenté par des marnes rouges à gypse et calcaires noduleux blancs et par une alternance marno-calcaire. Le Paléogène est constitué d'une série

argileuse, gréseuse et microconglomératique. Le Miocène présente des faciès diversifiés détritiques, détritico-calcaires et calcaires. Les terrains pliocènes et quaternaires sont des formations superficielles variées (travertins, alluvions, cônes de déjection, épandages d'éboulis sur versants) et des coulées basaltiques.

Le Causse moyen atlasique au NW et le Moyen Atlas plissé au SE, séparés par l'accident Nord-moyen-atlasique, par leurs structures, créent des contrastes morphologiques importants pouvant jouer un rôle principal à la fois sur la genèse et l'érosion hydrique des sols. En plus, le bassin versant Allal Al Fassi pourvoyeur des sédiments vers la retenue est sous la dépendance de la vulnérabilité des roches en surface (dépôts détritiques et calcaires friables) et des sols. Les sols minéraux bruts, peu évolués, vertisols, calcimagnésiques, isohumiques, sesquioxydes de fer, complexe C1, complexe C2, complexe C3 et complexe C4 sont identifiés et reconnus. Les sols peu évolués couvrant 22,96% de la superficie du bassin versant, suivis par les sols calcimagnésiques avec 21,15% et les vertisols ne dépasse pas 0,5%. Les sols bien différenciés dans les zones protégées échappent en général aux mécanismes de l'érosion hydrique alors que les sols non différenciés sont en perpétuel remaniement sur des versants et souvent exposés à l'érosion hydrique.

CHAPITRE II

Facteur topographie et caractéristiques physiques

▪ Chapitre II : Facteur topographie et caractéristiques physiques

La topographie est l'un des facteurs essentiels de l'étude des bassins versants et principalement la compréhension de leur comportement hydrologique. Elle joue un rôle important dans la dynamique de surface des bassins versants et détermine, en grande partie, l'aptitude des terrains au ruissellement et à l'infiltration *(Musy et Higy, 2011)*. Plusieurs paramètres dépendent de son influence sur l'écoulement hydrologique, notamment les paramètres hydrométéorologiques, à savoir les précipitations et les températures, qui varient en fonction de l'altitude et des paramètres morphométriques, notamment la pente qui influe sur la vitesse de l'écoulement. La topographie influence considérablement la nature des sols en constituant un facteur essentiel dans leur différenciation sous l'effet de la dynamique hydrique et érosive. Cette dernière s'exprime, généralement, par l'épaississement et la simplification des profils pédologiques à mesure que l'on se rapproche des talwegs et inversement par l'amincissement des profils pédologiques à proximité des lignes de crêtes. En effet, pour un même substrat géologique les sols se différencient suivant l'inclinaison de la pente et leur position sur le versant en attribuant à la pente un rôle prépondérant dans l'ampleur de la dynamique des versant. Celle-ci procure aux eaux de ruissellement l'énergie nécessaire pour le décapage et le transport des matériaux solides.

Outre les conditions climatiques qui gouvernent la dynamique du bassin versant, ses caractéristiques physiques influencent le volume (en termes de bilan) et la répartition temporelle (en terme d'hydrogramme) des écoulements *(Roche, 1963)*. Par les caractéristiques physiques il faut entendre la géologie, la topographie et la nature et l'occupation du sol, sans oublier la forme du bassin versant qui influence les caractéristiques de l'écoulement résultant d'une pluie donnée *(Roche, 1963 ; Strahler, 1968)*.

Les principaux facteurs qui influent sur la réponse hydrologique et son activité érosive, sont en partie morphologiques, tels que la taille, la forme, le relief et l'orientation du bassin versant, et en partie en raison des caractéristiques du réseau hydrographique. En outre, la réponse est influencée par le type et la couverture du sol du bassin versant.

Les modalités de fonctionnement des facteurs qui transforment les eaux de pluies en ruissellement, constituent des informations importantes bien qu'insuffisantes pour avoir une idée concernant la dynamique érosive. Elles s'avèrent donc nécessaires à la caractérisation de la zone réceptionniste. En effet, les principales caractéristiques physiographiques interviennent souvent et de façon combinée dans les modalités de l'écoulement superficiel qui sont les

dimensions, la forme, l'altitude, la pente et l'exposition. Ces facteurs contrôlent en quelque sorte la quantité et la fluctuation spatio-temporelle des précipitations et par la suite la lame d'eau tombée dont une grande proportion ruisselle et incise le sol. Ces caractéristiques vont être définies à travers le calcul d'un certain nombre d'indices pouvant servir comme repère dans la caractérisation du bassin versant, chose qui va traduire sa réaction vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion *(Robert et Horton, 1945)*.

Les fondamentaux de la morphométrie sont basés sur les premiers travaux de Gravelius *(1914)*, bien que les premiers travaux de Horton *(1945)* datant aussi loin des années 1920 et des progrès substantiels utilisant des analyses statistiques pour déterminer quels facteurs physiographiques ont la plus forte corrélation avec la réponse hydrologique d'un bassin versant. Le travail de Horton *(1945)* constitue une véritable théorie de la morphologie basée sur l'étude du système de drainage.

L'objectif de ce travail est l'étude des caractéristiques physiographiques du bassin versant Allal Al Fassi afin d'expliquer son comportement hydrologique à l'aide d'une évaluation quantitative de sa morphométrie *(Musy et Higy, 2011)*. La caractérisation de la morphologie du bassin versant par des indices simples calculables avec le seul concours des cartes topographiques. Elle est basée sur le traitement du Modèle Numérique de Terrain (MNT) par les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et Google Earth. Le modèle numérique du terrain a permis l'extraction automatique du réseau hydrographique et la délimitation du bassin versant ayant pour exutoire le barrage Allal Al Fassi. Les différents paramètres géométriques (surface, périmètre, forme, pente, hypsométrie, altitude…), morphométriques (densité de drainage, longueur, ordre de drainage...) et de reliefs ont été calculés à l'aide du logiciel (ArcGIS). Leurs valeurs ont permis l'élaboration des cartes thématiques (carte hypsométrique, carte des pentes, carte du réseau hydrographique ...) (Figure 6).

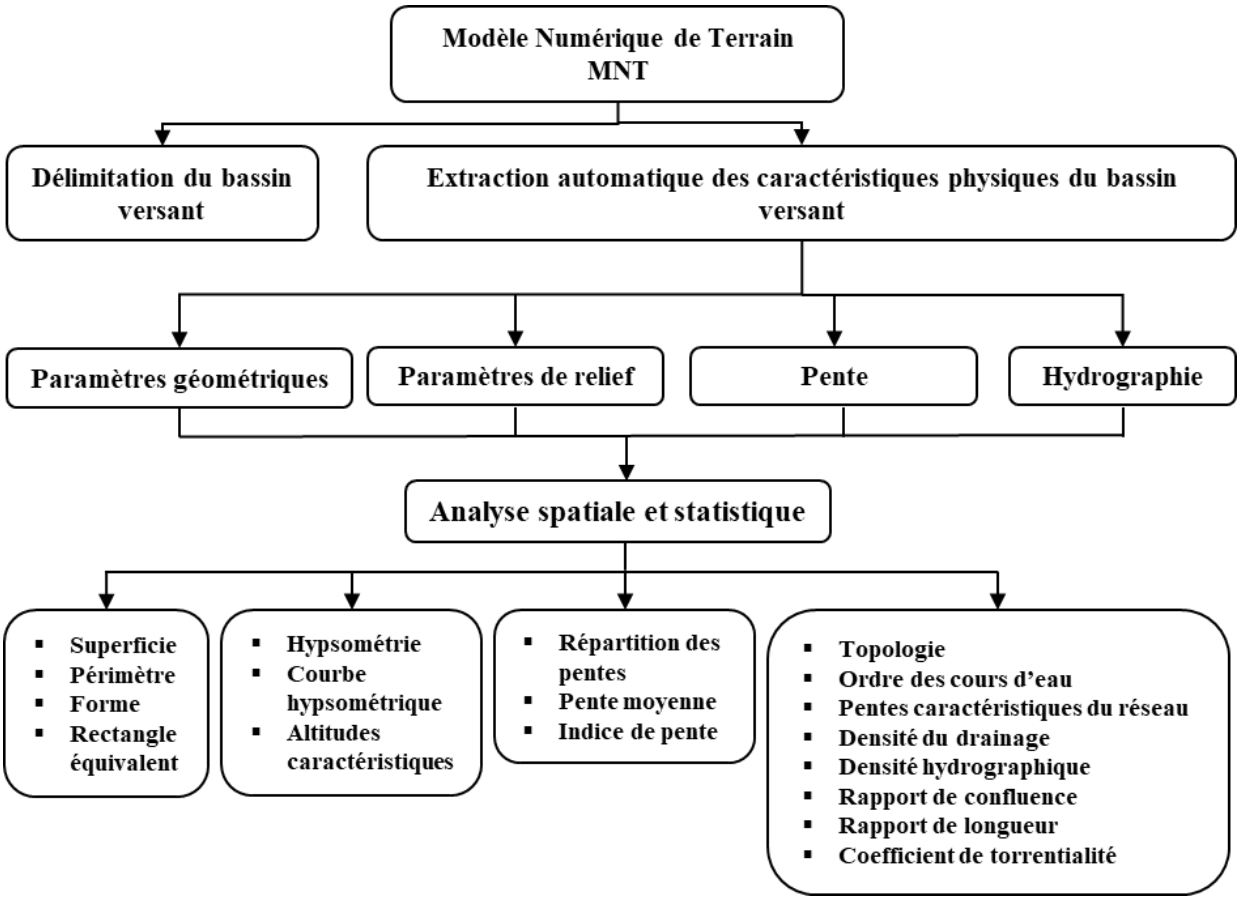


Figure 6: Organigramme méthodologique

I. Caractéristiques géométriques

L'étude des caractéristiques géométriques tente de décrire la morphométrie du bassin versant par des expressions quantitatives et numériques impliquant plusieurs indices *(André et Christophe, 2004)*.

I.1. Surface

La décharge du bassin versant est définie comme une zone délimitée par l'ensemble des points les plus hauts constituant la ligne de partage des eaux, qui recueille les précipitations et alimente ses cours d'eau, est directement liée à sa surface. Le périmètre représente toutes les irrégularités de la limite du bassin versant. Il est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés et n'influençant pas l'état d'écoulement du cours d'eau. Le bassin versant Allal Al Fassi s'étale sur une superficie de 5352,2 Km^2 et un périmètre de 463,11 Km.

I.2. Forme

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme. Une forme allongée favorise, pour une même pluie, de faibles débits de pointe de crue, en raison du temps

d'acheminement plus important de l'eau jusqu'à l'exutoire. En relation avec la notion de temps de concentration, un bassin versant de forme allongée présente un hydrodynamisme important de par les faibles distances d'écoulement sur les versants et les processus de l'érosion se déclenchent rapidement après le début d'une averse. Contrairement au bassin versant de forme circulaire où hydrodynamisme est lent et par conséquent moins agressif.

Pour caractériser la géométrie d'un bassin versant les classiques de l'hydrologie proposent différents indices de forme en comparant les bassins versants destinés à estimer certaines de leurs caractéristiques hydrologiques. L'indice le plus communément fait référence est l'indice de compacité, dit de Gravelius. Cet indice de compacité (ou de densité) est défini par le rapport entre le périmètre du bassin versant et le périmètre d'un cercle ayant la même surface *(Gravelius, 1914)*.

Il est exprimé par l'équation suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi . A}} \cong 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1,77 \qquad (1)$$

Avec :

- A est la surface du bassin versant (Km^2) ;
- P est le périmètre du bassin versant (Km).

L'indice de Horton exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal (L). Plus l'indice est inférieur à 1, plus la forme est allongée

L'indice de Gravelius est égal à 1,7 et confirme la forme apparente allongée du bassin versant Allal Al Fassi, orientée NE-SW, qui traduit de faibles débits de pointe, caractérisés par un temps d'acheminement plus long de l'eau à l'exutoire. En d'autres termes, cette forme allongée ralentie la réponse hydrologique avec une notion de temps de concentration (t_c) plus long que dans le cas de la forme en éventail. Cette forme allongée favorise une érosion linéaire et régressive.

II. Relief

Il est connu par son influence sur l'écoulement hydrologique dans le bassin versant dont dépendent plusieurs paramètres, notamment les paramètres hydrométéorologiques (précipitations et températures) qui varient en fonction de l'hypsométrie et les paramètres morphométriques, notamment la pente qui influe sur la vitesse d'écoulement. L'étude des

caractéristiques topographiques permet de déterminer la morphologie du bassin versant et son comportement hydrologique. Le relief peut être exprimé au moyen d'indices ou de courbes caractéristiques telles la courbe hypsométrique *(Musy et Higy, 2011).*

II.1. Hypsométrie

Le modèle numérique de terrain (MNT) a permis de déterminer les altitudes en tout point du bassin versant Allal Al Fassi avec un sommet culminant à 2959 m, un exutoire à 344 m et une altitude moyenne de 1537,82 m (Figure 7).

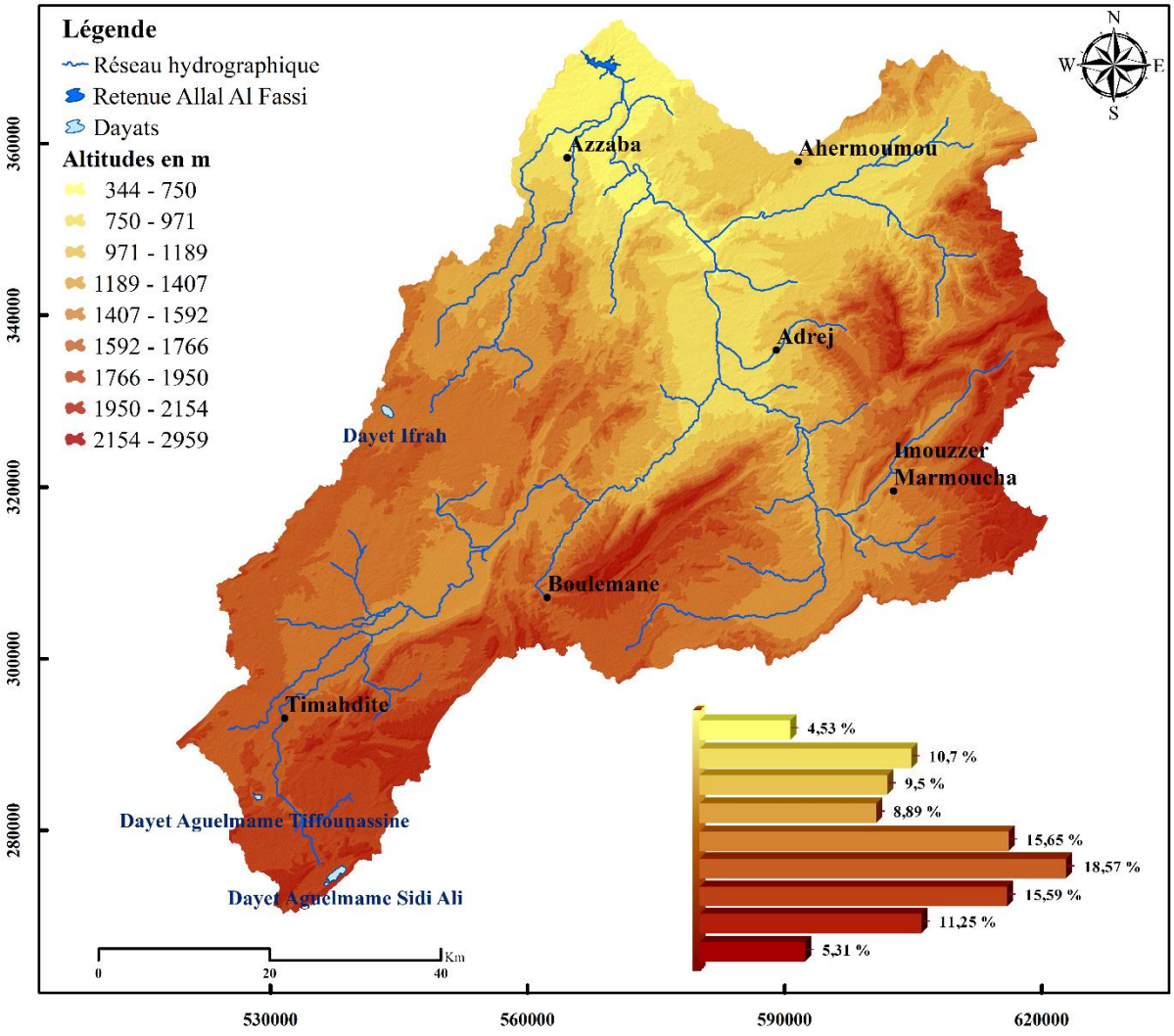


Figure 7: Carte hypsométrique du bassin versant Allal Al Fassi

Dans l'objectif de ne pas perdre d'informations, en retranscrivant au mieux l'organisation statistique des données et en prenant compte les règles de la perception visuelle pour transmettre une information géographique efficace, le nombre de classes hypsométriques est défini en se basant sur l'équation de Sturges-Huntsberger ($\boldsymbol{K = 1 + (^{10}/_{3} \times Log\ N)}$) (Sturges, 1926 ;

Huntsberger, 1962) où k est le nombre de classes à découper et N est la population. Sachant que cette équation est appliquée aussi pour l'ensemble des cartes thématiques qui suivent.

Neuf classes hypsométriques sont différenciées, regroupées en trois zones d'altitude. La partie amont du bassin versant comprend les altitudes les plus élevées, entre 1766 m et 2959 m, notamment au niveau de Jbel Bou Iblane, Tichoukt, Aguelmame Sidi Ali et Immouzzer Marmoucha. La partie centrale avec une tranche d'altitude allant de 971 à 1592 m. Les altitudes les plus élevées sont localisées au niveau de la première ride anticlinale longeant l'Accident Nord moyen atlasique marquant la transition entre le Causse moyen atlasique et le Moyen Atlas plissé, et au niveau de la deuxième ride anticlinale au niveau du secteur de l'Adrej (Figure 7).

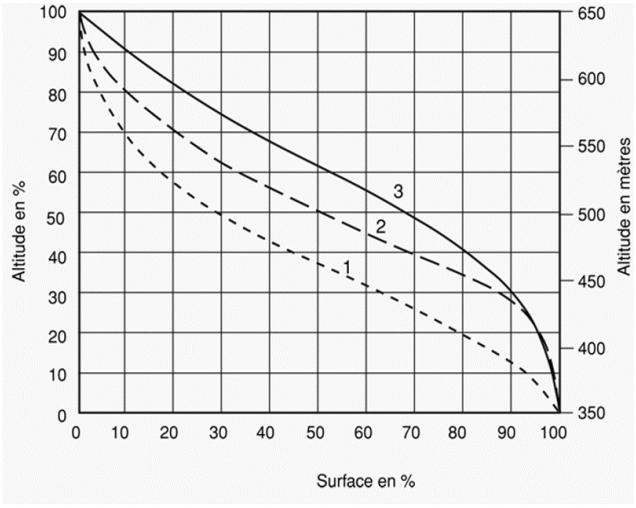
II.2. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin versant, donc de son relief. Elle est réalisée à partir de pourcentages cumulés des surfaces de chaque tranche d'altitude (surface cumulée en abscisse et altitude en ordonnée), calculés à partir de la carte hypsométrique (Tableau 2). Elle permet d'interpréter les variations d'altitude dans le bassin versant en se basant sur la comparaison de son allure avec celle de trois courbes théoriques montrant l'aspect général des courbes selon l'état d'érosion du bassin versant (Figure 8). La courbe hypsométrique permet aussi la détermination des altitudes caractéristiques, l'altitude maximale, l'altitude minimale, l'altitude médiane et l'altitude la plus fréquente.

Tableau 2: Calculs hypsométriques du bassin versant Allal Al Fassi

Tranches d'altitudes	Altitude moyenne (Hi) en m	Surface (Ai) en Km^2	Surface cumulée en Km^2	Surface (A) en %	Surface cumulée en %
344 - 750	547,00	242,70	5352,20	4,53	100,00
750 - 971	860,50	572,50	5109,50	10,70	95,47
971 - 1189	1080,00	508,60	4537,00	9,50	84,77
1189 - 1407	1298,00	475,70	4028,40	8,89	75,27
1407 - 1592	1499,50	837,50	3552,70	15,65	66,38
1592 - 1766	1679,00	994,00	2715,20	18,57	50,73
1766 - 1950	1858,00	834,60	1721,20	15,59	32,16
1950 - 2154	2052,00	602,10	886,60	11,25	16,57
2154 - 2959	2556,50	284,50	284,50	5,32	5,32
Total	-	5352,20	-	100,00	-

La courbe hypsométrique du bassin versant Allal Al Fassi (Figure 8) est presque analogue à celle de l'aspect (2) dit mature, état intermédiaire entre celui d'un vieux bassin versant où l'altitude varie peu (1) et celui d'un jeune bassin versant où l'altitude varie beaucoup (2) (Figure 8).



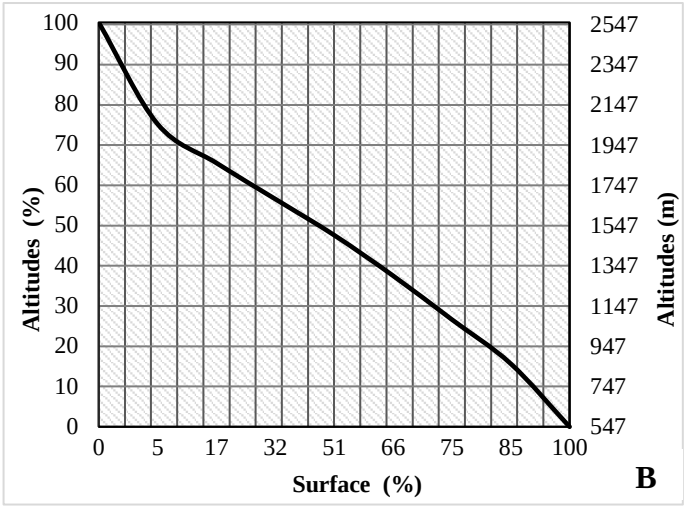


Figure 8: A - Classification de l'aspect général des courbes hypsométriques selon l'état d'érosion. (1 : vieux bassins versant, 2 : bassins versants matures, 3 : jeunes bassins versants) ; B - Courbe hypsométrique du bassin versant Allal Al Fassi

II.3. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est la représentation géométrique de la ligne de partage des eaux du bassin versant transformée en rectangle. Il est tracé en utilisant la longueur, la largeur, la surface et le périmètre du bassin versant. Les courbes de niveau deviennent des lignes parallèles à la largeur du rectangle et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique, plus le rectangle équivalent est allongé, moins il sera drainé.

La longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent du bassin versant Allal Al Fassi sont calculées par les équations 2 et 3.

$$L = \frac{K_G.\sqrt{A}}{1,12}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2}\right) = \frac{1,9.\sqrt{5352}}{1,12}\left(1+\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{1,77}\right)^2}\right) = 252,73\ Km \quad (2)$$

$$l = \frac{K_G.\sqrt{A}}{1,12}\left(1-\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{K_G}\right)^2}\right) = \frac{1,9.\sqrt{5352}}{1,12}\left(1-\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{1,77}\right)^2}\right) = 26,04\ Km \quad (3)$$

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius ;
A : superficie de bassin versant (Km^2) ;

Les dimensions du rectangle équivalent montrent que la longueur est presque dix fois (9,7) sa largeur (Figure 9).

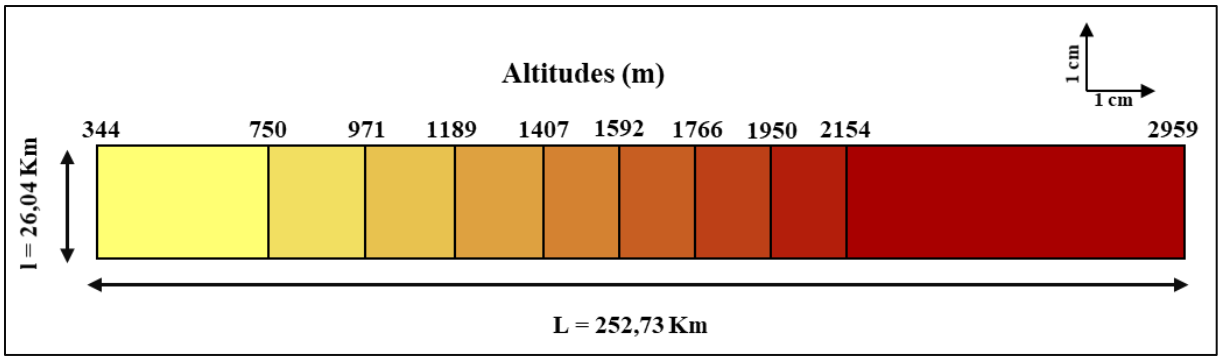


Figure 9: Rectangle équivalent du bassin versant Allal Al Fassi

II.4. Altitudes caractéristiques

Le système altimétrique joue un rôle important dans la description du bassin versant et la compréhension de son comportement hydrologique, car la principale force responsable de l'écoulement des eaux en surface est la gravité. En fait, plusieurs processus dépendent directement des caractéristiques altimétriques. L'altitude d'un bassin versant joue un rôle directement dans la répartition des conditions climatiques locales, en contrôlant le débit issu des précipitations.

II.4.1. Altitudes maximale et minimale

L'altitude maximale représente le point géographique le plus élevé du bassin versant tandis que l'altitude minimale indique le point le plus bas, se trouvant généralement à l'exutoire. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, l'altitude minimale est de **344 m** et l'altitude maximale est de **2959 m**.

II.4.2. Altitude moyenne

L'altitude moyenne est extraite directement de la courbe hypsométrique et peut être définie par l'équation 4.

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i . h_i}{A} = 1537,82\ m \qquad (4)$$

Avec :

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (km²) ;
h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ;
A : surface totale du bassin versant (km²).

II.4.3. Altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude sur la courbe hypsométrique au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin versant. La valeur dans le bassin versant Allal Al Fassi est de 1547 m.

III. Pentes

La pente influence puissamment le développement de l'érosion. En effet les pertes en sols, connaissent une croissance exponentielle des pertes en sols en fonction de la pente *(Fournier, 1967 ; De Noni et Viennot, 1998)*. Lorsque la pente augmente, le ruissellement devient abrasif lui-même et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15% *(Woodruff, 1948 ; Hudson, 1992 ; Roose, 1994)*. La pente intervient dans les phénomènes d'érosion par sa forme, par son inclinaison et aussi par sa longueur. En théorie, plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, acquiert de la vitesse et une énergie qui se traduit par une érosion *(Zingg, 1940)*. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'inclinaison de la pente et aux indices de pentes. La longueur de la pente sera détaillée dans la deuxième partie (Partie II, chapitre II).

III.1. Répartition des pentes

La répartition des pentes dans le bassin versant Allal Al Fassi montre une prédominance des pentes faibles et moyennes. Les classes des pentes inférieures à 41,40% s'étendent sur environ 82 % de la superficie du bassin versant, chose qui favorise l'infiltration des eaux surtout lorsque la perméabilité du substrat la permettrait. Les classes des pentes fortes à très fortes occupent environ 18% de la superficie totale (Tableau 3).

Tableau 3: Répartition des pentes dans le bassin versant Allal Al Fassi

Classes de pentes	Superficie (Km^2)	Superficie (%)	Superficie cumulée (%)
0,00 - 8,52	1723,00	32,19	32,19
8,52 - 19,48	1738,00	32,47	64,66
19,48 - 30,44	929,72	17,37	82,04
30,44 - 41,40	487,70	9,11	91,15
41,40 - 53,58	265,80	4,97	96,11
53,58 - 68,20	141,80	2,65	98,76
68,20 - 88,90	52,98	0,99	99,75
88,90 - 135,18	11,78	0,22	99,97
135,18 - 310,55	1,42	0,03	100,00
Total	5352,20	100,00	-

Les pentes dépassant 41,40% sont localisées dans les zones montagneuses, principalement dans le Moyen Atlas plissé, notamment au niveau de Jbel Bou Iblane et Jbel Tichoukt (Figure 10).

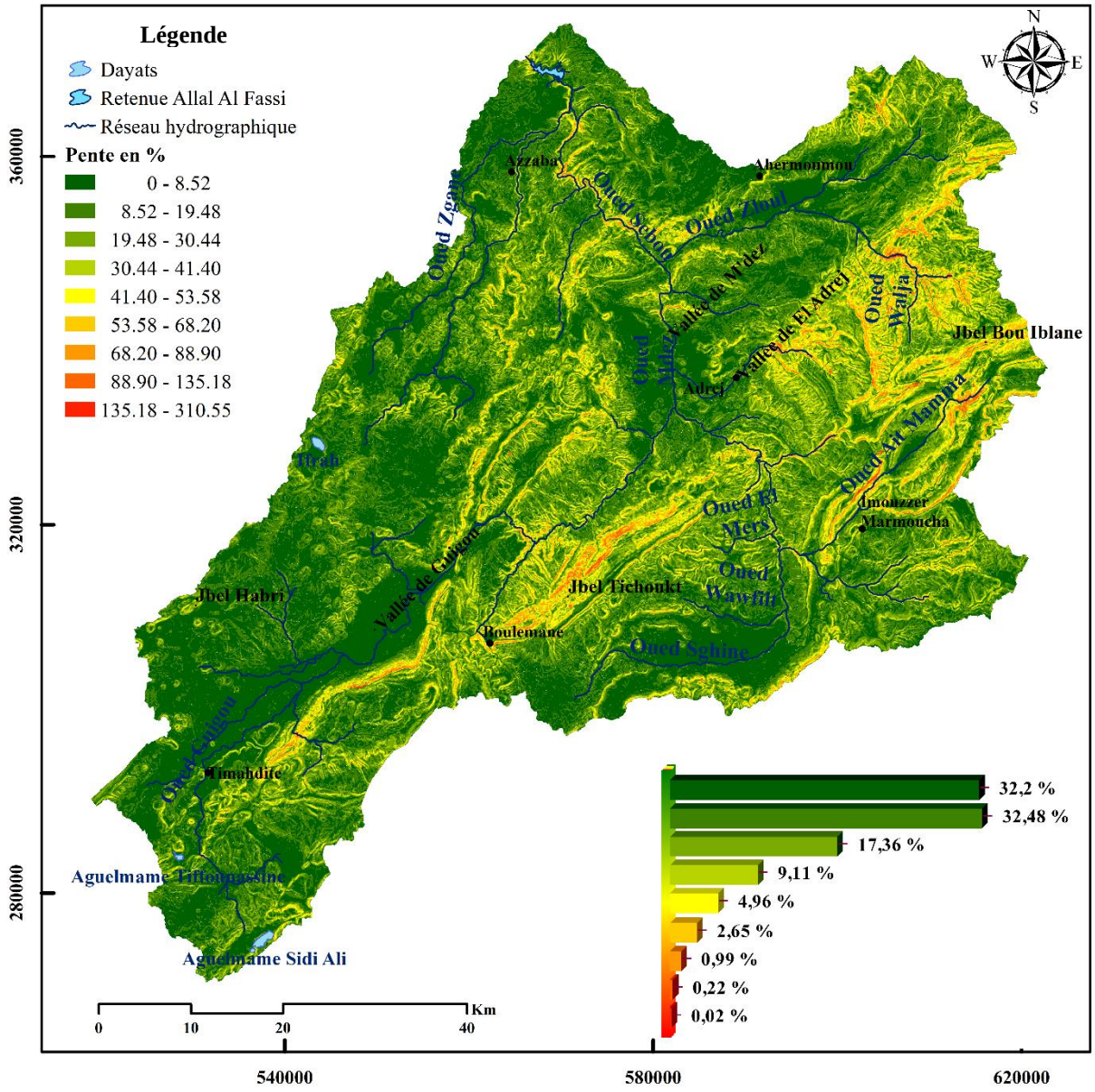


Figure 10: Carte des pentes du bassin versant Allal Al Fassi

III.2. Pente moyenne

La pente moyenne est un bon indicateur du temps de parcours du ruissellement direct, temps de concentration qui agit directement sur le débit de pointe lors d'une averse lente. Elle est déterminée par l'équation 5.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} = 10,34 \qquad (5)$$

Avec :
P_{moy} : pente moyenne du bassin versant ;
ΔH : dénivellation ($\boldsymbol{H_{max} - H_{min}}$) (m) ;
L : longueur du rectangle équivalent (km).

La pente moyenne du bassin versant Allal Al Fassi est relativement faible (10,34%).

III.3. Indice de pente de Roche Ip

L'indice de pente de Roche qui caractérise la pente globale du bassin versant Allal Al Fassi s'exprime par l'équation 6.

$$\boldsymbol{I_p = L^{-\frac{1}{2}} \times \sum_{n}^{1} \sqrt{A_i \times d_i} = 0,58} \quad (6)$$

Avec :
Ai : fraction en % de la surface comprise entre deux courbes de niveau,
di : distance entre deux courbes de niveau voisines.

L'indice de pente de Roche dans le bassin versant Allal Al Fassi est égal à 0,58.

III.4. Indice de pente globale

Le relief joue un rôle important, en commandant en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente globale Ig, défini comme étant le rapport entre la dénivellation utile (Du) et la longueur du rectangle équivalent (Leq) donné par l'équation 7.

$$\boldsymbol{I_g = \frac{D_u}{L_{eq}} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_{eq}} = 0,038\%} \quad (7)$$

Avec :
Ig : indice de pente globale en m/km ;
Du : dénivelée ($H_{5\%}$ - $H_{95\%}$) ;
L_{eq} : longueur du rectangle équivalent ;
$H_{5\%}$: altitude correspondant à 5% de la superficie totale du bassin versant ;
$H_{95\%}$: altitude correspondant à 95% de la superficie totale du bassin versant.

Selon la classification du relief donnée par l'ORSTOM, la valeur de l'indice de pente globale du bassin versant Allal Al Fassi montre que le relief est assez fort (Tableau 4).

Tableau 4: Classification du relief selon l'Ig donné par l'ORSTOM

Relief	Valeur d'I_g
Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 \leq I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 \leq I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 \leq I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 \leq I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 \leq I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 < I_g$

IV. Réseau de drainage

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute l'une des caractéristiques les plus importantes d'un bassin versant. Il peut prendre une multitude de formes. Sa différenciation est due à quatre facteurs principaux : la géologie, le climat, la pente et l'action anthropique *(Roche, 1963)*. Sous l'influence de ces derniers, la structure du drainage change au cours du temps en modifiant le paysage.

Le réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi prend naissance dans le Moyen Atlas, dans la région de Timahdite, où il correspond à l'Oued Guigou. Il rejoint l'Oued Maâsser pour donner naissance à l'Oued M'Dez et reçoit ensuite l'Oued Zloul pour former l'Oued Sebou jusqu'à l'exutoire (Figure 11).

L'Oued Guigou est considéré comme le cours d'eau principal du bassin versant Allal Al Fassi *(Martin, 1981)*. Alimenté par les sources Aberchane et Ain Tit Zil, il traverse la plaine de Guigou et pénètre le Moyen Atlas plissé le long du versant nord de Jbel Tichoukt. L'Oued Guigou devient l'Oued M'Dez entre la confluence de l'Oued Maâsser et l'Oued Zloul. L'Oued Maâsser reçoit l'Oued Zloul, affluent principal, et l'Oued Beni Alaham et Bechna. L'Oued Guigou rejoint l'Oued Sebou à partir de la confluence avec l'Oued Zloul jusqu'à la retenue Allal Al Fassi.

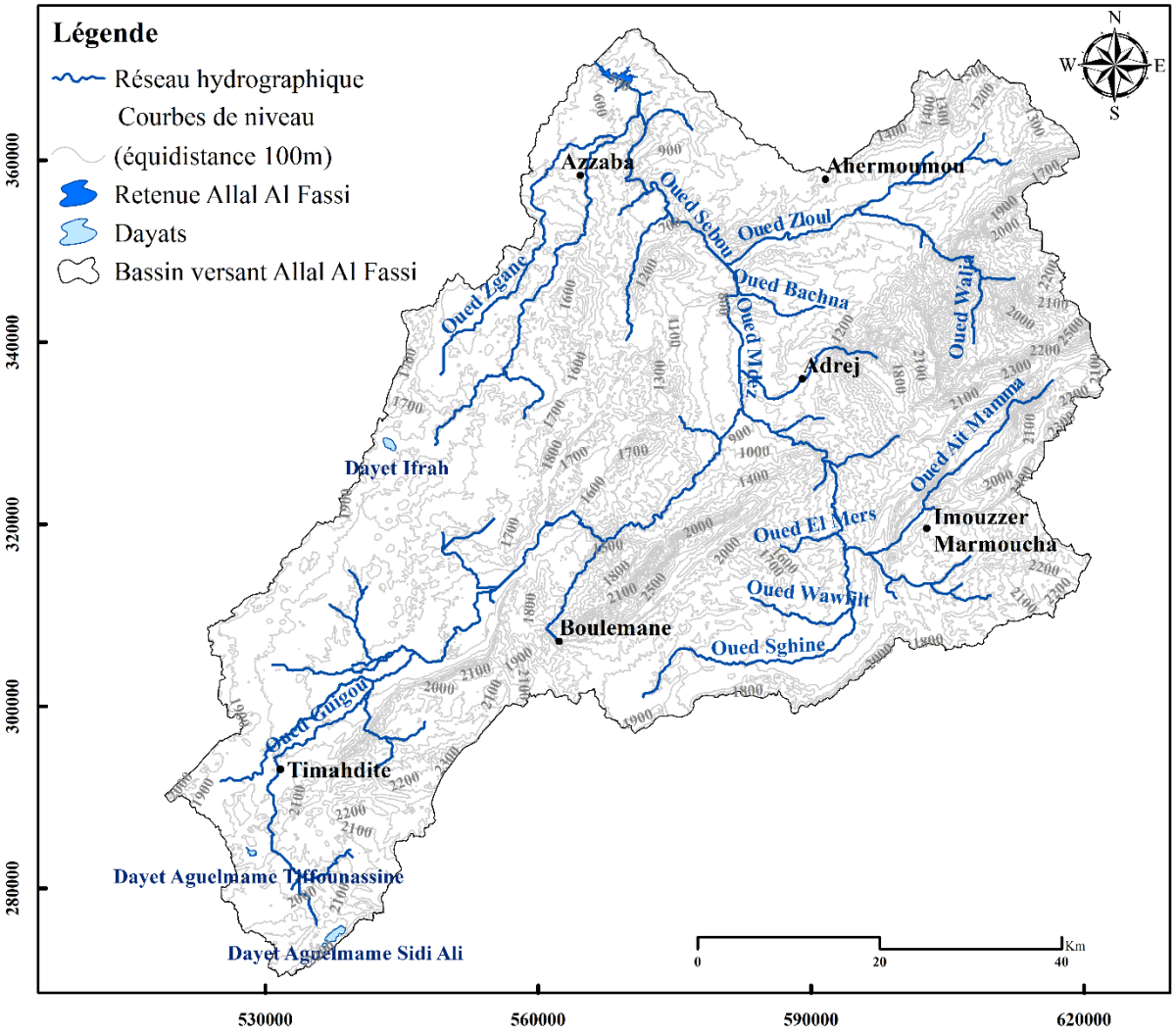


Figure 11: Hydrographie du bassin versant Allal Al Fassi

IV.1. Topologie de l'écoulement

L'écoulement dans le bassin versant Allal Al Fassi est assuré par les oueds à flux épisodique, temporaire et saisonnier généralement concentré dans un lit. Il s'agit de ruisseaux de montagne à écoulement épisodique, d'écoulement diffus où l'eau n'est pas concentrée en cours d'eau, l'écoulement se produit en multiples petits ruisseaux (lavage de rigole) ou en feuilles d'eau peu profondes (lavage de feuille). Le troisième type d'écoulement diffus peut se produire pendant une forte inondation d'eau boueuse à l'état turbulent.

L'écoulement des oueds drainant le bassin versant Allal Al Fassi est assuré en majorité par les précipitations et la fonte de la neige. Le résultat de cette combinaison explique l'écoulement d'eau en durée plus longue par rapport à la durée moyenne observée dans les cours d'eau principaux au Maroc. La durée prolongée de l'écoulement d'eau s'explique également par l'existence de sources d'eau, dont les principales sont Aïn Sebou, Aïn Timedrine, Aïn

Ouamender, Aïn Tataw, Aïn Titzil et Aïn Aberchane. Les trois sources principales (Aïn Sebou, Aïn Timedrine et Aïn Ouamender) sont géographiquement rapprochées (d'une aire globale d'environ 20 Km^2) mais individualisées en termes de fonctionnement. La Source Aïn Sebou, en amont, est plus importante de par son débit (2,5 l/s) avec des fluctuations saisonnières importantes liées au système karstique développé. Les sources Aïn Timedrine et Aïn Ouamender sont caractérisées par un écoulement permanent et régulier. La source Aïn Tataw est située à Immouzzer Marmoucha, dans la partie orientale du Moyen Atlas septentrional, appartient à la nappe du Moyen Atlas plissé, la source Aïn Titzil est située dans Moyen Atlas tabulaire, exactement dans le Causse de Guigou et la source Aïn Aberchane dans la plaine de Ta'nzoult est permanente en donnant sur une zone marécageuse.

IV.2. Topologie du réseau de drainage

La topologie s'avère importante dans la description du réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi, qui normalement suit le canevas dessiné par la structure et épouse sa morphologie complexe. Le bassin versant Allal Al Fassi est caractérisé par un réseau hydrographique dense et ramifié. Les affluents s'organisent en réseau généralement dendritique et homogène, mais avec des variations localisées. Au Nord, dans la partie aval du bassin versant, le réseau hydrographique est parallèle, témoignant d'une forte densité de drainage et d'une dynamique importante (Figure 12).

L'Oued Zloul, affluent principal de l'Oued Sebou s'écoule dans une cuvette du Moyen Atlas plissé sur une longueur de 51,34 Km. L'Oued Maasser qui draine principalement des zones du Moyen Atlas plissé (synclinaux d'Immouzzer Marmoucha et d'El Mers et la région de Boulemane) est d'une longueur de 36,41 Km. Ses affluents les plus importants sont : Oued Tamghilt long de 34.05 Km, Oued El Atchane long de 13,06 Km, Oued Serghina long de 37,42 Km et Oued Timchilt long de 25.91 Km. L'Oued Guigou coule suivant la direction SW-NE avec un débit de 0.62l/s et une longueur de 110.59 Km. Cet Oued prend naissance à Aguelmame Sidi Ali et draine toute la partie haute du bassin versant (Timahdite, Ain Nokra, plaine de Guigou...) et le synclinal de Skoura.

IV.3. Ordres des cours d'eau

Il existe différentes méthodes de classification du réseau hydrographique. La hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi a été réalisée par la méthode « Strahler Stream Order » *(Strahler, 1952)*, qui est une adaptation de la méthode de Horton *(Horton, 1945)*. Selon la méthode de Strahler, les tributaires sans affluent à la tête du réseau

hydrographique sont désignés comme des cours d'eau du premier ordre. Deux de ces cours d'eau du premier ordre se rejoignent et forment un cours d'eau du deuxième ordre. Un cours d'eau du troisième ordre est le résultat de la réunion de deux cours d'eau du deuxième ordre. Le collecteur principal est toujours de l'ordre du cours d'eau le plus élevé. En effet, un la réunion de deux cours d'eau du premier et deuxième ordre donnent naissance à un cours d'eau du deuxième ordre.

Le réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi présente une longueur des cours d'eau de 4987,40 Km. Son cours d'eau principal est d'ordre 6 selon l'échelle de Strahler témoignant d'un réseau hydrographique dense et ramifié à fort potentiel érosif (Tableau 5).

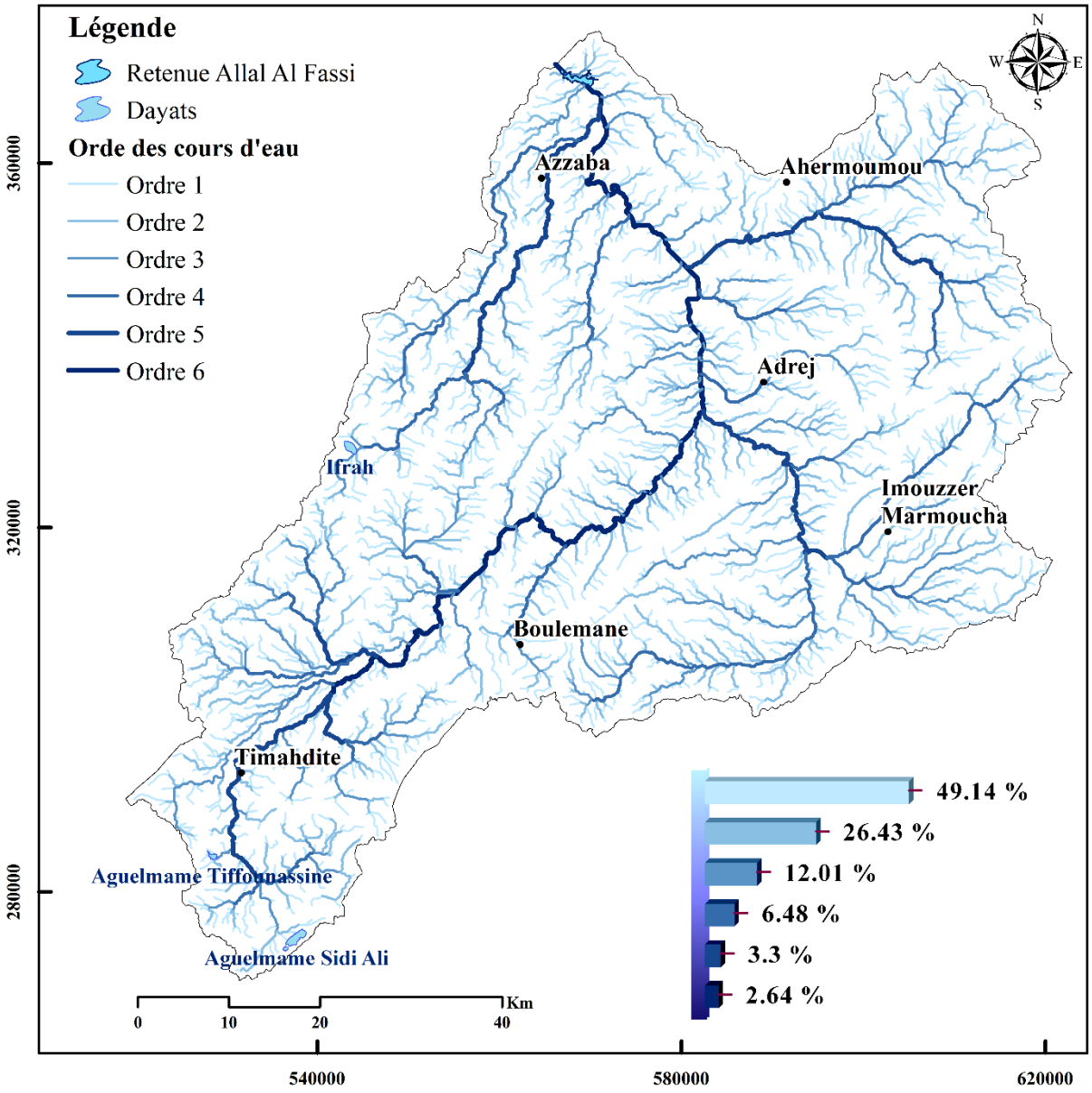


Figure 12: Carte de l'ordre des cours d'eau du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 5: Ordre et longueur des cours d'eau du bassin versant Allal Al Fassi

Ordre des cours d'eau	Longueur totale Km
Ordre 1	2451,00
Ordre 2	1318,00
Ordre 3	598,80
Ordre 4	323,40
Ordre 5	164,80
Ordre 6	131,40
Total	4987,40

V. Développement du réseau de drainage

Le réseau de drainage peut être décrit quantitativement à l'aide de plusieurs paramètres tels que la densité de drainage, la densité hydrographique, le coefficient de torrentialité et le temps de concentration.

V.1. Densité de drainage

La densité de drainage D_d est l'une des caractéristiques topographiques du bassin versant permettant d'évaluer les ressources en eau souterraine d'une région. Elle caractérise le chevelu hydrographique et se définie comme la longueur totale du réseau hydrographique (Li) par unité de surface du bassin versant (A). Elle a pour dimension l'inverse d'une longueur (Equation 8).

La densité de drainage reflète les contrôles climatiques, la nature du substrat sur lequel le réseau de drainage est formé et peut donner une idée sur l'âge du réseau de drainage. En effet, les pluies à forte intensité créent une force érosive suffisante pour vaincre la résistance des terrains en pentes pour former des canaux de cours d'eau. Les valeurs importantes de densité de drainage peuvent également être associées à une topographie très abrute, un substrat érodable et une couverture végétale réduite fragilisant la résistance des pentes à l'érosion hydrique.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} = 0,93 \ {}^{km}/_{Km^2} \qquad (8)$$

La densité du drainage du bassin versant Allal Al Fassi est de l'ordre de 0,93 Km/Km^2, une valeur témoignant d'un bassin versant moyennement drainé. Cette valeur de densité du drainage peut être expliquée par la perméabilité du substratum et le relief accidenté du bassin versant Allal Al Fassi. En effet, la densité de drainage et l'écoulement sont liés aux mêmes facteurs et principalement la perméabilité des roches. Lorsque la capacité d'infiltration diminue, le ruissellement s'intensifie *(Carlston, 1963)*. Horton *(1945)* établit qu'à partir de la ligne de

partage des eaux superficielles, une longueur minimale de terrain est nécessaire pour produire un volume d'écoulement suffisant pour déclencher l'érosion (distance critique ou ceinture de non érosion). Cette longueur de terrain dépend de plusieurs facteurs comme l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies, la pente topographique mais principalement la capacité d'infiltration du sol. Plus la capacité d'infiltration est grande, plus l'écoulement souterrain est plus important et le ruissèlement est faible. Cependant, une très grande surface est alors nécessaire pour la concentration d'un débit suffisant pour le déclenchement de l'érosion et l'espacement entre les talwegs. Lorsque la densité de drainage est faible, la capacité d'infiltration est importante et lorsque le ruissellement s'affaiblie l'écoulement souterrain s'intensifie.

V.2. Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de cours d'eau par unité de surface du bassin versant. Elle s'exprime par l'équation 9.

$$\boldsymbol{F = \frac{\sum N_i}{A} = 0,92\ Km^{-2}} \qquad (9)$$

Avec :
F : densité hydrographique ;
N_i : nombre de cours d'eau ;
A : superficie du bassin versant.

La densité hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi est égale à 0,92 Km^{-2}. Cette faible valeur témoigne de l'importance de la perméabilité du substratum, de l'importance du couvert végétal et du relief accidenté.

V.3. Coefficient de torrentialité C_t

Le coefficient de torrentialité est l'indice expressif de la densité du drainage. Plus il est élevé plus la torrentialité augmente traduisant ainsi une grande agressivité des averses. Il tient compte de la fréquence des thalwegs élémentaires (de faible ordre, généralement d'ordre 1) par la densité de drainage (Equation 10).

$$\boldsymbol{C_t = D_d \times \frac{N_1}{A} = 0,41 \frac{Km}{Km^4}} \qquad (10)$$

Avec :
C_t : coefficient de torrentialité ;
D_d : densité de drainage ;
N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1 ;
A : superficie du bassin versant.

Dans le bassin versant Allal Al Fassi, le coefficient de torrentialité est égal à 0,41 Km/Km^4. Cette faible valeur est essentiellement liée à la forte perméabilité des formations géologiques.

V.4. Temps de concentration Tc

Le temps de concentration est le temps que met une goutte d'eau provenant de la partie la plus éloignée du bassin versant pour atteindre l'exutoire. Il est calculé par la formule de Giondotti (Equation 11).

$$T_C = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1,5\,L}{0,8\sqrt{H_{moy} + H_{min}}} = 11,957\,h \qquad (11)$$

T_C : temps de concentration (heure)
A : superficie du bassin versant (km^2)
L : longueur du cours d'eau principal (km)
H_{moy} : altitude moyenne (m)
H_{min} : altitude minimale (m)

Le temps de concentration des eaux ne dépend pas seulement de la forme du bassin versant mais aussi de la lithologie (les formations perméables favorisent l'infiltration au dépend du ruissellement en augmentant le temps de concentration des eaux à l'exutoire), la pluviométrie (plus l'intensité pluviale est importante plus le temps de concentration des eaux est court) et le relief. Le temps de concentration des eaux dans le bassin versant Allal Al Fassi est de 11h57min42s. Ce temps de concentration important, ralentie la réponse hydrologique du bassin versant, favorise une érosion linéaire et régressive et rend faibles les débits de pointes et les crues.

VI. Lois de composition du réseau de drainage

Suivant leurs théories sur l'ordre des cours d'eau, Horton et Strahler ont proposé un ensemble de lois concernant la relation entre les cours d'eau, le nombre et la longueur moyenne des cours d'eau dans un bassin versant.

VI.1. Rapport de confluence

Le rapport de confluence ou rapport de bifurcation traduit le taux de bifurcation des cours d'eau dans un bassin versant. Il s'exprime par le rapport du nombre de cours d'eau d'ordre (n) sur le nombre de cours d'eau d'ordre (n+1) (Equation 12). C'est un nombre sans dimension

formulant le développement du réseau de drainage. Le rapport de confluence varie entre 3 et 5 pour une région donnée où la géologie n'exerce aucune influence sur le réseau de drainage (Strahler, 1964).

$$R_C = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (12)$$

Avec :
R_C : rapport de confluence des cours d'eau ;
N_n : nombre de cours d'eau d'ordre n ;
N_{n+1} : nombre de cours d'eau d'ordre suivant.

Le rapport de confluence renseigne sur le temps de concentration des sédiments dans le réseau de drainage, plus ce rapport est faible, moins il y aura de bifurcation au niveau du réseau de drainage et plus les évacuations des sédiments vers l'aval se feront rapidement *(Gravelius, 1914)*. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, les valeurs du rapport de confluence (R_c) varient entre 0,92 et 2,21 (Tableau 6), avec une valeur moyenne de R_c de 1,66 (inférieur à 3). Les irrégularités du R_c d'un ordre à l'autre dépendent du développement géologique et lithologique du bassin versant *(Strahler 1964a)*. Ces faibles valeurs témoignent de la distorsion minimale du schéma de drainage et de la grande influence de la géologie sur l'écoulement des eaux superficielles dans le bassin versant Allal Al Fassi.

Tableau 6: Rapport de confluence dans le bassin versant Allal Al Fassi

Ordre des cours d'eau	Nombre des cours d'eau (N_n)	R_C
Ordre 1	2402	2,21
Ordre 2	1088	1,78
Ordre 3	612	1,53
Ordre 4	400	1,86
Ordre 5	215	0,92
Ordre 6	234	***

VI.2. Rapport de longueur

Le rapport des longueurs des cours d'eau correspond au rapport de la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre (n+1) et la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre (n) (Equation 13).

$$R_L = \frac{L_{n+1}}{L_n} \quad (13)$$

Avec :
R_L : rapport de longueur ;
L_{n+1} : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n+1 (Km) ;
L_n : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n (Km).

Le rapport de longueur des cours d'eau est considéré comme un facteur important en relation à la fois avec la composition du drainage et le développement géomorphologique des bassins *(Horton, 1945)*. Plus le rapport de longueur est élevé plus les cours d'eau d'ordre supérieur sont importants et plus l'évacuation des sédiments est facile *(Llamas, 1985)*. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, les valeurs R_L varient entre les cours d'eau d'ordre différent (Tableau 7). Les valeurs varient entre 0,73 et 1,19. Cette variation du rapport de longueur des cours d'eau d'un ordre à un autre pourrait être attribué à la variation de la pente et de la topographie, indiquant le stade de jeunesse tardif du développement géomorphologique dans les cours d'eau du bassin versant Allal Al Fassi.

Tableau 7: Rapport de longueur du réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi

Ordre des cours d'eau	Nombre des cours d'eau	Longueur totale	Longueur moyenne	R_L
Ordre 1	2402	2451,00	1,02	***
Ordre 2	1088	1318,00	1,21	1,19
Ordre 3	612	598,80	0,98	0,81
Ordre 4	400	323,40	0,81	0,83
Ordre 5	215	164,80	0,77	0,95
Ordre 6	234	131,40	0,56	0,73

VII. Conclusion

L'évaluation des caractéristiques physiographiques du bassin versant Allal Al Fassi est basée sur le traitement du modèle numérique de terrain par les systèmes d'information géographique (SIG). L'extraction des différentes caractéristiques géomorphologiques et le calcul des différents indices qui influencent l'écoulement des eaux de surface a permis la compréhension de toutes ses fonctionnalités.

Le modèle numérique de terrain (MNT) a permis l'extraction automatique du réseau hydrographique et la délimitation du bassin versant Allal Al Fassi qui s'étale sur une superficie de 5352,2 Km^2 avec un périmètre de 463,11 Km. Les indices morphométriques (surface, indice de compacité, rectangle équivalent et longueur des cours d'eau), montrent que la forme du bassin versant Allal Al Fassi est allongée suivant une direction Nord-Est/ Sud-Ouest, parallèle

au sens de l'écoulement général des eaux. Cette forme allongée ralentie sa réponse hydrologique, favorise une érosion linéaire et régressive et rend faibles les débits de pointes et crues en raison du temps de concentration important de 11h57min42s.

L'étude des caractéristiques topographiques permet de déterminer la morphologie et le comportement hydrologique du bassin versant. A partir de la carte hypsométrique trois zones d'altitudes ont été différenciées, la partie amont qui correspond à la zone des hautes altitudes notamment au niveau de Jbel Bou Iblane, Tichoukt, Aguelmame Sidi Ali et Imouzzer Marmoucha, la partie intermédiaire caractérisée par des altitudes de plus en plus agressives et la partie avale où les altitudes atteignent 344m à l'exutoire du bassin versant Allal Al Fassi. L'allure générale de la courbe hypsométrique du bassin versant Allal Al Fassi est presque analogue à celle de la courbe théorique dite mature, état intermédiaire d'un vieux bassin versant où l'altitude varie peu et d'un jeune bassin versant où l'altitude varie beaucoup. Elle correspond à un stade d'érosion relativement développé. Cet état exprime une dégradation des conditions bioclimatiques (climat et couvert végétal) associée à l'action anthropique intensifiée. Les dimensions du rectangle équivalent montrent que la longueur est presque dix fois sa largeur.

Les pentes faibles à moyennes prédominent dans le bassin versant Allal Al Fassi. Les classes des pentes inférieures à 41,40% occupent environ 82% de la superficie totale. Ces faibles pentes sont en faveur de l'infiltration des eaux de surface surtout lorsque la perméabilité du substrat la permet. Les pentes les plus fortes longent les zones montagneuses principalement dans le Moyen Atlas plissé, notamment au niveau de Jbel Bou Iblane et Jbel Tichoukt. Ces pentes sont dominées par une orientation vers Nord-Ouest perpendiculaire à la disposition morphostructurale.

L'écoulement des eaux de surface dans le bassin versant Allal Al Fassi est assuré par des oueds à flux épisodique et saisonnier, et à caractère torrentiel et par un écoulement diffus. Le réseau hydrographique est drainé par trois oueds principaux, Oued Guigou, Oued Maasser et Oued Zloul, dont l'écoulement est assuré majoritairement par les précipitations et la fonte de neige, et l'existence de sources d'eau, notamment Aïn Sebou, Aïn Timedrine, Aïn Ouamender, Aïn Tataw, Aïn Titzil et Aïn Aberchane.

Le réseau hydrographique de 4987,40 Km de longueur est dense et ramifié. En épousant la morphologie complexe du bassin versant, les affluents s'organisent en réseau généralement dendritique et homogène, avec des variations locales, notamment dans la partie avale où ils deviennent parallèles. Le réseau hydrographique du bassin versant Allal Al Fassi témoigne de

la forte densité de drainage et de la dynamique importante. Son cours d'eau principal d'ordre 6 selon l'échelle de Strehler, témoigne d'un réseau à fort potentiel érosif.

La densité du drainage du bassin versant Allal Al Fassi d'ordre de 0,93Km/Km^2, sa densité hydrographique de 0,92 Km^{-2} et son coefficient de torrentialité de 0,41, le qualifient comme un bassin moyennement drainé avec substratum perméable et relief accidenté. Les rapports de confluence et de longueur des cours d'eau variant d'un ordre à un autre, témoignent de la variation de la topographie et de la pente indiquant le stade de jeunesse tardif du développement géomorphique dans les cours d'eau du bassin versant Allal Al Fassi. Les faibles valeurs de ces rapports témoignent de la distorsion minimale du schéma de drainage et de la grande influence de la géologie sur l'écoulement des eaux superficielles dans le bassin versant Allal Al Fassi.

Tableau 8: Récapitulatif des caractéristiques morphométriques du bassin versant Allal Al Fassi

Caractéristiques morphométriques du bassin versant Allal Al Fassi	
Surface	5352,2 Km^2
Périmètre	463,11 Km
Indice de compacité	1,77
Longueur du rectangle équivalent	252,73 km
Largeur du rectangle équivalent	26,04 m
Altitude maximale	2959 m
Altitude minimale	344 m
Altitude moyenne	1537,82 m
Altitude médiane	1679 m
Pente moyenne	10,27 %
Indice de pente globale	0,06 %
Indice de pente de Roche I_p	0,09 %
Densité du drainage	0,93 Km/Km^2
Densité hydrographique	0,92 Km^{-2}
Coefficient de torrentialité	0,41 Km/km^4
Temps de concentration T_c	11,957 h

CHAPITRE III

Facteur climatologie

▪ Chapitre III : Facteur climatologie

L'évaluation d'un phénomène naturel nécessite les données quantitatives afin d'apprécier son évolution à l'échelle du bassin versant. L'influence des facteurs locaux perturbe à un tel degré que l'effet des facteurs plus généraux ne peut aboutir à des corrélations significatives qu'en partant d'un très grand nombre de déterminations *(Fournier, 1949)*. Le but de ce chapitre est d'évaluer l'influence des facteurs climatiques sur l'érosion des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi, pourvoyant d'envasement cumulé dans sa retenue.

Tout en se formant, le sol s'expose inévitablement à l'action des agents atmosphériques. Ils sont doués d'un pouvoir érosif : l'énergie cinétique des gouttes d'eau en libérant des constituants en tombant confère aux pluies une capacité de détachement des particules du sol et le vent selon son mécanisme complexe met en mouvement les particules du sol. L'eau de pluie lorsqu'elle ruisselle et le vent lors de son déplacement, entraînent les particules détachées et assurent leur transport à des distances plus ou moins grandes. Au sens fondamental du terme, les facteurs climatiques sont les précurseurs de l'érosion et la nature du sol, la végétation et le relief viennent seulement pour la conditionner en ne négligeant pas l'action anthropique.

Le bassin méditerranéen constitue une zone de transition majeure entre le climat tropical et le climat tempéré des moyennes latitudes. La complexité et l'hétérogénéité de sa géographie et les différentes expositions de ses versants lui procurent une grande hétérogénéité climatique. Il est considéré comme étant un « hot spot » climatique, sensible aux effets des changements climatiques *(Stocker et al., 2014)*. Son climat est caractérisé par des hivers doux et humides, sous l'influence de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) *(Hurrell, 1995)* qui affecte la région depuis les 500 dernières années *(Luterbacher et al., 2002)*. L'Oscillation Nord Atlantique (ONA) est responsable d'une partie des variations climatiques influençant la distribution des précipitations surtout dans la partie occidentale du bassin méditerranéen *(Mariotti et Dell'Aquila, 2012)*.

Le climat au Maroc se distingue par une variabilité climatique très contrastée spatialement et temporellement, de par sa situation géographique bien particulière entre l'océan Atlantique, la mer Méditerranée et le désert du grand Sahara *(Tramblay et al., 2012)*.

Le climat dans le Moyen Atlas est globalement de type méditerranéen de montage subhumide *(Rippey 1982 ; Neijari, Gille et Fancois, 2001)* avec des régimes thermique et pluviométrique fortement saisonniers à hiver froid et été chaud et sec. Ils sont contrôlés par le système cyclonique extratropical se déplaçant en direction de l'Atlantique Nord oriental, de

l'Europe de l'Ouest et de la Méditerranée. Les mécanismes climatiques sont étroitement liés aux Oscillations Nord-Atlantique (NAO) *(Lamb et Peppler, 1991 ; Cheddadi et al., 1998)*.

I. Précipitations

En tout lieu du globe où l'érosion hydrique se manifeste, les précipitations constituent l'agent causal et le facteur prépondérant de celle-ci *(Ellison, 1944 ; Ekern, 1950)*. L'étude de leur action nécessite celle des relations entre leurs caractères (hauteur, intensité, fréquence), le ruissellement et l'érosion *(Fournier, 1949)*. L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la destruction des agrégats de sol en surface *(Boiffin, 1976 ; Le Bissonnais, 1988)*, du détachement des fragments de sol et de leur transport *(Free, 1952 ; Bradford et Huang, 1996 ; Leguédois, 2010)*.

Le bassin versant Allal Al Fassi s'inscrit dans un contexte climatique méditerranéen de montagne à hiver froid. Néanmoins le compartimentage morphostructural du Moyen Atlas, son orientation SW-NW (effet mixte de zonalité et de continentalisation) et son exposition déterminent aussi un compartimentage bioclimatique (Nejjari et al., 2001, Nejjari, 2002). Globalement, le bassin versant Allal Al Fassi se trouve dans une zone de transition d'un point de vue climatique. Le climat est plutôt humide avec d'importantes précipitations sur le Causse moyen atlasique notamment sur les hauts reliefs et semi-aride dans les cuvettes comme la plaine de Guigou et le bassin du Maasser, du fait de la protection des reliefs. Les nuances climatiques dans le bassin versant Allal Al Fassi résultent à la fois des différences morphologiques du relief et du phénomène de continentalisation.

L'érosivité des pluies désigne le potentiel érosif de la pluie *(Bergsma et al., 1996)* qui dépend de l'intensité et des caractéristiques de la goutte de pluie, notamment la taille, la vitesse et la forme *(Riezebos et Epema, 1985 ; Salles et al., 2000 ; Erpul et al., 2002)*. L'érosivité des pluies est généralement exprimée en fonction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie *(Quansah, 1981 ; Poesen, 1985)*. Dans le bassin versant Allal Al Fassi situé entièrement dans le Moyen Atlas, sous climat méditerranéen, l'érosion hydrique et le ruissellement sont favorisés par des précipitations souvent sous formes d'averses en plus des précipitations régulières pendant l'hivers.

I.1. Données pluviométriques

La répartition des précipitions permet de calculer la lame d'eau tombée sur la totalité du bassin versant Allal Al Fassi (Figure 13). Pour ce faire, nous avons combiné différentes

méthodes qui prennent en considération l'hypsométrie, la topographie et l'exposition des versant, notamment la méthode des isohyètes et la méthode de Thiessen.

L'analyse statistique des séries chronologiques des données météorologiques est une des méthodes d'identification de la variabilité climatique. Cette analyse consiste à mettre en œuvre des tests statistiques d'homogénéité et de fiabilité des séries. Les séries des données de précipitations sont soumises aux tests statistiques, notamment le test statistique du simple et double cumul afin de tester leur homogénéité et les éventuelles anomalies.

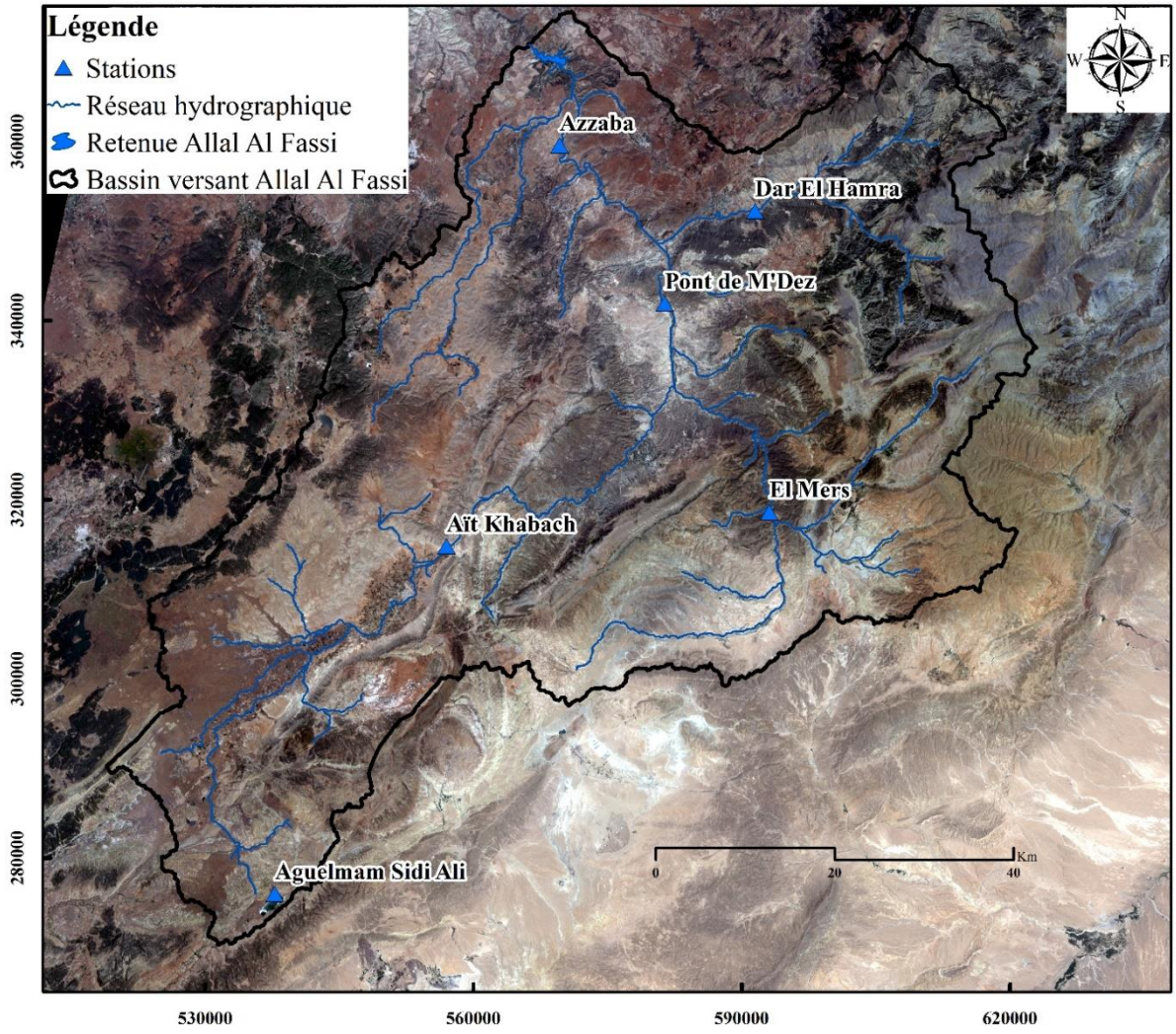


Figure 13: Localisation géographique des stations pluviométriques dans le bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 9: Caractéristiques des stations pluviométriques du bassin versant Allal Al Fassi

Stations	N° station	Oued	Province	X	Y	Z	Période
Aguelmam Sidi Ali	198	(Lac)	Khénifra	537800	276000	2078	1980 - 2020
Aït Khabach	748	Guigou	Boulmane	557000	314800	1478	1980 - 2020
El Mers	5824	M'Aasser	Boulmane	593100	318620	1210	1981 - 2020

Pont de M'Dez	6248	M'Dez	Sefrou	581400	341900	725	1980 - 2020
Azzaba	1496	Sebou	Sefrou	569650	359575	478	1980 - 2020
Bge. Allal Fassi	876	Sebou	Sefrou	566649	370542	390	1991 - 2020
Dar El Hamra	2778	Zloul	Sefrou	591500	352250	830	1982 - 2020
Tabouda	7283	Aoudour	Taounate	524250	461600	180	1980 - 2020
Bab Ouender	1568	Ourgha	Taounate	579500	440100	540	1980 - 2020
Galez	3924	Amzez	Taounate	555320	439850	214	1980 - 2020

I.1.1. Inventaire des données

Le réseau stationnel constitue la base de toute étude de variabilité spatiale et temporelle des précipitations *(Willmott et al., 1994)*. Les stations météorologiques retenues ont été choisi en se basant sur la durée de la chronique, l'importance des lacunes de données et leur position géographique par rapport au bassin versant Allal Al Fassi. Les dix stations initiales (Tableau 9), montrent clairement une dissymétrie Nord-Sud et Est-Ouest, une absence de stations au Sud et à l'Ouest du bassin versant sur lesquelles il faut s'appuyer pour rendre compte du gradient pluviométrique vers le SE et l'Est. Les six stations retenues sont localisées toutes à l'intérieur du bassin versant avec une chronique commune entre la plupart des stations entre 1980 et 2020. Cette dernière constitue une période de référence pour atteindre les objectifs de la présente étude. Les données pluviométriques sont récoltées auprès de l'ABHS (Agence du Bassin Hydrologique de Sebou).

La densité des stations est relativement faible, tenant compte de la forte variabilité pluviométrique existante de par la situation géographique du bassin versant. Le tableau 10 regroupe les six stations retenues, indiquant leur situation géographique (longitude, latitude et altitude selon la projection conique conforme de Lambert/Datum Merchich/Nord Maroc) avec leurs caractéristiques (numéro de station, oued, province, nombre de sous bassins versants et période de mesures).

Tableau 10: Stations météorologiques retenues dans le bassin versant Allal Al Fassi

Stations	N° station	Oued	Province	SBV	X	Y	Z	Pi (mm)	Période
Aguelmam Sidi Ali	198	(Lac)	Khénifra	(Lac)	537800	276000	2078	414,86	1980 - 2020
Aït Khabach	748	Guigou	Boulmane	12540	557000	314800	1478	347,88	1980 - 2020
El Mers	5824	M'Aasser	Boulmane	1000	593100	318620	1210	403,08	1981 - 2020
Pont de M'Dez	6248	M'Dez	Sefrou	3474	581400	341900	725	289,59	1980 - 2020
Azzaba	1496	Sebou	Sefrou	4736	569650	359575	478	333,62	1980 - 2020
Dar El Hamra	2778	Zloul	Sefrou	670	591500	352250	830	446,49	1982 - 2020

I.1.2. Critique des données

Après dépouillement des données brutes mensuelles de précipitations en tenant compte des périodes de recouvrement et des lacunes, il parait que la période commune pour la majorité des stations est de 40 ans, entre 1980 et 2020.

Avant d'entamer l'analyse et le traitement des données brutes captées par un observateur ou un instrument de mesure, il est recommandé de faire une évaluation critique et un prétraitement afin de déterminer la fiabilité des données et contrôler la série de données à retenir. Dans cet optique, une analyse critique est réalisée sur l'ensemble des données climatologiques de chaque station de mesure. Elle correspond au test d'homogénéité et aux tests graphiques des simples et doubles cumuls des totaux pluviométriques annuels afin de détecter d'éventuelles anomalies dans la série de données.

L'homogénéisation des données consiste à identifier les séries pluviométriques et vérifier s'il n'y a pas d'erreurs systématiques qu'il convient de rechercher et de corriger. Pour s'assurer de la fiabilité de l'information, il convient de tester la série des données de la station référence pour le reste des stations.

Le test de la Médiane ou test de Mood est choisi pour vérifier l'homogénéité des séries des précipitations des six stations choisies. Son application consiste en la détermination de la médiane de la série et à classer ses valeurs par ordre croissant, suivies d'un dénombrement des éléments situés de part et d'autre de la médiane en affectant un « + » aux valeurs supérieures à la médiane et un « - » aux valeurs qui lui sont inférieures. Soit la variable aléatoire X, représentant la série des données de précipitations de la station et N étant le nombre d'années de cette série. Le nombre de valeurs inférieures et supérieures à la médiane est égal à la quantité notée N_s. La quantité T_s est égale à la taille de la plus grande suite de « + » ou de « - » dans la série chronologique (Tableau 11).

L'hypothèse nulle du test de la médiane pour un seuil de signification de 95% est vérifiée si :

$$\boldsymbol{N_S > \frac{1}{2}\left(N + 1 - U_{1-\frac{\propto}{2}}\sqrt{N+1}\right)}$$

$$\boldsymbol{T_S < 3,3\ (log_{10}\ N + 1)}$$

Avec : $U_{1-\alpha/2}$ = 1,96, qui représente la valeur de la variable centrée réduite de Gauss correspondant à une probabilité de 1- α, avec α=5%. La taille de la série étant N=40, N_s=14,22

et T_s=8,59. L'hypothèse nulle du test de la Médiane est vérifiée pour la station de Aguelmam Sidi Ali et la station El Mers (Tableau 12).

Tableau 11: Test de la Médiane

N_i	Aguelmam Sidi Ali		Ait Khabach		Azzaba		Dar El Hamra		El Mers		El M'Dez	
1	331,00	-	372,60	+	293,80	-	0,00	-	0,00	-	273,50	-
2	442,90	+	396,30	+	292,20	-	0,00	-	192,70	-	306,60	-
3	238,60	-	204,20	-	264,80	-	125,90	-	232,00	-	156,70	-
4	310,60	-	217,90	-	341,20	+	393,40	+	253,50	+	235,50	+
5	311,30	-	235,00	-	236,10	-	386,90	-	341,90	-	225,00	-
6	**421,10**	-	281,20	-	292,80	-	499,30	-	463,80	-	269,30	-
7	288,10	-	272,00	-	270,60	-	380,20	-	325,70	-	199,60	-
8	429,80	+	262,20	-	364,70	+	473,50	+	443,70	+	332,90	+
9	482,20	+	363,00	+	263,60	-	390,80	-	**397,30**	-	219,20	-
10	652,90	+	466,90	+	345,60	+	472,90	+	608,70	+	371,10	+
11	604,30	+	433,80	+	379,20	+	600,00	+	618,00	+	354,90	+
12	488,20	+	471,50	+	388,20	+	511,00	+	461,50	+	367,80	+
13	372,10	-	188,60	-	248,40	-	322,60	-	306,80	-	225,20	-
14	353,70	-	286,10	-	329,30	+	445,80	+	424,60	+	329,90	+
15	399,60	-	312,30	-	249,40	-	329,10	-	388,10	-	226,60	-
16	661,10	+	518,60	+	470,10	+	680,60	+	705,80	+	458,90	+
17	441,40	+	463,10	+	323,90	+	496,90	+	388,20	+	352,00	+
18	460,30	+	413,40	+	346,90	+	485,80	+	424,30	+	297,80	+
19	244,90	-	222,20	-	228,20	-	316,80	-	245,10	-	263,70	-
20	274,30	-	**325,00**	-	209,00	-	218,60	-	322,30	-	185,40	-
21	348,30	-	316,90	-	346,40	+	412,20	+	399,60	+	**286,10**	+
22	444,20	+	405,50	+	368,50	+	524,90	+	451,10	+	294,90	+
23	467,10	+	441,90	+	381,40	+	442,50	+	372,20	+	265,60	+
24	458,10	+	363,90	+	442,00	+	568,90	+	441,10	+	365,90	+
25	309,90	-	280,70	-	266,30	-	349,60	-	266,40	-	226,70	-
26	372,20	-	439,10	+	471,70	+	478,60	+	439,70	+	314,30	+
27	330,90	-	268,50	-	294,60	-	342,50	-	393,60	-	250,20	-
28	389,50	-	340,20	-	287,30	-	381,80	-	401,70	-	276,30	-
29	480,40	+	526,00	+	589,80	+	818,20	+	828,10	+	380,00	+
30	789,10	+	635,90	+	667,90	+	627,40	+	561,60	+	483,70	+
31	598,60	+	454,30	+	383,70	+	539,40	+	556,50	+	385,00	+
32	287,30	-	329,20	-	280,30	-	386,40	-	377,20	-	273,80	-
33	649,90	+	437,30	+	445,60	+	704,60	+	498,30	+	386,10	+
34	441,90	+	277,00	-	267,40	-	**412,00**	-	402,00	-	263,60	-
35	495,60	+	479,00	+	**319,00**	+	571,40	+	527,00	+	440,60	+
36	286,30	-	255,60	-	279,00	-	319,30	-	302,20	-	213,50	-
37	349,20	-	302,30	-	232,50	-	377,00	-	265,00	-	228,60	-
38	469,00	+	362,60	+	288,30	-	375,80	-	340,40	-	311,10	-
39	539,60	+	379,60	+	357,80	+	559,30	+	342,80	+	258,00	+
40	336,10	-	256,10	-	235,20	-	244,80	-	406,10	-	303,20	-

L'homogénéité de la série des deux stations étant vérifiée, les deux séries peuvent servir de base pour la détection d'erreurs systématiques dans les séries des autres stations.

Tableau 12: Résultats du test de la Médiane

	Aguelmam Sidi Ali	Ait Khabach	Azzaba	Dar El Hamra	El Mers	El M'Dez
Médiane	425,45	351,40	306,80	412,10	398,45	281,20
N	40	40	40	40	40	40
N_S calculé	14,22	14,22	14,22	14,22	14,22	14,22
T_S calculé	8,59	8,59	8,59	8,59	8,59	8,59
N_S de la série	19	20	20	20	20	20
T_S de la série	4	11	19	18	7	11
Pour N_S	19 > 14,22	20 > 14,22	21 > 14,22	22 > 14,22	23 > 14,22	24 > 14,22
Pour T_S	4 < 8,59	11 > 8,59	19 > 8,59	18 > 8,59	7 < 8,59	11 > 8,59
Homogénéité de la série	**Homogène**	**Hétérogène**	**Hétérogène**	**Hétérogène**	**Homogène**	**Hétérogène**

I.1.3. Homogénéisation des données

Toute étude statistique doit s'appuyer sur des données fiables et contrôlées. A cet égard et afin d'assurer la cohérence des données à l'échelle régionale, un inventaire de la qualité des séries de données des stations choisies, en ayant pour but de réaliser une analyse critique, est effectué.

L'application du test graphique du simple et double cumul des totaux pluviométriques annuels a permis de tester l'homogénéité des données utilisées. La pente des droites et la régression R^2 obtenues par les graphiques montrent que R^2 est variable et supérieure à 99% en expliquant presque 100% de la variabilité des données permet de constater les bonnes relations entre les valeurs des stations (Figures 14 et 15).

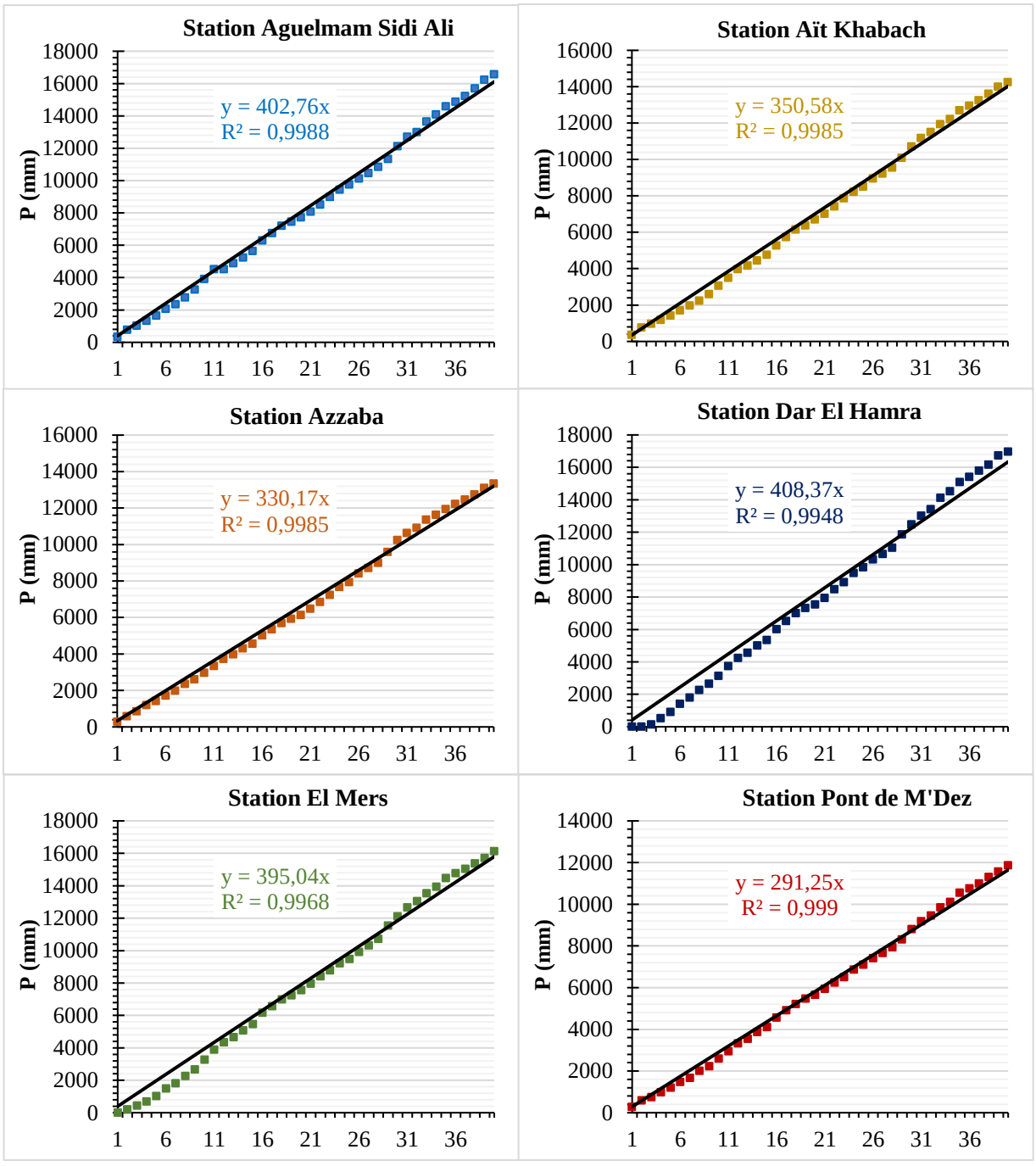


Figure 14: Méthode du simple cumul des données pluviométriques annuelles des stations du bassin versant Allal Al Fassi

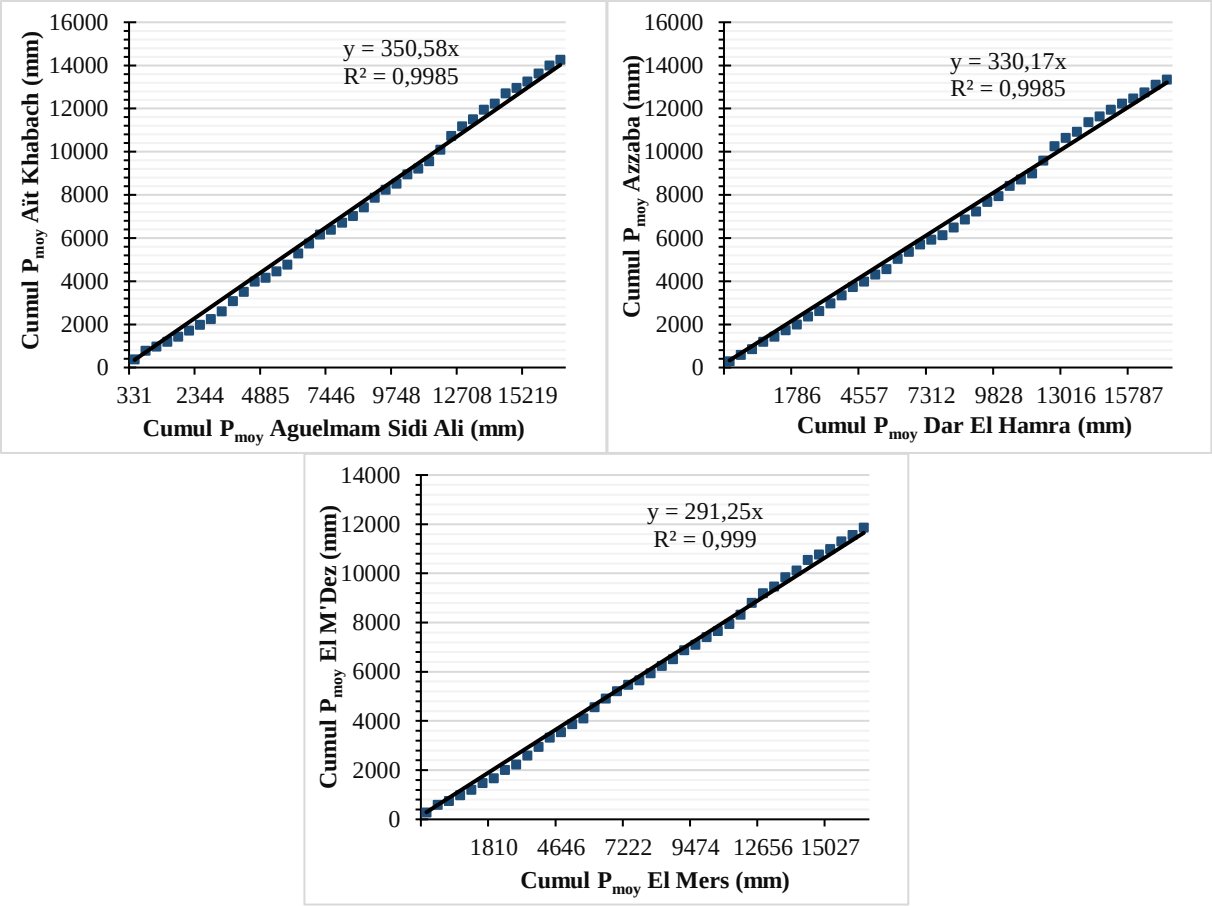


Figure 15:Exemples de la méthode du double cumul des données pluviométriques des stations du bassin versant Allal Al Fassi

I.1.4. Correction et comblement des lacunes des données

Généralement, les séries de données climatiques récoltées ne sont ni homogènes ni complètes. En effet, dans tout enregistrement continu, un manque de données peut être causé par différents problèmes de ruptures liés à un changements de capteur, de site ou d'analyse de la variable par un bris d'appareil ou autre circonstance fortuite *(Alexandersson et Moberg, 1997)*. Afin de remédier à ces difficultés, il est nécessaire d'estimer les données manquantes afin de compléter la série. L'ensemble des séries de précipitation sont comblées par des méthodes des corrélations station par station *(Dubreuil, 1974)*. La régression linéaire R^2 qui permet d'étudier la force d'association entre deux variables linéaires *(Dumolard et al., 2003)*, est utilisée pour combler les lacunes des séries de données pluviométriques. La droite de régression représente la tendance moyenne de corrélation entre x et y. Le but est de linéariser la représentation du phénomène, soit la forme y=Ax+B. Cette méthode de comblement consiste à comparer les données climatiques brutes de l'ensemble des stations aux données de réanalyses. La valeur remplaçant les données manquantes des séries est calculée par l'équation :

$$\boldsymbol{Valeur\ comblée = valeur + biais\ calculés\ par\ régression\ linéraire}$$

Les stations Aguelmam Sid Ali et Dar El Hamra sont projetées sur un diagramme de dispersion pour la même période d'observation (Figure 16). La projection des précipitations annuelles observées sur le diagramme de dispersion montre l'existence d'une dispersion des points aboutissant à une faible corrélation entre les deux stations avec un coefficient de détermination R^2=0,57 qui confirme l'hypothèse. Après correction des valeurs erronées de la station Dar El Hamra, la corrélation est devenue claire et le coefficient de détermination R^2 est significatif qui passe de 0,57 à 0,72. La droite de régression régissant la relation entre les stations Aguelmam Sidi Ali et Dar El Hamra correspond à l'équation 14.

$$\boldsymbol{P_{an,\ Dar\ El\ Hamra} = 0,77 * P_{an,\ Aguelmam\ Sidi\ Ali} + 95,55} \qquad \boldsymbol{(14)}$$

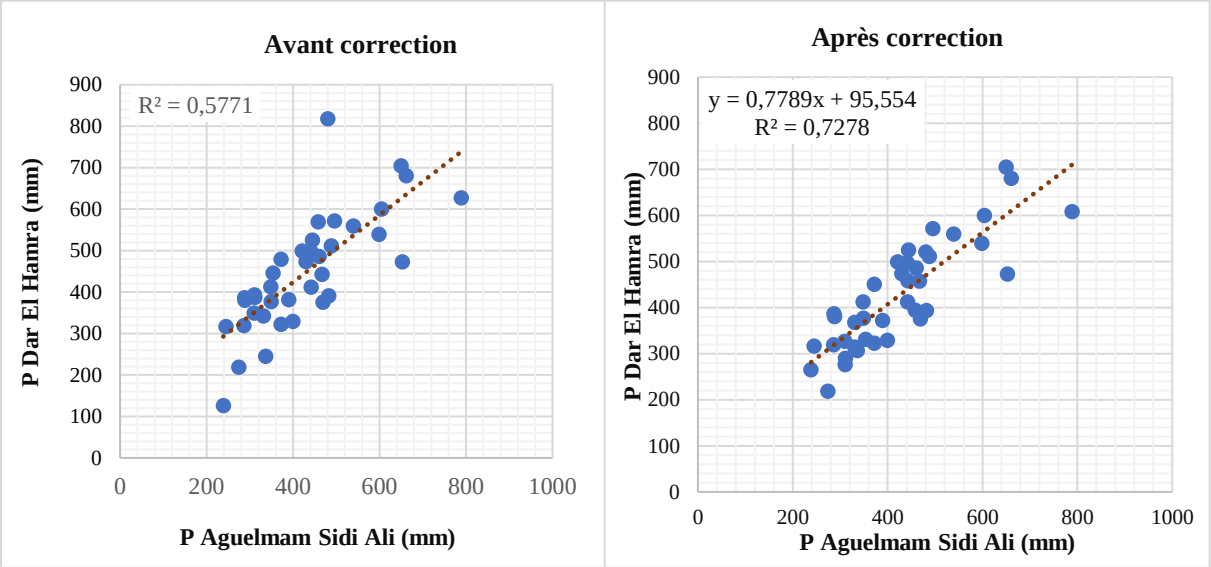


Figure 16: Diagrammes de dispersion des stations Aguelmam Sidi Ali et Dar El Hamra

I.2. Régime des précipitations

La variabilité inter et intra annuelle des précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi est mise en évidence à partir de données pluviométriques de six stations (Tableau 10).

I.2.1. Précipitations mensuelles moyennes

L'étude des précipitations moyennes mensuelles a permis de visualiser la répartition des pluies au cours d'une année hydrologique. La représentation graphique donne une vue générale sur la variabilité mensuelle des apports pluviométriques dans le bassin versant Allal Al Fassi (Figure 17). L'histogramme montre des hauteurs moyennes mensuelles très variables d'un mois

à l'autre et une augmentation des précipitations du septembre à novembre et du février à mai, pour toutes les stations hormis la station Dar El Hamra qui montre une augmentation des précipitations du novembre jusqu'au mai. De manière générale, la pluviométrie continue toute au long de l'année. Toutes fois, les mois juin et juillet sont les mois les plus secs, voire complètement secs. Ce fut, par exemple, le cas de quelques années de la période référence au niveau de station Azzaba notamment, 1982, 1984, 1985, 1988, 1996, 1997, 1998, 1999, 2001, 2004, 2006, 2007, 2010, 2012, 2014, 2015, 2016 et 2017.

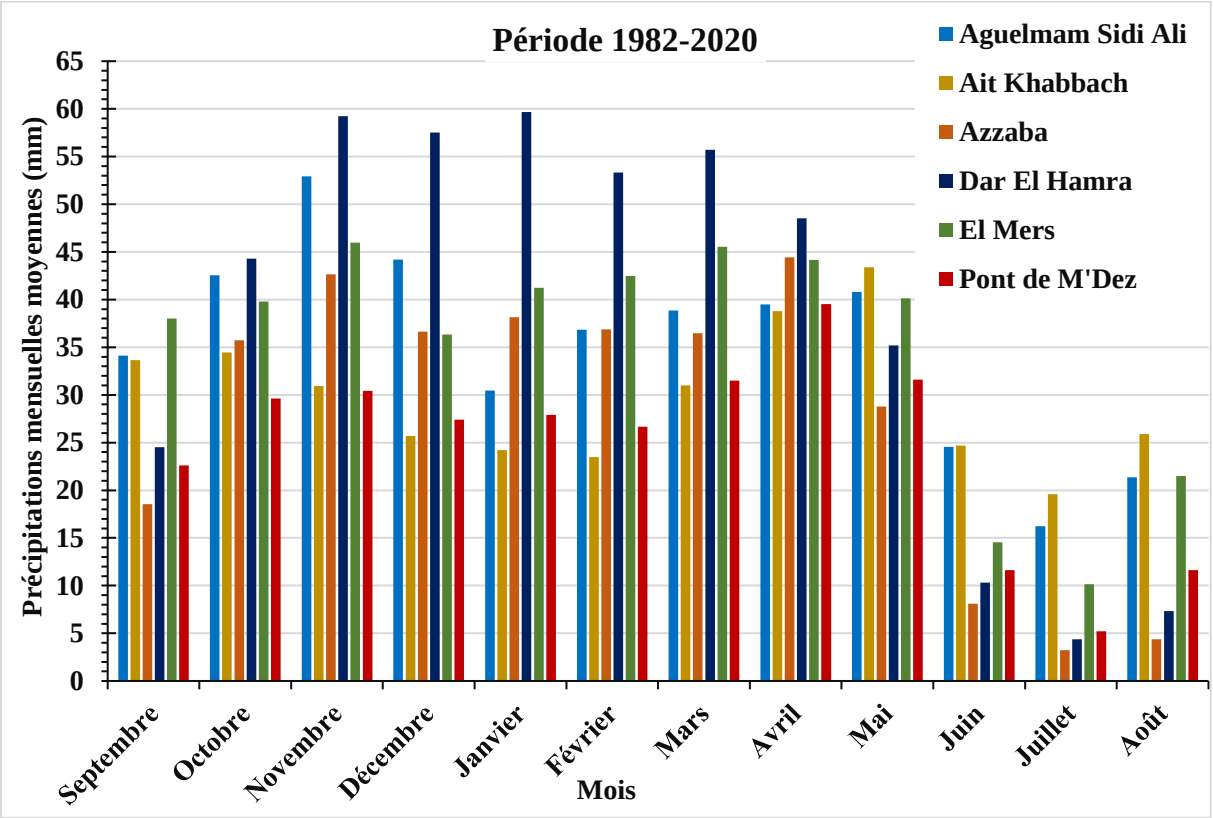


Figure 17: Précipitations mensuelles moyennes dans le bassin versant Allal Al Fassi

I.2.2. Précipitations annuelles moyennes

La représentation graphique des précipitations annuelles moyennes de la période 1980-2020 permet d'avoir une vue générale du comportement de la pluviométrie dans le bassin versant Allal Al Fassi. Globalement la moyenne interannuelle des précipitations est de 376,23 mm, mais une très grande variation s'exprime autour de cette moyenne. Selon les stations, les années 2008, 2009 et 2010 furent les plus arrosées, avec une moyenne de 626,75 mm pour l'année 2009-2010. Tandis que les années 1982, 1992 et 2000, furent les moins arrosées avec une moyenne de seulement 207,28 mm. Soit une amplitude interannuelle de 419,47 mm, ce qui

traduit le caractère instable et très variable de la pluviométrie dans le bassin versant Allal Al Fassi (Figure 18).

Pour mieux comprendre le comportement de la pluviométrie dans le bassin versant Allal Al Fassi, il convient de rappeler que plusieurs facteurs y interagissent, notamment le relief, la végétation et les masses d'air. Le relief conditionne la répartition des précipitations par l'effet orographique du fait de l'ascension des masses d'air ou les positions d'abris aux flux dominants *(Chow et al., 1988)*. Globalement, l'augmentation des précipitions accompagne celle des altitudes. Néanmoins, cette augmentation dépond aussi de l'exposition aux vents dominants et des conditions synoptiques. L'appartenance du Maroc au bassin méditerranéen, fait qu'il bénéficie d'un climat méditerranéen, doux et relativement humide en hiver et chaud et sec en été. Le bassin méditerranéen est sous l'influence de la branche descendante de la circulation de Hadley en été et des flux de l'Ouest de l'Océan Atlantique en hiver *(Bolle, 2002)*.

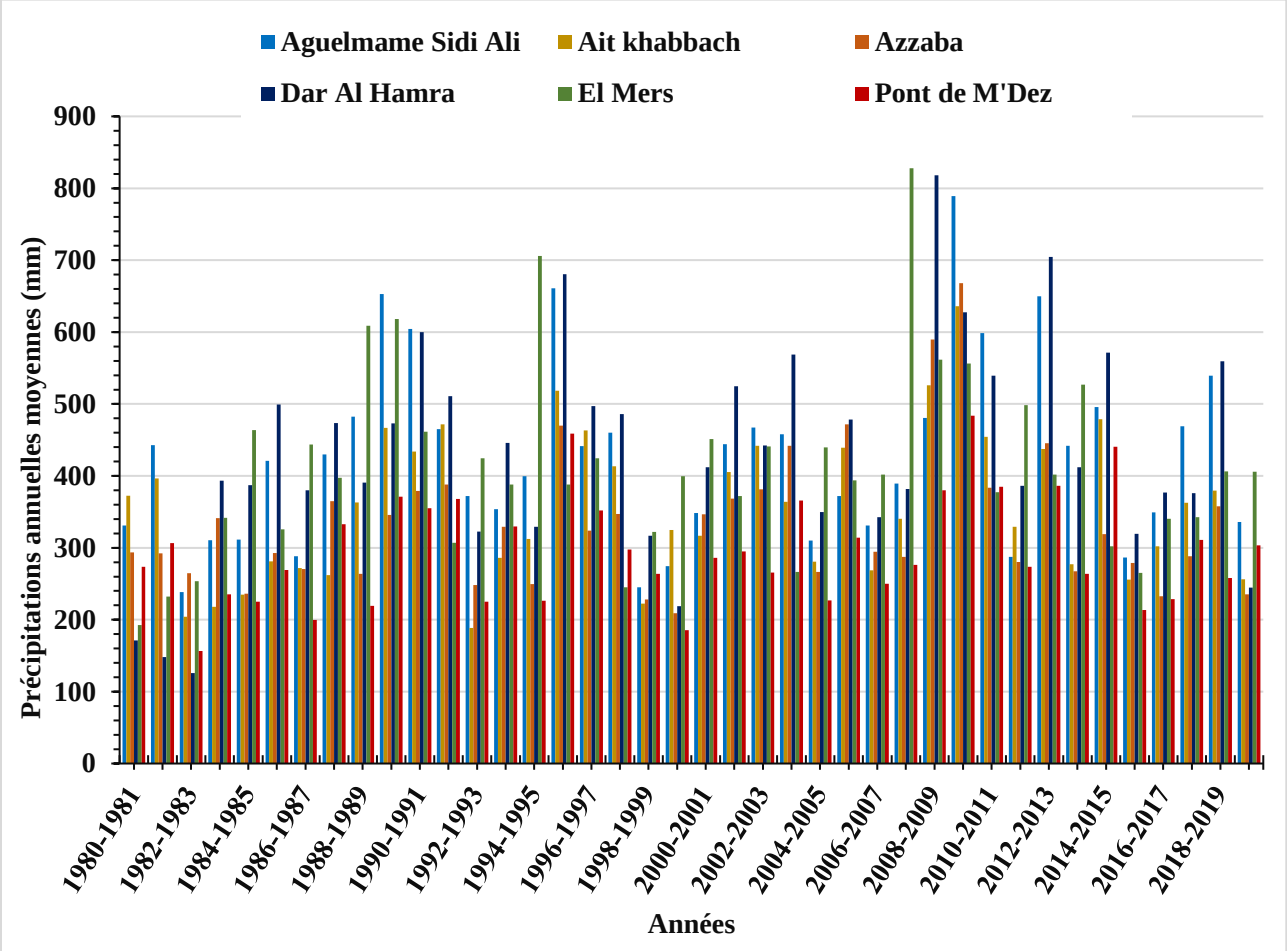


Figure 18: Evolution interannuelle des précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi (1980-2020)

Les variations de précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi sont liées aux circulations d'air, qui sont à leur tour régies par les reliefs montagneux. C'est ainsi que les

parties, N-NE (station Aït Khabach) et S-SO (station Aguelmam Sidi Ali) sont les mieux arrosées par leur exposition aux influences océaniques. Les vents chargés en humidité venant de l'Ouest buttent sur les massifs montagneux internes de la chaîne sur lesquels ils s'épuisent presque complètement. Arrivés à la ride terminale, leur concentration n'est plus alors suffisante pour donner naissance aux pluies, notamment à la station d'El Mers (1210m d'altitude), la station Aguelmam Sidi Ali (2078 m d'altitude) et la station Dar El Hamra (830m d'altitude).

La végétation très variée dans le bassin versant Allal Al Fassi, participe à l'évapotranspiration d'où la formation de cumulo-nimbus provoquant des précipitations presque toute l'année.

I.2.3. Variations interannuelles des précipitations

D'une année à l'autre, les quantités de précipitations sont très variables dans le bassin versant Allal Al Fassi, comme le montrent les courbes des variations interannuelles des précipitations au niveau des six stations (Figure 19).

Le tableau 13 contient les indicateurs permettant de mettre en exergue la variabilité des précipitations, notamment l'écart-type, le coefficient de variabilité et le coefficient d'irrégularité qui témoignent de la forte variabilité des hauteurs interannuelles des précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi.

L'écart-type, étant un indicateur de dispersion *(Pearson, 1893)*, a permis de mesurer le degré d'homogénéité des précipitations au niveau de chaque station. Ainsi, plus il est élevé plus la dispersion est grande. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, l'écart-type varie entre 75,37 au niveau de la station Pont de M'Dez et 137,45 au niveau de la station Dar El Hamra. Ce qui signifie que chaque année connait une différence probable de 137,45 mm de plus ou de moins par rapport à la moyenne interannuelle au niveau de la station Dar El Hamra, soit un coefficient de 31% (Tableau 13). Le coefficient d'irrégularité met en évidence le lien entre les extrémités de la série des données pluviométriques par le calcul du rapport de l'année la plus arrosée et l'année la moins arrosée (Tableau 13). Il faut noter ainsi qu'entre deux années successives, il pourrait se manifester une différence très élevée, notamment au niveau de la station Dar El Hamra de 692,3 mm, ce qui témoigne d'une forte variabilité interannuelle des précipitations.

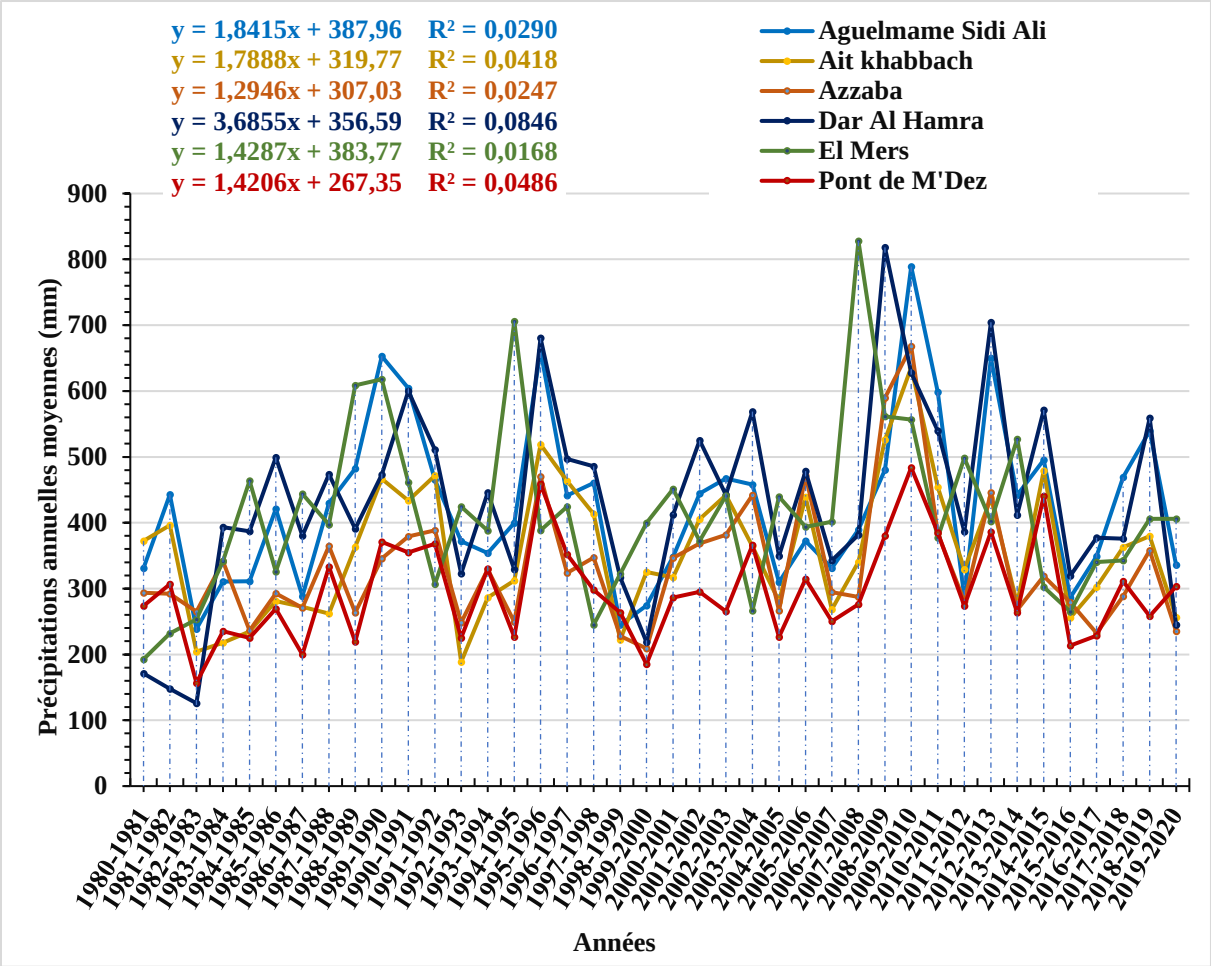


Figure 19: Variations interannuelles des précipitations dans le bassin versant Allal Al Fassi (1980-2020)

Tableau 13: Récapitulatif des principaux indicateurs de la variabilité pluviométrique

Stations	P_i (mm)	P_{min}	P_{max}	Moyenne	Médiane	Ecart type	Coefficient de variation	Coefficient d'irrégularité
Aguelmam Sidi Ali	414,86	238,6	789,1	424,70	422,90	126,56	30%	3,31
Aït Khabach	347,88	188,6	635,9	356,44	356,44	102,25	29%	3,37
Azzaba	333,62	209	667,9	333,57	319,00	96,38	29%	3,20
Dar El Hamra	446,49	125,9	818,2	446,49	442,50	137,45	31%	6,50
El Mers	403,08	192,7	828,1	413,25	400,65	130,65	32%	4,30
Pont de M'Dez	289,59	156,7	483,7	296,47	286,10	75,37	25%	3,09

L'indice pluviométrique appelé aussi variable centrée réduite, permet de mesurer l'écart par rapport à une moyenne établie sur une longue période en se référant aux données des stations *(Nicholson, 1994)*. Il est défini comme variable centrée réduite et calculé à l'aide de l'équation 15 *(Lamb P., 1982)*.

$$I_p = {(X_i - X_m)}/{\sigma} \qquad (15)$$

X_i : pluviométrie de l'année i ;

X_m : pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence ;

σ : écart type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence.

L'indice pluviométrique traduit ainsi un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considérée par rapport à la période de référence (Figure 20). Les années excédentaires dont le cumul annuel de précipitation est supérieur à la moyenne, varient entre 20 années pour les stations Aguelmam Sidi Ali et Aït Khabach et 24 années pour la station d'El Mers. Et les années déficitaires dont le cumul annuel des précipitations est inférieur à la moyenne interannuelle sur la période de 40 ans (1980-2020), varient entre 16 années pour la station d'El Mers et 20 années pour les stations Aguelmam Sidi Ali et Aït Khabach (Tableau 14).

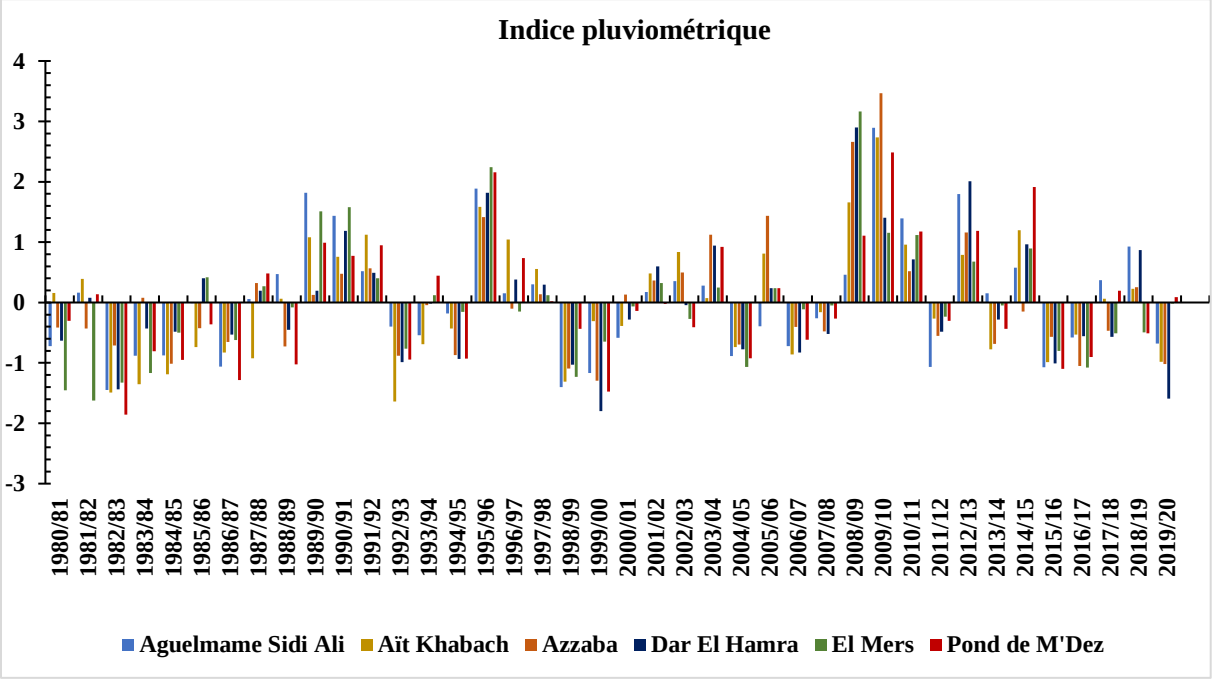


Figure 20: Indice pluviométrique Ip dans les stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 14:Récaputilatif des résultats de l'indice Ip

Stations	P_i (mm)	Ecart type	Coefficient de variation	Coefficient d'irrégularité	Année d'écart max à la moy	Ecart max à la moyenne	Nb d'années humides	Nb d'années sèches
Aguelmam Sidi Ali	414,86	126,56	30%	3,31	2009 - 2010	366,72	20	20
Aït Khabach	347,88	102,25	29%	3,37	2009 - 2010	279,46	20	20
Azzaba	333,62	96,38	29%	3,20	2009 - 2010	334,33	17	23
Dar El Hamra	446,49	137,45	31%	6,50	2008 - 2009	369,91	18	22
El Mers	403,08	130,65	32%	4,30	2008 - 2009	419,76	16	24
Pont de M'Dez	289,59	75,37	25%	3,09	2009 - 2010	187,23	18	22

La représentation graphique de cet indice a permis de calculer les courbes de tendances linéaires de chaque station en montrant l'augmentation graduelle des précipitations à partir de l'année 1997/1998 au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali et de l'année 1999/2000 au niveau des autres stations (Figure 21).

En moyenne, sur les quarante années constituant la période référence (1980-2020), 18 années sont excédentaires contre 22 déficitaires. Cependant, les excédents sont plus prononcés et différencié par leurs écarts à la moyenne très élevés, tandis que les déficits se révèlent moins aigus. De plus, les vingt dernières années furent marquées par des excédents très prononcés notamment l'année 2008/2009 et l'année 2009/2010 respectivement avec des excédents de 394,84 mm et 291,94 mm. Ceci explique la tendance générale à la hausse des précipitations.

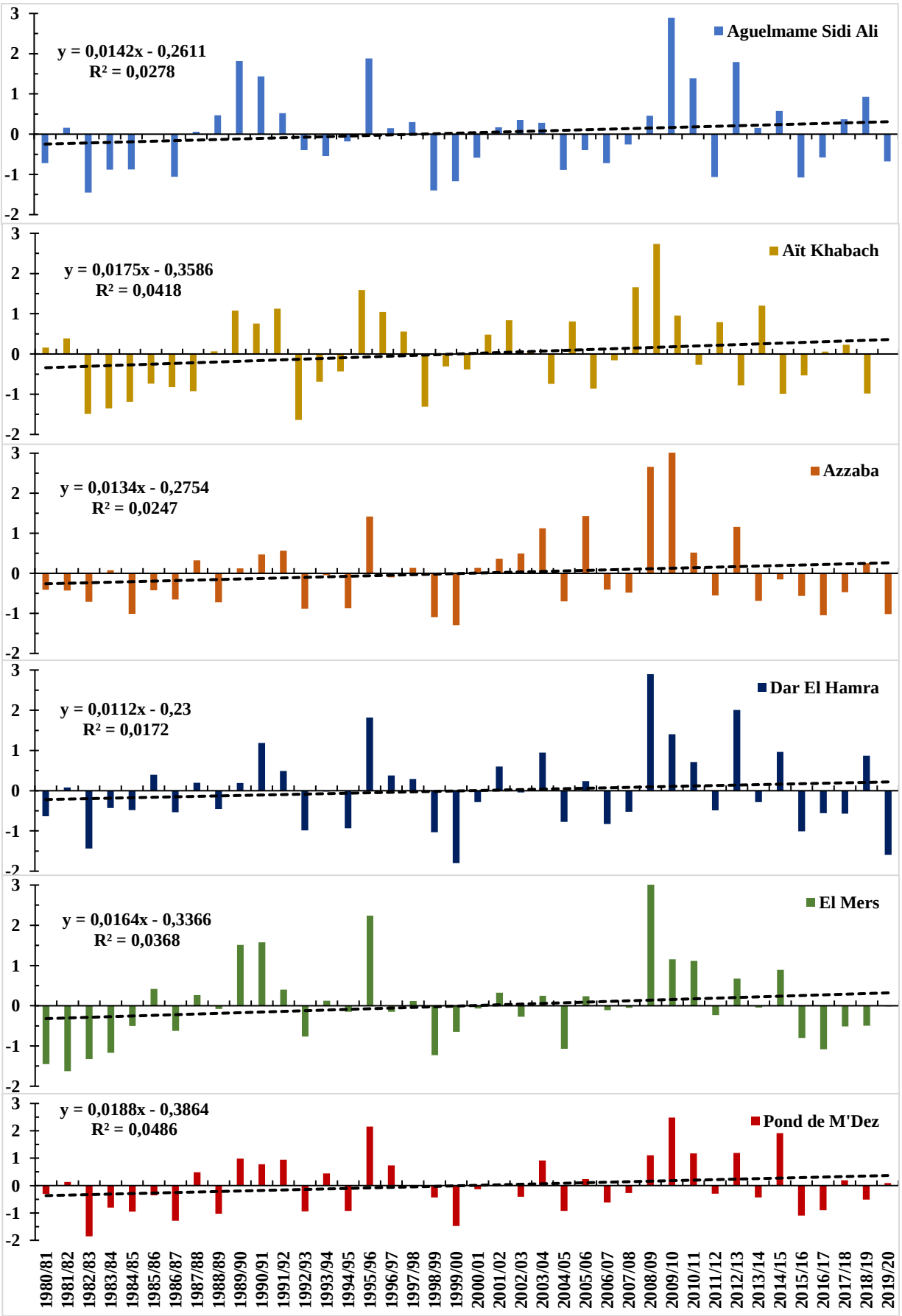


Figure 21: Indice pluviométrique Ip des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

I.3. Lame d'eau moyenne tombée

Trois méthodes de calcul de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin versant Allal Al Fassi durant la période référence (1980-2020) ont été choisies. La méthode de la moyenne arithmétique des hauteurs de précipitations relevées aux diverses stations, la méthode de Thiessen et la méthode des isohyètes *(Roche, 1963 ; Castany, 1963 ; Tripet, 1972)*.

I.3.1. Moyenne arithmétique

Les stations considérées pour le calcul de la moyenne arithmétique sont toutes comprises dans le périmètre du bassin versant Allal Al Fassi et par conséquent toutes affectées d'un poids de 1 *(Tripet , 1972)*. Ces stations, au nombre de 6, sont les suivantes : Aguelmam Sidi Ali, Aït Khabach, Azzaba, Dar El Hamra, El Mers et pont de M'Dez. La lame d'eau moyenne tombée dans le bassin versant Allal Al Fassi pour la période référence (1980-2020) calculée selon l'équation 16 est de $\bar{P} = 376{,}23$.

$$\bar{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i \qquad (16)$$

Avec P_i : précipitations moyennes annuelles au niveau de la station i et n : nombre de stations

I.3.2. Méthode des polygones de Thiessen

La méthode de Thiessen attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à la surface d'une zone d'influence présumée qui dépend de la répartition des stations. Elle consiste à tracer autour des stations pluviométriques voisines un polygone formé par les médiatrices des segments de droite reliant ces stations. C'est une méthode arithmétique qui mesure la surface d'influence, dite polygone de Thiessen, de chaque station permettant de calculer la lame d'eau moyenne tombée selon l'équation 17.

$$\bar{P}_{moy.\ Thiessen} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{A} \qquad (17)$$

Avec Pi : précipitations enregistrées à la station i, Ai : superficie du polygone de Thiessen associé à la station i et A : superficie totale du bassin versant.

Le bassin versant Allal Al Fassi a été subdivisé en six polygones représentant entre 10,85% de la superficie totale pour la station Aguelmam Sidi Ali et 27,75% pour la station Dar El Hamra avec respectivement des moyennes de pondération de 96,53mm et 45,3mm. La lame

d'eau moyenne tombée sur une superficie de 5352 Km^2 est de 375,78mm, une valeur très voisine de celle donnée par la moyenne arithmétique (Tableau 15).

L'analyse de la carte des polygones de Thiessen montre que les précipitations les plus importantes (446,49mm) sont localisées dans la partie nord-est du bassin versant qui correspond au polygone d'influence de la station Dar El Hamra, suivie par le polygone de la station Aguelmam Sidi Ali (414,86mm) situé au S-SW du bassin versant (Figure 22).

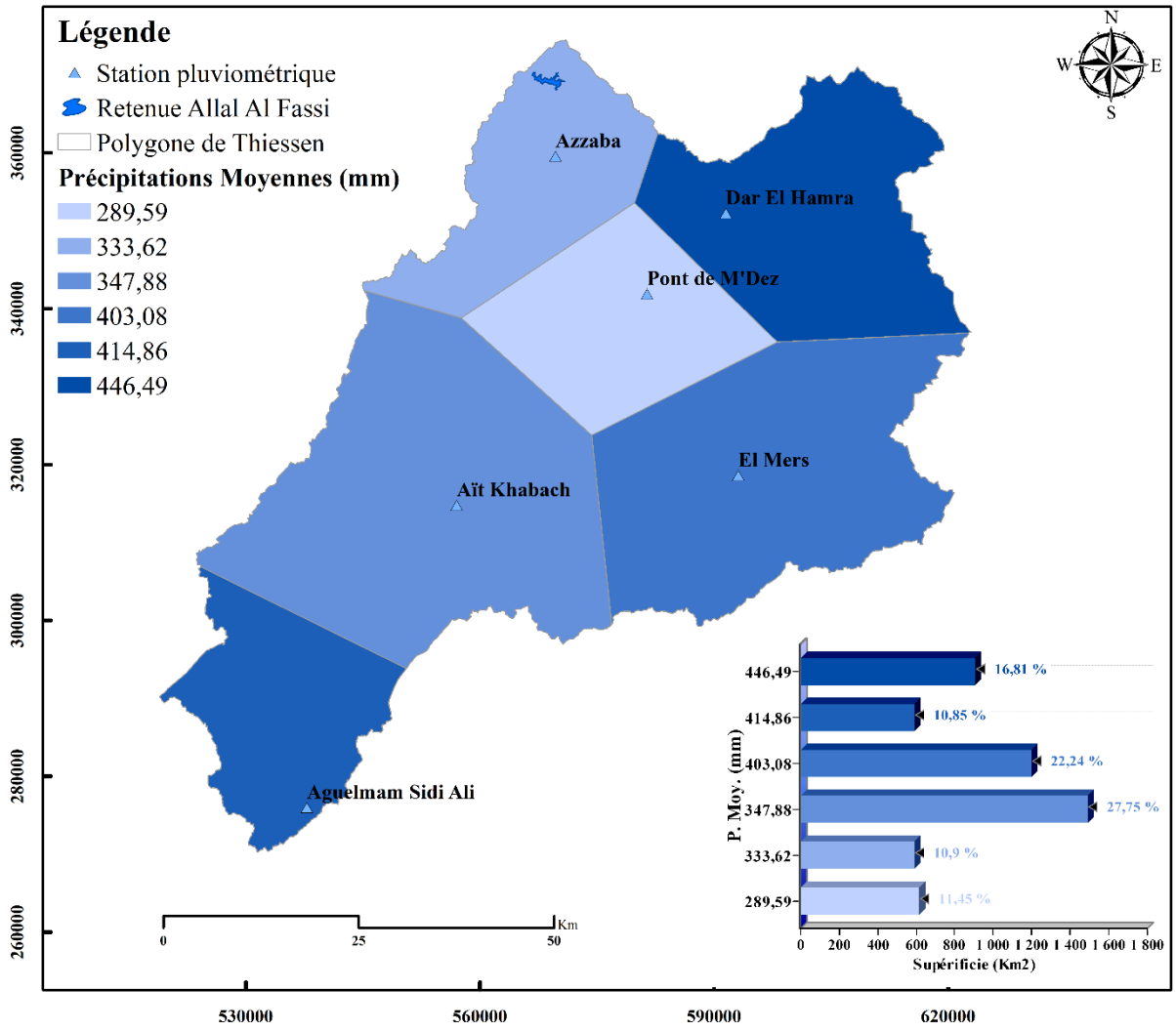


Figure 22: Carte des polygones de Thiessen du bassin versant Allal Al Fassi

Les valeurs minimales des précipitations moyennes occupent la partie centrale du bassin versant notamment au niveau du polygone de la station Pont de M'Dez (Figure 22). Or, en raison des caractères orographiques et la forme allongée du bassin versant Allal Al Fassi, il est probable que ces subdivisions ne correspondent pas aux zones de pluviosité différente. De plus, la qualité des observations pluviométriques n'est pas égale pour chaque station. Thiessen

attribue un poids important pour les mesures qui ne sont pas forcément les plus sûres *(Tripet, 1972)*. Toutes ces restrictions remettent en question l'efficacité de cette méthode.

Tableau 15: Moyenne pluviométrique dans le bassin versant Allal Al Fassi selon la méthode de Thiessen

Stations	**X**	**Y**	**P_i (mm)**	**A_i (Km^2)**	**A_i*P_i/A_T**	**V_i (m^3/an)**
Aguelmam Sidi Ali	537800	276000	414,86	580,90	45,03	$2409,95.10^5$
Aït Khabach	557000	314800	347,88	1485,00	96,53	$5166,06.10^5$
Azzaba	569650	359575	333,62	583,40	36,37	$1946,34.10^5$
Dar El Hamra	591500	352250	446,49	899,70	75,06	$4017,09.10^5$
El Mers	593100	318620	403,08	1190,00	89,63	$4796,65.10^5$
Pont de M'Dez	581400	341900	289,59	612,50	33,14	$1773,74.10^5$
			Total	**5351,5 Km^2**	**375,78 mm**	**2011.10^6 m^3/an**

I.3.3. Méthode des isohyètes

La méthode des isohyètes, qui représente mieux la réalité, est considérée comme la plus précise pour calculer la hauteur des précipitations moyennes dans un bassin versant. Elle est basée sur l'interpolation des précipitations moyennes pour une période de référence, des stations à l'intérieur et autour du bassin versant. La carte des isohyètes considère qu'il existe un gradient de précipitation progressif entre les différentes stations. Une isohyète correspond à une ligne de même pluviosité (des points sur lesquels est tombée la même quantité de pluie) pendant une période donnée. Les isohyètes sont tracées à partir des précipitations moyennes par l'équation 18 (Tableau 16).

$$\overline{P}_{moy.\ isohyètes} = {\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}/{A} \qquad (18)$$

Avec Ai : surface entre deux isohyètes, n : nombre total des isohyètes, Pi : précipitations moyennes entre deux isohyètes et A : superficie totale du bassin versant.

Les isohyètes dans le bassin versant Allal Al Fassi montrent des valeurs comprises entre 282,90mm et 428,73mm. Les superficies associées ne dépassent pas 23,93% de la superficie totale, soit 838,12 km^2.

La répartition de la lame d'eau tombée sur le bassin versant Allal Al Fassi montre une pluviométrie annuelle variable, notamment dans Moyen Atlas plissé, mais ne dépassant pas 428,73mm. Les précipitations sont plus importantes au niveau de la partie N-NE du bassin versant Allal Al Fassi (station Aït Khabach) et la partie S-SW (station Aguelmam Sidi Ali). Ces variations dans le bassin versant Allal Al Fassi sont liées aux circulations d'air, qui sont à

leur tour régies par les reliefs montagneux. Les vents venant de l'Ouest et chargés d'humidité buttent sur les massifs montagneux internes de la chaîne sur lesquels ils s'épuisent presque complètement sous forme liquide et solide. Arrivés à la ride terminale, leur concentration n'est plus alors suffisante pour donner naissance à des fortes pluies. Les précipitations les plus faibles sont enregistrées au niveau de la vallée de M'Dez (282,90mm – 299,11mm), située dans un creux pluviométrique important. La vallée de l'Oued Guigou, située sous le vent des premiers reliefs du Moyen Atlas, est à l'abri des courant perturbés du secteur ouest. Les masses d'air humides après élévation et détente au vent des reliefs, redescendent et se compriment sous le vent entraînant un assèchement de l'air et une diminution des nuages. La variation des précipitations suivant l'altitude traduit parfaitement ces répartitions (Figure 24).

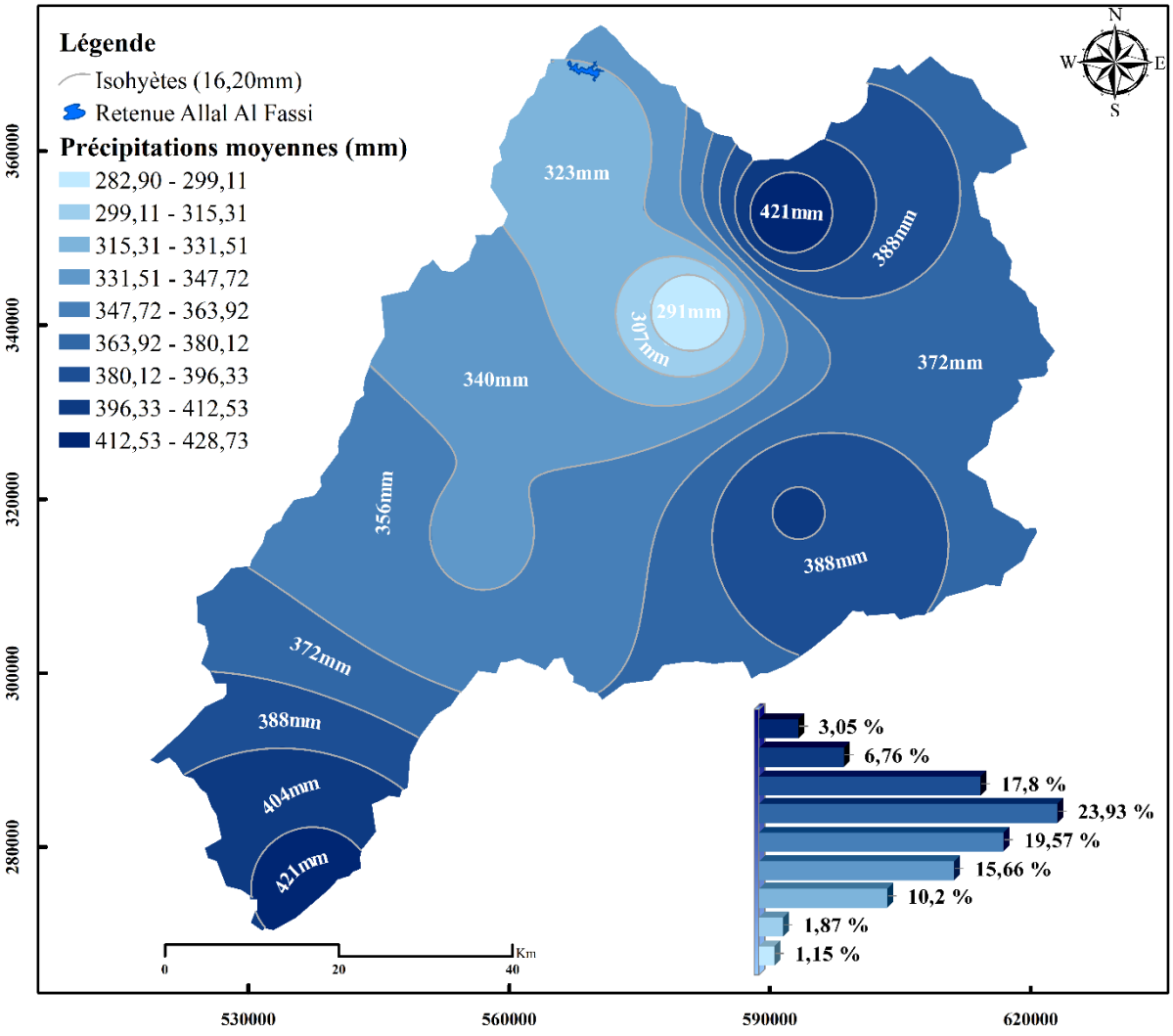


Figure 23: Carte des isohyètes du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 16: Moyenne pluviométrique selon la méthode des isohyètes dans le bassin versant Allal Al Fassi

Précipitations Moyennes annuelles (mm)		P_i (mm)	A_i (Km^2)	$P_i * A_i / A$
Min	**Max**			
282,90	299,10	291,00	61,66	3,35
299,10	315,30	307,20	100,08	5,74
315,30	331,50	323,40	545,90	32,99
331,50	347,70	339,60	838,12	53,18
347,70	363,90	355,80	1047,39	69,63
363,90	380,10	372,00	1280,73	89,02
380,10	396,30	388,20	952,66	69,10
396,30	412,50	404,40	361,80	27,34
412,50	428,70	420,60	163,24	12,83
		Total	5352	363,18

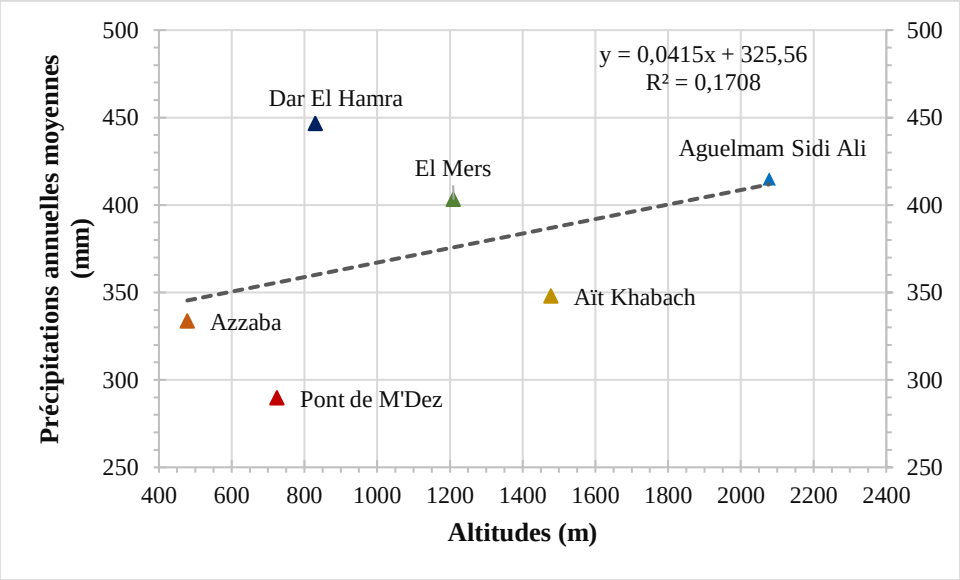


Figure 24: Pluviométrie moyenne annuelle (1980-2020) en fonction de l'altitude des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

I.3.4. Lame d'eau moyenne

Les valeurs de la lame d'eau estimées par les trois méthodes détaillées ci-dessus (la méthode de la moyenne arithmétique des précipitations au niveau des stations, la méthode de Thiessen et la méthode des isohyètes) sont différentes avec un écart de variation entre 0,12% et 3,59% (Tableau 17). Les résultats de la lame d'eau tombée obtenus par la méthode de Thiessen sont très voisins de ceux donnés par la moyenne arithmétique des précipitations des six stations et de différence de 0,12%. Les résultats obtenus par la méthode des isohyètes sont sensiblement différents des deux autres méthodes et de différence de 3,59%.

Les trois méthodes utilisées pour le calcul de la lame d'eau moyenne tombée dans le bassin versant conduisent à des résultats qui diffèrent de moins de 3,6%. Cette différence est considérée faible par rapport aux erreurs qui peuvent affecter les mesures des précipitations. En effet, l'exactitude du calcul de la lame d'eau tombée dans un bassin versant est à considérer en termes de probabilité *(Tripet , 1972)* et quelle que soit la méthode utilisée, elle propose une hypothèse sur la répartition des précipitations entre les stations météorologiques étudiées. De ce fait, les résultats des calculs dépendent donc de la situation des pluviomètres, de leur nombre par rapport à la superficie du bassin versant et de l'hypothèse faite sur la distribution spéciale des précipitations. Cependant, la méthode des isohyètes, étant théoriquement la plus satisfaisante, ne présente pas une grande différence dans le bassin versant Allal Al Fassi et le rapport de la lame d'eau tombée obtenue par la méthode des isohyètes et la moyenne arithmétique des précipitations aux stations est de 0,96. La lame d'eau annuelle tombée dans le bassin versant Allal Al Fassi qui a été prise en considération est celle déterminée par la moyenne arithmétique des précipitations au niveau des six stations étudiées (Tableau 17).

Tableau 17: Lame d'eau annuelle moyenne tombée (la méthode de la moyenne arithmétique des précipitations au niveau des stations, la méthode de Thiessen et la méthode des isohyètes)

Lame d'eau annuelle moyenne tombée			
Moyenne arithmétique	$\overline{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$	**376,23mm**	**2013.10^6 m^3/an**
Méthode des polygones de Thiessen	$\overline{P}_{moy.\ Thiessen} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_i}{A}$	**375,78mm**	**2011.10^6 m^3/an**
Méthode des isohyètes	$\overline{P}_{moy.\ isohyètes} = \sum_{i=1}^{n} A_i P_i / A$	**363,18mm**	**1944.10^6 m^3/an**

La lame d'eau tombée est étroitement liée au phénomène du ruissèlement qui apparaît après saturation du sol en eau et réduction de l'infiltration. Si elle est de faible épaisseur et d'une vitesse d'écoulement faible (faible pente pour une surface importante), l'érosion qui en découle est diffuse. Cette lame d'eau n'est pas capable d'arracher les particules de sols et seules les particules issues de la désagrégation due aux gouttes de pluie (effet splash) sont entraînées. Si la vitesse du ruissèlement de la lame d'eau est forte, des incisions se forment dans le sol et l'érosion se concentre en donnant naissance à des rigoles, voire des ravines.

II. Températures

Après les précipitations, la température est le deuxième élément climatique permettant d'appréhender la variabilité climatique.

Le bassin versant Allal Al Fassi connait un régime thermique marqué par des contrastes thermiques importants. Les températures minimales mensuelles moyennes varient entre 2,5 °C au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali et 11,7°C au niveau de la station Azzaba. Les températures maximales mensuelles moyennes varient entre 19,7°C au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali et 29,3°C au niveau de la station Azzaba. Ce contraste thermique de plus de 17° ne peut être dû qu'au degré de continentalité. La variation de la température entre les deux stations est entretenue non seulement par leurs positions respectives, 2078m et 478m d'altitude mais aussi par leur occupation des sols, une végétation agricole au niveau de la station Azzaba et une forêt au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali. Toutefois, les températures mensuelles moyennes présentent une grande variabilité. Ainsi le mois de janvier est le mois le plus froid au niveau des cinq stations et le mois de juillet est le mois le plus chaud au niveau des stations, Azzaba et Pont de M'Dez et le mois d'aout est le mois le plus chaud au niveau des stations Aguelmam Sidi Ali, El Mers et Timedrine. Ces variations peuvent être dues à la différence d'altitude et d'exposition et à la morphologie locale (Figure 25). Il en ressort une évolution relativement constante des températures mensuelles moyennes au niveau des cinq stations en décrivant des courbes quasiment parallèles. Ainsi la saison chaude s'étend du mois de mai au mois d'octobre et la saison froide du mois de novembre au mois d'avril.

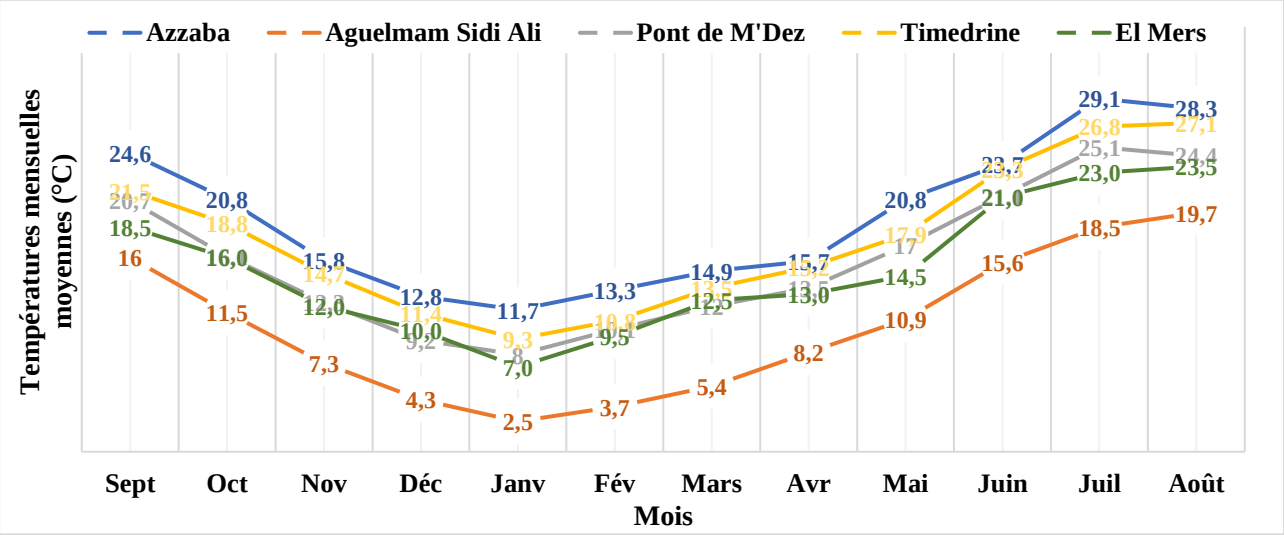


Figure 25: Tendances des températures moyennes mensuelles au niveau des stations du bassin versant Allal Al Fassi

III. Interaction précipitations et températures

L'étude de l'interaction précipitation-température permet de définir le climat caractérisant une région. De ce fait, quelques indices sont calculés, notamment l'indice xérothermique de Gaussen et l'indice bioclimatique d'Emberger

III.1. Indice xérothermique de Gaussen (diagramme ombrothermique)

La saison est définie comme la période de l'année plus ou moins étendue ayant une relative constance des conditions générales du climat. Le climat du bassin versant Allal Al Fassi, sous bassin versant de Sebou qui, de par sa position, largement ouvert sur l'Océan Atlantique à l'Ouest, proche de la Méditerranée au Nord et dominé par une dépression aride au Sud-Est, est de type méditerranéen à influence océanique qui devient plus continental à l'intérieur. Le régime pluvial annuel se caractérise par une saison humide et pluvieuse qui s'étale sur huit mois (d'octobre à mai) et une saison sèche et courte de quatre mois (du juin à septembre).

En climatologie, la méthode la plus utilisée est celle basée sur l'interprétation de l'indice Xérothermique de Gaussen, appelé aussi diagramme ombrothermique. Un mois est sec lorsque le double de sa température moyenne est supérieur à la hauteur des précipitations *(Gaussen, 1957)*. Il est considéré pluvieux lorsque les précipitations mensuelles sont supérieures à quatre fois la température (P > 4T) *(Birot, 1973)*. Cette formule a permis la construction des diagrammes ombrothermiques de chaque station (Figure 26). Chaque mois dont la courbe des précipitations est au-dessus de celle des températures est considéré comme un mois pluvieux et chaque mois dont la courbe des températures est au-dessus de celle des précipitations est un mois sec.

Au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali, située à 2078m d'altitude, la courbe de température montre que le mois d'août est le mois le plus chaud (19,7°C) et le mois de janvier est le mois le plus froid (2,5°C) avec une amplitude thermique de 17,2°C. La saison humide s'y étend sur une période de 8 mois (d'octobre à mai) et la saison sèche sur une période de 4 mois (de juin à septembre). La station El Mers présente les mêmes périodes, sèche et humide, que la station Aguelmam Sidi Ali. La saison humide au niveau de la station Azzaba, située à 478 m d'altitude, s'étend sur une période de 6 mois (de novembre à avril) et la saison sèche sur une période de 6 mois (de mai à octobre). La courbe des températures montre que le mois de juillet est le mois le plus chaud (29,1°C) et le mois de janvier est le mois le plus froid (12°C) avec une amplitude thermique de17,1°C. Au niveau des stations, Pont de M'Dez (725 m) et Timedrine (642 m), la saison humide s'étend sur une période de 5 mois (de novembre à mai) et la saison

sèche, 7 mois (de juin à octobre). Au niveau des deux stations, le mois de juillet est le mois le plus chaud. Ces nuances climatiques au sein du bassin versant Allal Al Fassi peuvent être expliquées par les variations du relief et le phénomène de continentalisation.

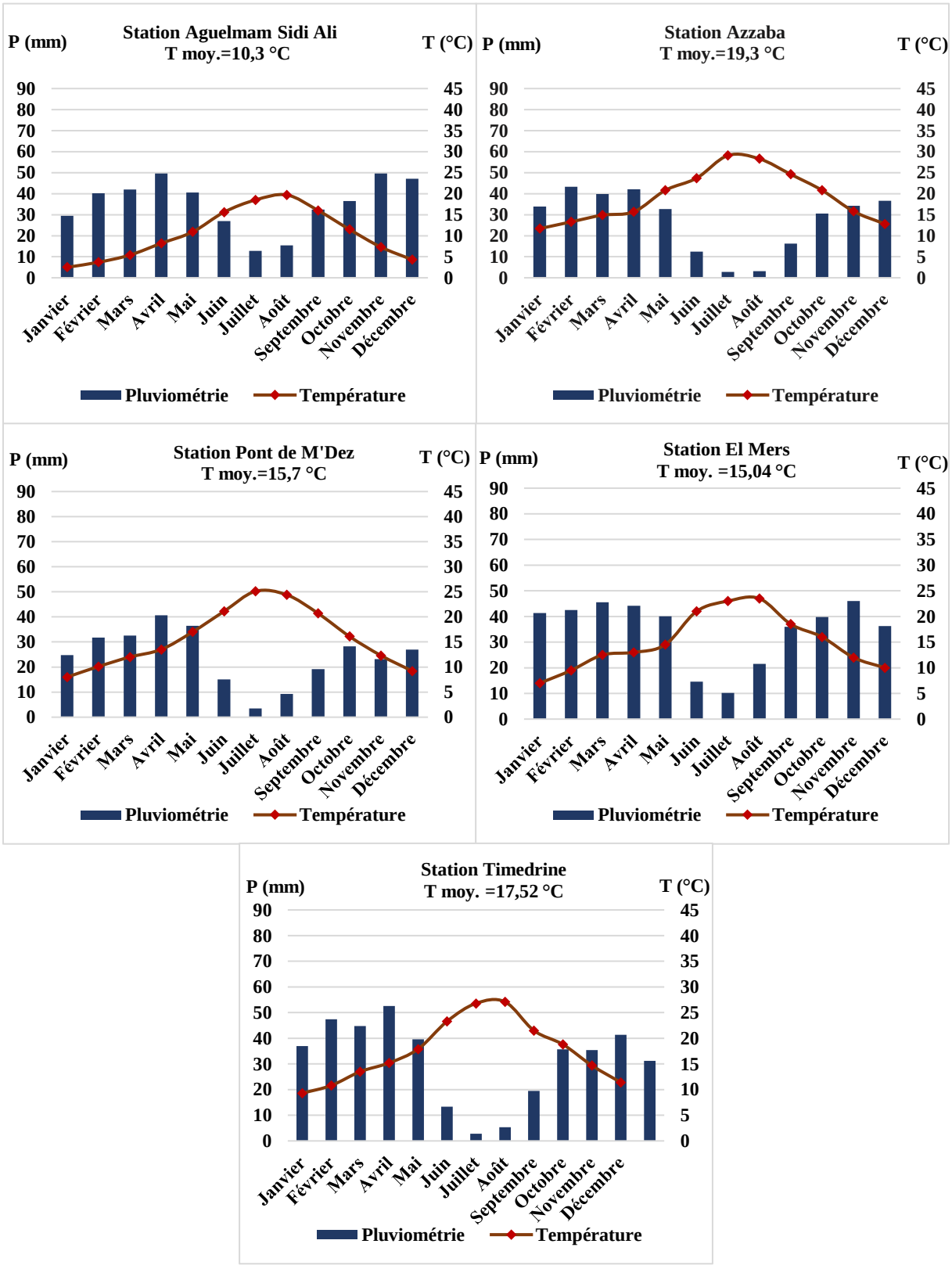


Figure 26: Diagrammes ombrothermiques des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

III.2. Indice bioclimatique d'Emberger (climagramme d'Emberger)

Emberger a utilisé un système d'axe pour classer les climats en fonction de la température et des précipitations, dans la région méditerranéenne grâce aux subdivisions qui tiennent compte du quotient pluviométrique (Q) reporté sur l'axe des ordonnées et de la température du mois le plus froid (m) en (°C) sur l'axe des abscisses, donnant une idée sur le type d'hiver. Ces subdivisions délimitées par Emberger sur le climagramme sont les étages bioclimatiques ou bioclimats dits d'Emberger : saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide.

L'indice bioclimatique d'Emberger est le plus utilisé en Afrique du Nord et dans le porteur Méditerranéen *(Emberger, 1931 ; Gaussen, 1954 ; Quezel, 1979 ; Mokhtari et al., 2014)*. Selon l'équation 19, l'indice tient compte des précipitations annuelles (P en mm), la moyenne des maximas de température du mois le plus chaud (M en °C) et la moyenne des minimas de température du mois le plus froid (m en °C) *(Emberger, 1955)*.

$$Q_E = \frac{2000 * P}{(M + m + 546,4) * (M - m)} \quad (19)$$

La figure 27 représente la projection des stations du bassin versant Allal Al Fassi dans le climagramme d'Emberger. Elle montre que le climat dans le bassin versant Allal Al Fassi varie du semi-aride (stations Azzaba et Aït Khabach) à subhumide (Dar El Hamra, El Mers et Aguelmam Sidi Ali). La station du Pont de M'Dez se situe à la limite subhumide-semi-aride et la station Aguelmam Sidi Ali est proche de la limite subhumide-humide.

L'étage semi-aride est caractérisé par une pluviométrie variante entre 200 et 500mm (Azzaba=333,62mm ; Aït Khabach=347,88 ; Pont de M'Dez=289,59) et le nombre des mois secs varie entre 5 à 7 (6 mois pour les stations Azzaba et Pont de M'Dez). La végétation climatique dominante est essentiellement composée à l'Ouest de matorrals à Thuya et Tetraclinis articulata et de forêts éparses de chêne (Quercus), alors qu'au niveau des hauts plateaux le domaine steppique domine par excellence de l'Alfa (Stipa tenacissima) *(Mokhtari et al. 2014)*.

L'étage subhumide correspond aux zones de montagnes du Moyen Atlas dont l'altitude est supérieure à 700m (Aguelmam Sidi Ali=2078m ; El Mers=1210m ; Dar El Hamra=830m). Les variations thermiques s'étendent du frais au chaud, frais au niveau de Aguelmam Sidi Ali, tempéré au niveau de Dar El Hamra et entre chaud-tempéré au niveau de la station d'El Mers. Il est caractérisé par des précipitations annuelles entre 400 et 700mm (Aguelmam Sidi Ali=414,86mm ; El Mers=403,08mm ; Dar El Hamra=446,49mm). En altitude la végétation

climatique dominante de cet étage est composée de chêne vert (Quercus Ilex), le cèdre (Cedrus atlantica), le chêne zène (Quercus faginea), le genévrier (Juniperus thurifera) et le sapin (Abies marocana) *(Mokhtari et al. 2014)*.

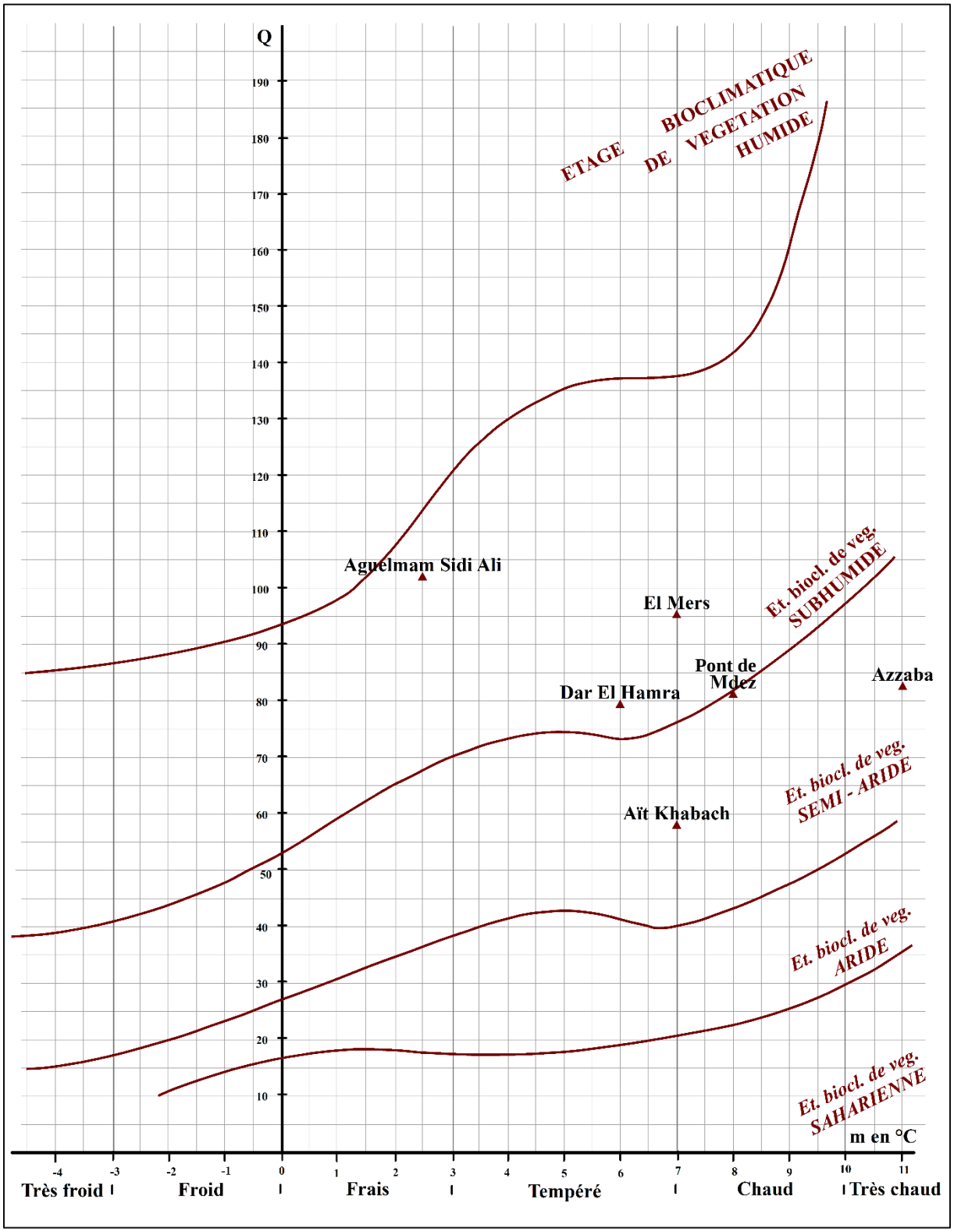


Figure 27: Répartition des stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi dans le climagramme d'Emberger

III.3. Indices d'aridité de De Martonne (IDM)

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques d'une région donnée, De Martonne *(1926)* a défini le degré l'aridité du climat. Son estimation est basée essentiellement sur les données des précipitations et des températures. De Martonne distingue deux indices d'aridité, le premier est annuel basé sur les moyennes annuelles des précipitations et des températures et le deuxième est mensuel basé sur les moyennes mensuelles *(De Martonne, 1926)*.

III.3.1. Indice annuel d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité annuel de De Martonne (I) est calculé à partir de l'équation 20, tenant compte des précipitations moyennes annuelles (P en mm) et des températures moyennes annuelles (T en °C).

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (20)$$

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. A l'échelle mondiale, De Martonne a proposé six grands types de macroclimats allant des zones désertiques arides (I < 5) aux zones humides à forêt prépondérante (I > 40). La combinaison des données de précipitations et de températures a permis de calculer l'indice d'aridité de De Martonne au niveau des cinq stations. Toutes les stations montrent un climat semi-aride (Azzaba, Pont de M'Dez, Timedrine, El Mers), exceptée la station Aguelmam Sidi Ali qui montre un climat tempéré (Tableau 18).

Tableau 18: Indice annuel d'aridité de De Martonne et climat associé

Valeur de IDM	Type du climat
Inférieur à 5	Hyper aride
5 à 10	Aride
10 à 20	Semi-aride
20 à 30	Tempéré
Supérieur à 30	Humide

Station	IDM	Climat
Azzaba	11,2	Semi-aride
Aguelmam Sidi Ali	20,82	Tempéré
Pont de M'Dez	11,31	Semi-aride
Timedrine	13,62	Semi-aride
El Mers	16,77	Semi-aride

III.3.2. Indice mensuel d'aridité de De Martonne

Pour un mois (i) caractérisé par une précipitation P_i (mm) et une température moyenne T_i (°C), l'indice d'aridité de De Martonne I_i mensuel est exprimé par l'équation 21.

$$I_i = \frac{12 * P_i}{T_i + 10} \quad (21)$$

La pluviométrie est multipliée par 12 de façon à obtenir une valeur de l'indice comparable à celle de l'indice annuel.

La représentation graphique des indices d'aridité mensuels met en évidence leur évolution le long des douze mois de l'année, selon De Martonne. Dans les stations Azzaba, Aguelmam Sidi Ali, Pont de M'Dez, Timedrine et El Mers les climats mensuels s'étendent de l'hyperaride (juin, juillet et/ou août selon la station) au semi-humide. La station Aguelmam Sidi Ali montre un climat mensuel qui varie de l'aride (juillet et août) jusqu'à l'humide (février, mars, avril, novembre et décembre) en indiquant un écoulement abondant (Tableau 19).

La courbe de l'indice d'aridité mensuel moyen a permis de distinguer deux saisons dans le bassin versant Allal Al Fassi. La première s'étale sur six mois avec un climat de l'hyper aride (juillet et août) jusqu'au semi-aride (mai, juin, septembre et octobre) et la deuxième (6 mois) est caractérisée par un climat semi-humide et s'étend du mois de novembre au mois d'avril.

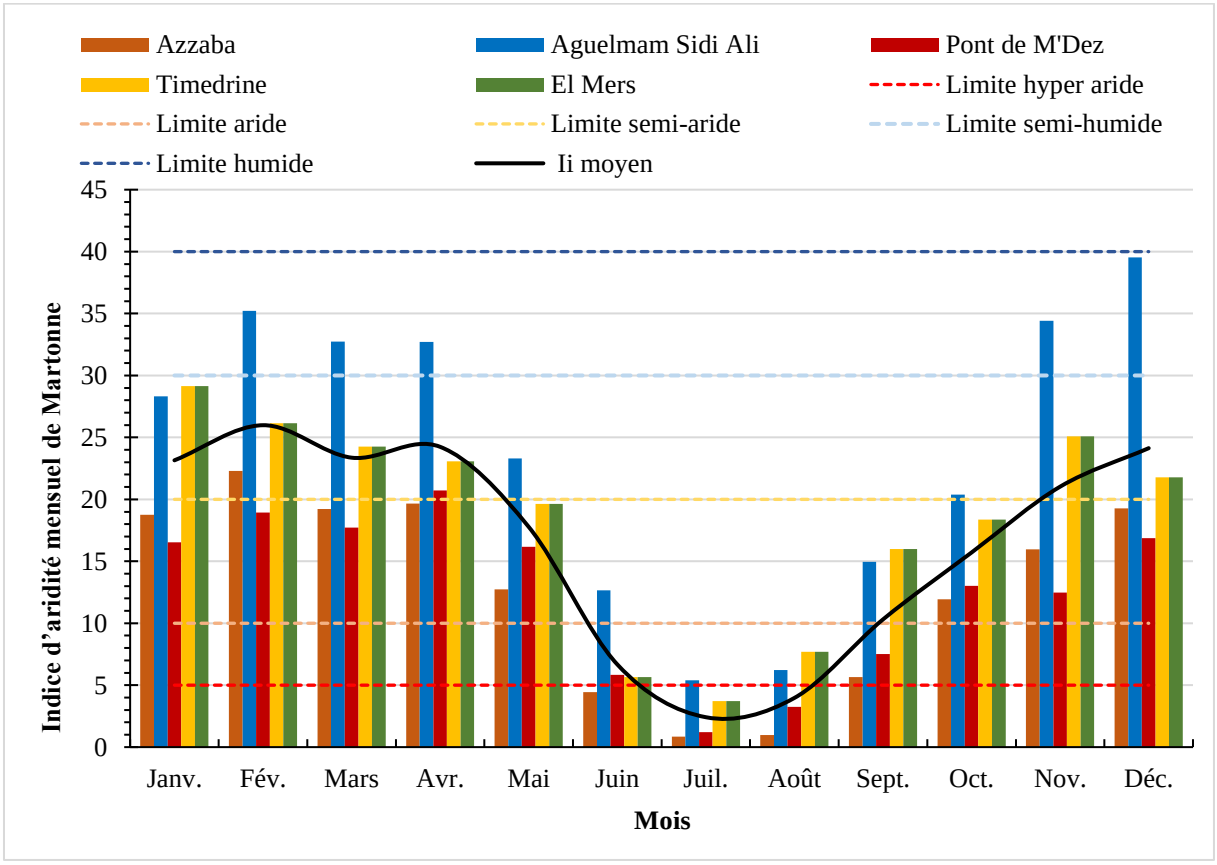


Figure 28: Indices mensuels d'aridité de De Martonne pour les stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 19: Evolution du climat le long des douze mois de l'année selon De Martonne

Stations	Mois	Climat
Azzaba	Juin, juil. et août	Hyper aride
	Sept.	Aride
	Oct., nov., déc., jan., mars, avr. et mai	Semi-aride
	Fév.	Semi-humide
Aguelmam Sidi Ali	Juil., août	Aride
	Juin, sept.	Semi-aride
	Jan., mai, oct.	Semi-humide
	Fév., mars, avr., nov., déc.	Humide
Pont de M'Dez	Juil. et août	Hyper aride
	Juin, sept.	Aride
	Oct., nov., déc., jan., fév., mars et mai	Semi-aride
	Avr.	Semi-humide
Timedrine	Juin, juil. et aout	Hyper aride
	Sept	Aride
	Oct., nov. et mai	Semi-aride
	Jan, fév., mars, avr. et déc.	Semi-humide
El Mers	Juil.	Hyper aride
	Juin, août	Aride
	Mai, sept. et oct.	Semi-aride
	Nov., déc., janv., fév., mars et avr.	Semi-humide

IV. Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ETP) est définie comme la quantité d'eau maximale que peut restituer dans l'atmosphère un couvert végétal en pleine activité physiologique et en conditions non limitatives d'approvisionnement hydrique *(Thornthwaite, 1948)*.

L'équation du calcul de l'ETP de Thornthwaite s'appuie sur des données facilement accessibles : la température moyenne et la durée théorique de l'insolation qui dépend de la saison et de la latitude. L'évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm/mois) est donnée par l'équation 22.

$$\boldsymbol{ETP = 16 * \left(\frac{10 * T}{I}\right)^{a} * F} \qquad (22)$$

Avec T : température moyenne mensuelle (°C), F = terme correctif et fonction de la durée théorique de l'insolation variant avec la latitude et la saison. Il cherche à représenter l'évolution des rayonnements solaires en fonction de la position géographique et de la période. L'indice thermique annuel (I) est la somme des 12 indices mensuels Ij

$$I = \sum_1^{12} Ij \qquad \text{avec} \qquad Ij = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

L'évapotranspiration potentielle mensuelle dans le bassin versant Allal Al Fassi, selon Thornthwaite, varie entre 8,1 mm au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali pendant le mois de janvier et 168,7 mm au niveau de la station Azzaba pendant le mois de juillet. L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne varie entre 631.4 mm à la station Aguelmam Sidi Ali et 961.4 mm à la station Azzaba. L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne au niveau du bassin versant Allal Al Fassi est de 827 mm/an, ce qui représente environ deux fois les précipitations annuelles moyennes. Les indices climatiques de Thornthwaite montrent que le climat de la partie sud du bassin versant Allal Al Fassi, notamment au niveau de la station Aguelmam Sidi Ali, est de type subhumide mésothermique évoluant vers le Nord du bassin versant en climat semi-aride, mésothermique, sans surplus en hiver, notamment au niveau de la station Azzaba.

Les variations climatiques dans le bassin versant Allal Al Fassi sont dues principalement à leur altitude et à leur exposition plus ou moins grande aux influences océaniques. La partie orientale du Moyen Atlas plissé montre des influences continentales dues à la proximité du domaine aride de la Moulouya et des Hauts Plateaux du SE marocain.

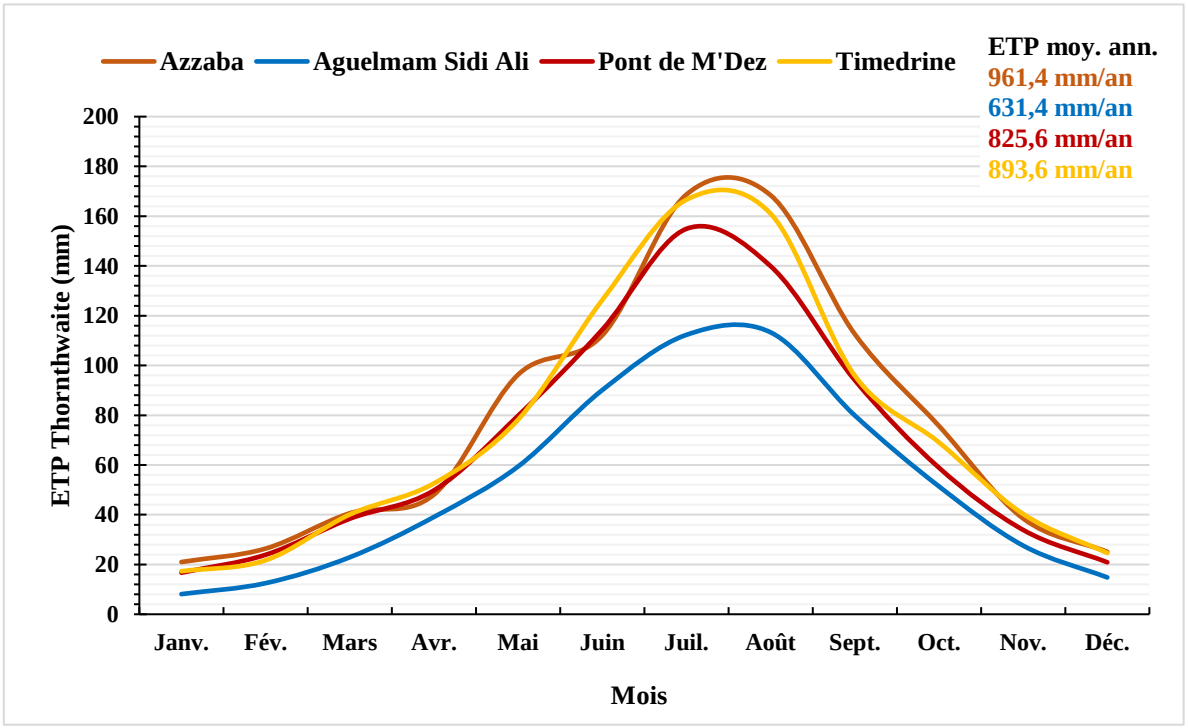


Figure 29: Courbes d'évapotranspiration potentielle mensuelle au niveau des stations du bassin versant Allal Al Fassi

V. Relief et exposition des versants

La différence d'altitude et d'exposition constitue un facteur très important, influant profusément la quantité et la répartition spatiale des précipitations et par conséquent les écoulements superficiels. Ces différences sont à l'origine du contraste climatique dans le bassin versant Allal Al Fassi. La connaissance des modalités de l'exposition des versants sur le comportement des masses d'air permet de faire une interprétation précise de la répartition de la quantité, l'intensité et la fréquence des précipitations. La rugosité du relief provoque dans les masses d'air des agitations complexes à composantes verticale et horizontale. Or, si les mouvements verticaux influencent directement les précipitations, les déplacements horizontaux le font de façon indirecte mais tout aussi efficace, puisque tout lieu de convergence ou de freinage provoque une ascendance et tout lieu de divergence ou d'accélération une subsidence. L'obstacle d'un relief peut agir de deux façons différentes sur l'écoulement d'une masse d'air qui l'aborde, soit l'obliger à s'élever (ascendance), soit le diviser en deux ensembles qui contournent horizontalement l'obstacle (divergences) *(Daveau, 1978)*.

Sachant que le climat du Moyen Atlas est de type méditerranéen de montagne humide et froid. Cela est dû essentiellement à sa position altitudinale, sa situation géographique et son exposition aux influences océaniques *(Martin, 1981)*.

L'exposition des versants affecte la répartition spatiale des précipitations. Le versant au vent de l'obstacle montagneux est bien arrosé et le versant sous le vent beaucoup plus sec (Daveau, 1978). La dissymétrie pluviométrique des montagnes est fonction de leur forme mais aussi de leur situation par rapport aux trajectoires des masses d'air et aux reliefs voisins. Les contrastes d'exposition opposent souvent un versant fréquemment pluvieux à un versant davantage ensoleillé.

Le bassin versant Allal Al Fassi de par sa situation géographique, occupe une position dont le contexte climatique est complexe. Il est sous l'influence directe de la Méditerranée au Nord et de l'Océan Atlantique à l'Ouest. Ainsi, les versants exposés Nord et Nord-Ouest sont les plus arrosés. Il est limité à l'Est par le bassin versant du Moulouya de climat continental à influence plus aride. Du côté atlantique, l'effet de la continentalité est assez important. Les versant les plus arrosés sont les versants exposés au Nord, Nord-Ouest et Ouest. Les versant modérément arrosés sont exposés Nord-Est et Sud-Ouest.

La carte de la répartition de l'exposition des versants montre que la classe des versants exposés Nord-Est (modérément arrosés) est dominante sur environ 20,61%, suivie par celle des

versants exposés Nord-Ouest (bien arrosés) avec 13,19%. Les versants les plus arrosés représentent 25,72% et les versants modérément arrosés 29,26. Plus que la moitié du bassin versant Allal Al Fassi (54,98%) est modérément à bien arrosée. Les masses d'air en provenance de l'Ouest génèrent des précipitations abondantes au contact du Moyen Atlas. La chaîne Atlasique, jouant le rôle de barrière naturelle, provoque une dissymétrie sur le plan climatique. La façade atlantique exposée aux vents provenant du Nord-Ouest est humide, alors que celle exposée aux vents en provenance du Sud-Est présente des conditions plus arides (Figure 30).

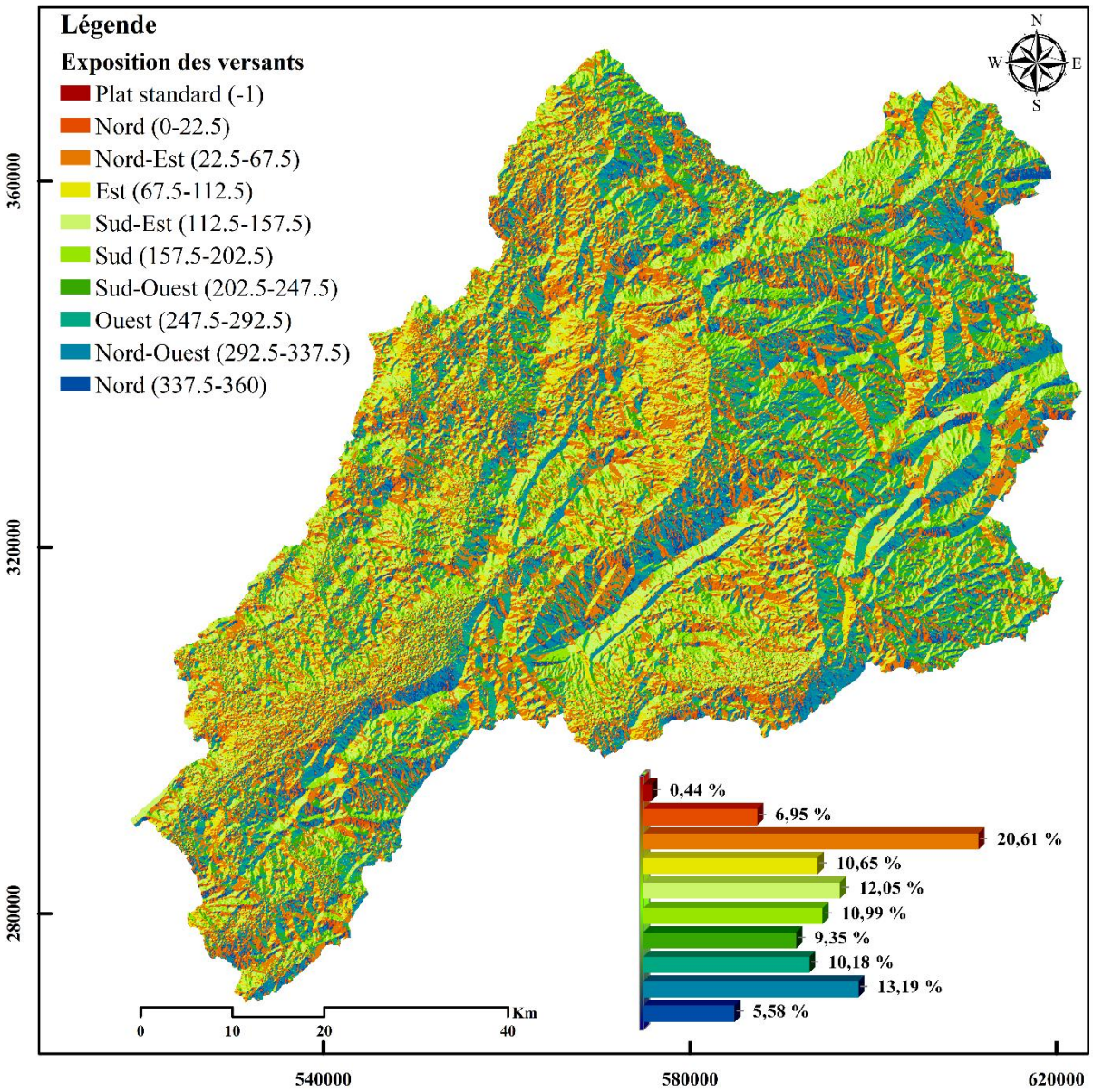


Figure 30: Carte de l'exposition des versants du bassin versant Allal Al Fassi

VI. Vents

Dans le bassin versant Allal Al Fassi deux types de vents dominent. Le premier renferme les vents océaniques des secteurs ouest et nord-ouest, généralement humides et peu violents. Ces vents jouent un rôle bénéfique puisqu'ils diminuent la température et accroissent l'hygrométrie de l'air. Ils dominent en hivers et sont généralement responsables des précipitations abondantes. Le deuxième renferme les vents continentaux des secteurs est et sud-est chauds et secs, ayant une action desséchante et brûlante sur la végétation et sur les agrégats des sols en surface et contribuant à accroître l'évapotranspiration. En effet, en temps de chergui (été), les températures sont élevées dans tout le bassin versant et plus accentuées dans les plaines et les vallées.

La direction moyenne des vents varie à l'échelle saisonnière. De l'Ouest vers Est, le Gharbi est un vent humide dominant pendant l'hiver. De l'Est vers Ouest, le Chergui en provenance du Sahara, est un vent sec et chaud dominant pendant le printemps et l'été, souvent chargé d'éléments détritiques fins (poussières) *(Baali, 1998)*.

VII. Indices de sécheresse hydrométéorologique

Des données climatiques sont obtenues auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique Sebou, sur la période de 1980 à 2020 pour les hauteurs des pluies mensuelles et sur la période de 1980 à 2003 pour les débits mensuels au niveau de quatre stations : Azzaba, Dar El Hamra, El Mers, Pont de M'Dez.

Les crues et les sécheresses constituent des risques hydrométéorologiques majeurs et des éléments déclencheurs et accélérateurs de l'érosion hydrique. Il existe une multitude d'outils de caractérisation. La détermination de la sécheresse est basée sur le calcul des indices qui permettent de déterminer d'une façon scientifique le seuil indiquant la sécheresse à différentes échelles de temps et de définir des classes d'appartenance de cet événement en fonction de sa sévérité et sa position. De ce fait deux indices sont les plus utilisés et qui sont Standardized Precipitation Index (SPI) *(McKee et al., 1993)* et Streamflow Drought Index (SDI) *(Nalbantis et Tsakiris , 2008)*.

Comme son nom l'indique, le SPI est basé sur les données de précipitations. Il permet de qualifier les sécheresses météorologiques et de caractériser les déficits de précipitations pour une période donnée (1980-2013). Il correspond à la transformation de la série temporelle des

précipitations en une distribution normale standardisée de moyenne nulle et d'écart-type unitaire (distribution gaussienne) *(McKee et al., 1993)*. Cela revient à ajuster une fonction de densité de probabilité à la distribution de la fréquence des précipitations sommées ou moyennes, sur une échelle temporelle définie, généralement comprise entre 1 et 48 mois. L'ajustement se fait séparément pour chacun des mois afin de conserver la saisonnalité. Chaque densité de probabilité cumulée est ensuite transformée en une distribution normale standardisée.

L'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs. Il est calculé selon l'équation 23 au moyen de l'application *SPI Generator* disponible au National Drought Mitigation Center maintenu par l'université du Nebraska pour calculer les valeurs du SPI.

$$\boldsymbol{SPI = \frac{Pi - Pm}{S}} \qquad \textbf{(23)}$$

Avec Pi : pluie du mois ou de l'année i ; Pm : pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ; S : écart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée. Une distribution gamma est utilisée pour surmonter la contrainte des précipitations qui ne sont pas distribuées normalement au cours de l'année.

Chaque valeur de SPI est reliée à un degré de sévérité et une probabilité d'occurrence de la sécheresse. Les valeurs négatives et positives indiquent respectivement les conditions sèches et humides. La catégorie de l'intensité de la sécheresse varie plus de 2,0 (Extrêmement humide) à moins de 2,0 (Extrêmement sèche) (Tableau 20).

L'indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial (SDI) est basé sur le concept de l'indice standardisé de précipitation (SPI). Il est calculé à partir des valeurs mensuelles de l'écoulement fluvial et des méthodes de normalisation utilisées par le SPI *(Nalbantis et Tsakiris, 2008)*. Les valeurs obtenues étant similaires à celles de SPI, le SDI se révèle tout aussi efficace pour analyser les épisodes d'humidité que les épisodes de sècheresse et leur intensité. Il est défini pour chaque période de référence k de la i-*ème* année hydrologique selon les équations 24 et 25, moyennant le logiciel « DrinC » développé par le Laboratoire de réhabilitation et de gestion des ressources en eau de l'université technique nationale d'Athènes *(http://drinc.ewra.net, 2019)*. Les valeurs de SDI et les appellations de gravité sont similaires à celles de SPI (Tableau 20).

Il a été suggéré l'établissement d'une série chronologique des volumes mensuels de débit Qi, *i* désigne l'année hydrologique et *j* le mois de l'année hydrologique (*j* = 1 pour octobre et *j* = 12 pour septembre) sur la base de cette série.

$$\boldsymbol{V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}} \qquad \boldsymbol{i = 1, 2, \ldots} \qquad \boldsymbol{k = 1, 2, 3, 4} \qquad \boldsymbol{(24)}$$

Où $V_{i,\,k}$ est le volume cumulé de débit pour la i^{ème} année hydrologique et la k^{ème} période de référence.

$$\boldsymbol{SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{S_k}} \qquad \boldsymbol{(25)}$$

Avec $\overline{V_k}$ et S_k sont respectivement la moyenne et l'écart type des volumes cumulés de débit de la période de référence k.

Tableau 20: Classification humide/sec des indices SPI et SDI

Classe	Valeur SPI/SDI
Extrêmement humide	≥ 2
Très humide	1,5 à 1,99
Modérément humide	1,0 à 1,49
Normal	0,99 à -0,99
Modérément sèche	-1 à -1,49
Très sec	-1,5 à -1,99
Extrêmement sèche	≤ -2

Dans le bassin versant Allal Al Fassi, le calcul de SPI et SDI est réalisé selon une échelle annuelle (12 mois) au niveau des quatre stations, Azzaba, Dar El Hamra, El Mers et Pont de M'Dez, au cours de la période (octobre 1980-septembre 2013). La représentation graphique du SPI_{12} et SDI_{12} indique que les valeurs les plus élevées du SPI_{12}, représentant les années extrêmement humides, sont de l'ordre 2 au niveau de la station Pont de M'Dez et 3,07 au niveau de la station Azzaba, correspondant à l'année 2010 et de 2,7 au niveau de la station Dar El Hamra et 3,02 au niveau de la station El Mers au cours de l'année 2009. Tandis que les valeurs les plus faibles, représentant les années extrêmement sèches sont enregistrées au cours des années 1983 et 1982 au niveau des stations Pont de M'Dez et El Mers (-2,3), et 1999 et 2000 au niveau des stations Dar El Hamra et Azzaba (respectivement -2,7 et -2) (Figure 31).

Les valeurs de SDI_{-12} montrent que la période extrêmement humide correspond aux années 2009 et 2010. L'année 2009 est l'année la plus humide avec des valeurs de SDI_{-12} égales à 3,34 au niveau de la station Pont de M'Dez, 3,08 au niveau de la station Azzaba, 2,82 au

niveau de Dar El Hamra et 2,42 au niveau de la station El Mers. Les valeurs les plus faibles de SDI_{-12} montrent au niveau des stations Dar El Hamra et El Mers deux années extrêmement sèches, l'année 2000 (SDI_{-12}= -2,05) et l'année 2001 (SDI_{-12}= -2,46). Au niveau des stations Azzaba et Pont de M'Dez, les valeurs les plus faibles correspondent à l'année 2000 classée très sèche avec des valeurs de SDI_{-12} égales respectivement à -1,63 et -1,79 (Figure 31).

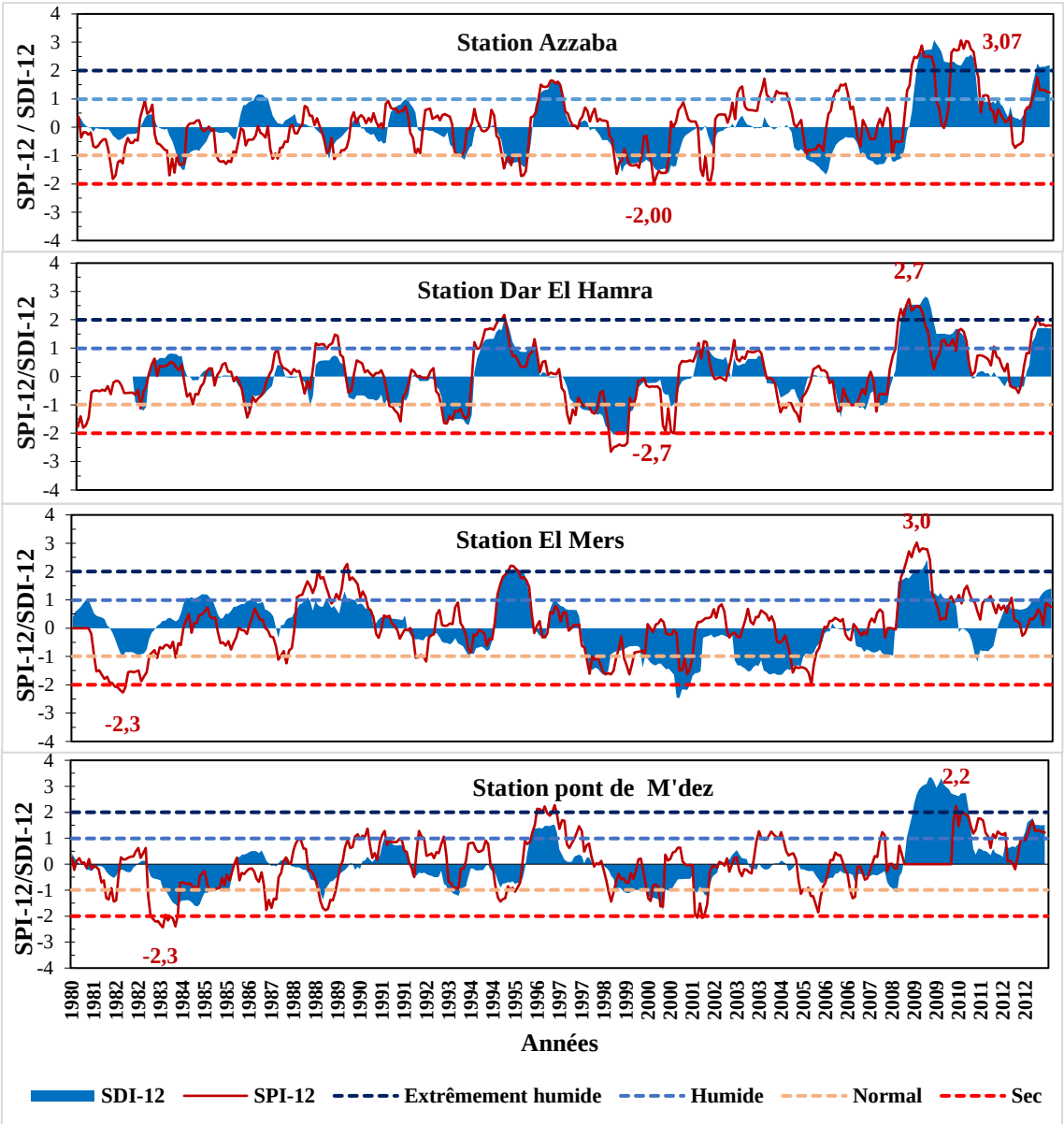


Figure 31:Indices de sècheresse SPI et SDI à l'échelle annuelle (12 mois) du bassin versant Allal Al Fassi

L'analyse par le coefficient de corrélation de Pearson (r) montre que les périodes de sécheresse et les périodes humides identifiées par SDI_{-12} présentent une corrélation presque parfaite avec SPI_{-12}, identifiant presque les mêmes périodes à l'exception de quelques évènements exceptionnels, notamment au niveau de la station Azzaba entre l'année 1985 et l'année 1987 et où SPI_{-12} et SDI_{-12} varient en sens opposé, positif pour SDI_{-12} et négatif pour

SPI-12. Cela peut être expliqué par les événement pluvieux exceptionnels sous forme d'orage que connaissent différentes régions du bassin versant Allal Al Fassi. La corrélation atteint 0,90% au niveau de la station Dar El Hamra (Figure32).

La combinaison des résultats SPI-12 et SDI-12 au niveau des quatre stations montre deux événements exceptionnels. Le premier correspond à une période de sécheresse (sèche à extrêmement sèche) qui débute de l'année 1998 jusqu'à l'année 2002. Le deuxième représente la période humide à extrêmement humide entre l'année 2008 et l'année 2011 où les valeurs SPI-12 et SDI-12 dépassent la valeur de 3. Cela exprime l'existence d'une relation entre la sécheresse hydrologique et la sécheresse météorologique dans le bassin versant Allal Al Fassi.

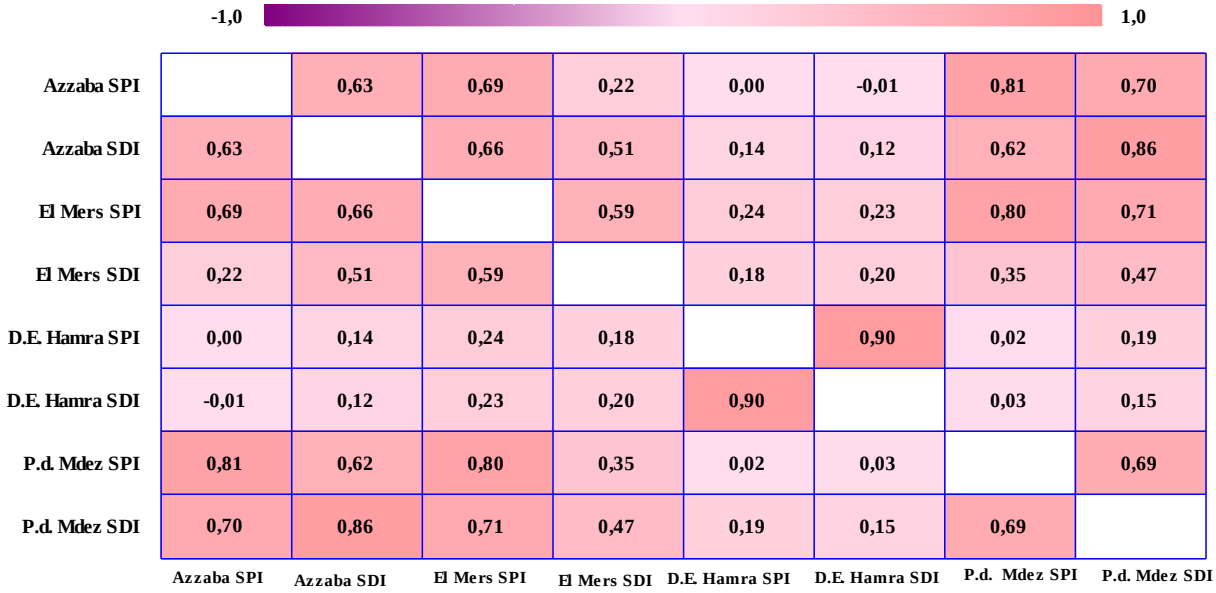


Figure 32: Matrice de corrélation entre SPI-12 et SDI-12 au niveau des quatre stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

L'analyse de fréquence des classes SPI-12 au niveau des quatre stations montre que la classe dominante est la classe normale variant entre 65,92% au niveau de la station Pont de M'Dez et 70,72% au niveau de la station El Mers. La classe extrêmement sèche varie entre 0,21% au niveau de la station Azzaba et 2,45% au niveau de la station Pont de M'Dez (Figure 33).

La fréquence des classes SDI-12 suit les mêmes tendances que celles des classes SPI-12. La classe la plus fréquente est la classe normale 35,21% au niveau de la station Dar El Hamra et 74,62% au niveau de la station Pont de M'Dez. La classe extrêmement sèche n'est pas enregistré au niveau des deux stations Azzaba et Pont de M'Dez (Figure 34).

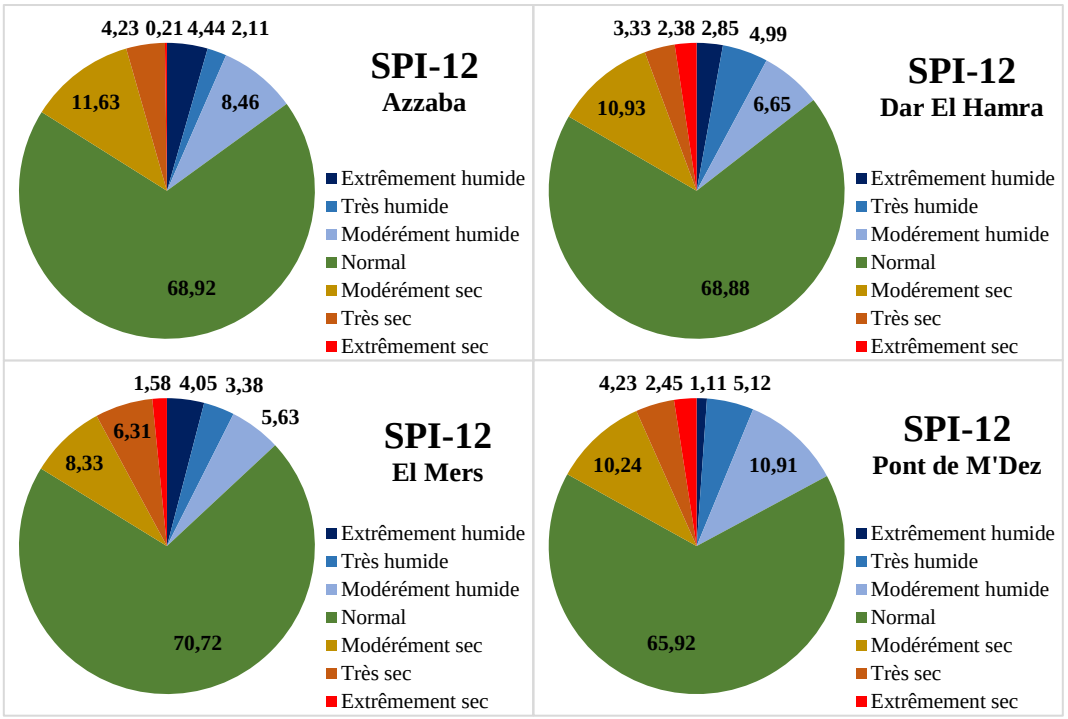


Figure 33: Fréquence des classes de l'indice SPI-12 des quatre stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

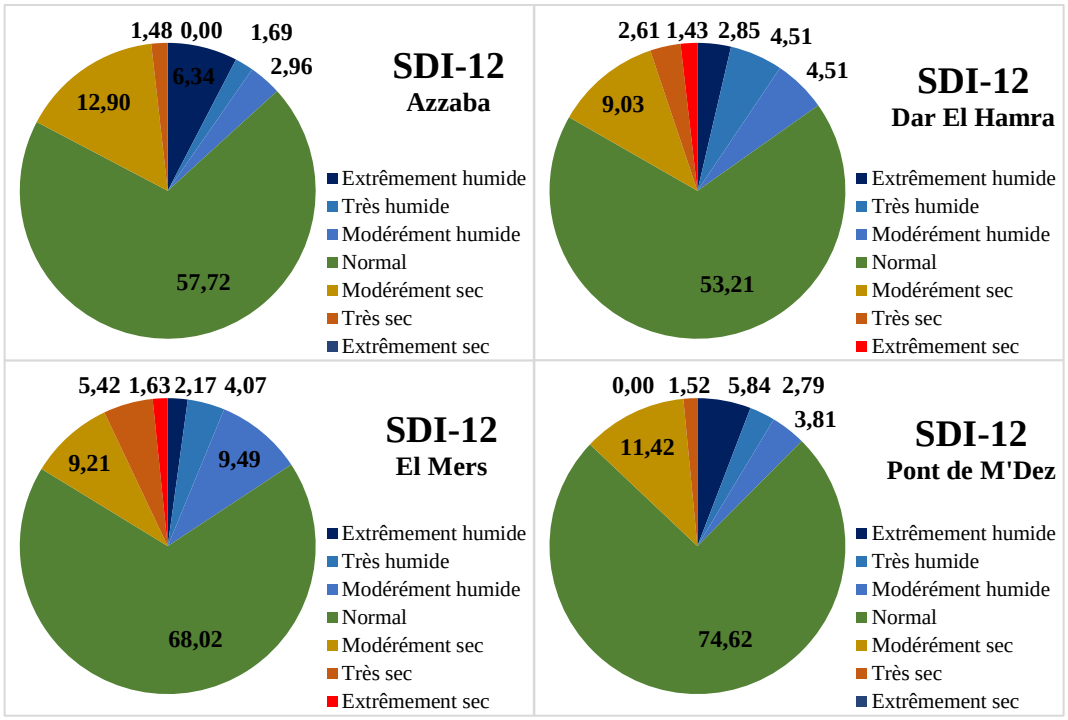


Figure 34: Fréquence des classes de l'indice SDI-12 des quatre stations météorologiques du bassin versant Allal Al Fassi

VIII. Conclusion

Dans le bassin versant Allal Al Fassi situé entièrement dans le Moyen Atlas, sous climat méditerranéen, l'érosion hydrique et le ruissellement sont favorisés par les précipitations souvent sous formes d'averses en plus des précipitations régulières pendant l'hiver. Les données pluviométriques au niveau de six stations météorologiques entre 1982 et 2020 prétraitées, homogénéisés et corrigés ont montré une grande variabilité d'un mois à l'autre et une augmentation des précipitations du septembre à novembre et du février à mai, toutefois les mois de juin et juillet sont les mois les plus secs, voire complètement secs. La moyenne annuelle des précipitations est de 376,23 mm, mais très variable avec des années plus arrosées (2008, 2009 et 2010) et des années moins arrosées (1982, 1992 et 2000). L'amplitude interannuelle peut atteindre 419,47 mm, ce qui traduit le caractère instable de la pluviométrie. La représentation graphique de l'indice pluviométrique de Nicholson Ip montre une augmentation graduelle des précipitations à partir de l'année 1997/1998 au Sud-Ouest et de l'année 1999/2000 dans le reste des bassins versant. En moyenne, sur les quarante années constituant la période référence (1980-2020), 18 années sont excédentaires contre 22 déficitaires. Les vingt dernières années sont marquées par une tendance générale à la hausse des précipitations et par des excédents très prononcés notamment l'année 2008/2009 et l'année 2009/2010, respectivement de 394,84 mm et 291,94 mm. Ceci explique la tendance générale à la hausse des précipitations. La lame d'eau tombée dans le bassin versant Allal Al Fassi est calculée par trois méthodes, la moyenne arithmétique ($\bar{P}$=376,23 mm), la méthode des polygones de Thiessen ($\bar{P}$=375,78 mm) et la méthode des isohyètes ($\bar{P}$=363,18 mm). D'après la carte des isohyètes, les précipitations sont plus importantes au N-NE (station Aït Khabach) et au S-SW (station Aguelmam Sidi Ali) et plus faible dans la vallée de M'Dez, située dans un creux pluviométrique important.

Le bassin versant Allal Al Fassi connait un régime thermique marqué par un contraste important (17°) et par une grande variabilité des températures mensuelles moyennes. La saison chaude s'étend du mois de mai au mois d'octobre et la saison froide du mois de novembre au mois d'avril. Le climagramme d'Emberger montre que son climat varie du semi-aride (stations Azzaba et Aït Khabach) à subhumide (Dar El Hamra, El Mers et Aguelmam Sidi Ali). Selon l'indice annuel d'aridité de De Martonne, le bassin versant montre un climat semi-aride, exceptée la station Aguelmam Sidi Ali qui montre un climat tempéré. L'indice d'aridité mensuel moyen a permis de distinguer deux saisons, six mois avec un climat d'hyper-aride

(juillet et août) à semi-aride (mai, juin, septembre et octobre) et six mois avec un climat semi-humide (du mois de novembre au mois d'avril). L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne au niveau du bassin versant Allal Al Fassi est de 827 mm/an, environ deux fois les précipitations annuelles moyennes. L'évapotranspiration potentielle mensuelle, selon Thornthwaite, varie entre 8,1 mm au niveau d'Aguelmam Sidi Ali pendant le mois de janvier et 168,7 mm au niveau de Azzaba pendant le mois de juillet.

Les masses d'air en provenance de l'Ouest génèrent des précipitations abondantes au contact du Moyen Atlas, jouant le rôle de barrière orogénique naturelle, en le subdivisant en façade atlantique humide exposée aux vents provenant du Nord-Ouest et en façade aride exposée aux vents en provenance du Sud-Est. La répartition de l'exposition des versants montre que les versants les plus arrosés représentent 25,72% et que plus que la moitié du bassin versant (54,98%) est modérément à bien arrosée. Le bassin versant Allal Al Fassi est à la fois sous l'influence des vents océaniques ouest et nord-ouest, humides et peu violents qui diminuent la température, accroissent l'hygrométrie de l'air et génèrent des précipitations abondantes et des vents continentaux est et sud-est chauds et secs qui contribuent à accroître l'évapotranspiration.

Le calcul des indices SPI12 et SDI12 à une échelle annuelle montre une irrégularité dans la répartition des années sèches et humides dans le bassin versant. Selon les zones, les périodes extrêmement sèches et celles extrêmement humides s'alternent d'une façon aléatoire, phénomène qui joue en faveur de l'érosion hydrique pendant des crues des sols devenant plus vulnérables par la sécheresse.

En général, les conditions climatiques qui règnent dans le bassin versant Allal Al Fassi manifestent vis-à-vis de l'érosion hydrique des sols un rôle potentiellement important.

CHAPITRE IV

Facteur couvert végétal et occupation des sols

▪ Chapitre IV : Facteur couvert végétal et occupation des sols

La couverture végétale joue un rôle important quant à la sensibilité à l'érosion des sols. Cette dernière étant la principale menace à l'égard du capital édaphique, représente une menace majeure aux conséquences très préoccupantes. L'érosion, le ruissellement et l'infiltration sont essentiellement dus à l'agressivité des pluies, à la nature des terrains, au taux et à la nature du couvert végétal. L'agressivité des pluies se traduit par l'énergie des gouttes et du ruissellement qui modifient la structure et les états de surface des sols et bien sûr la porosité des horizons superficiels en liaison avec la capacité d'infiltration des sols. La végétation constitue un moyen de lutte très efficace contre l'érosion. En effet, le risque d'érosion diminue si le sol est bien protégé par un couvert végétal ou une couche de résidus de culture. Un couvert végétal est d'autant plus efficace pour réduire l'érosion qu'il dissipe l'énergie des gouttes de pluies, qu'il ralentit l'écoulement des eaux à la surface du sol et qu'il maintient une bonne porosité superficielle en évitant l'encroûtement superficiel *(Roose, 1996)*.

Afin de mieux comprendre le complexe érosif, l'étude et la compréhension de la dynamique végétale dans le bassin versant Allal Al Fassi s'avèrent importantes. L'analyse spatio-temporelle de celle-ci permettra d'envisager le rôle des différents facteurs d'ordre naturel (climatique) ou anthropique (culture et pâturage intensifs, déforestation…).

De ce fait, il parait judicieux de bien comprendre le rôle que joue la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi en dressant le panorama général de son couvert végétal et l'occupation des sols afin de comprendre le régime érosif. Nous commencerons d'abord par la présentation des mécanismes d'action de la végétation vis-à-vis des différents types de processus érosif, ensuite l'étude de l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal et la cartographie de l'occupation des sols et enfin les facteurs en relation avec le couvert végétal intervenant dans la quantification et la qualification de l'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi.

I. Effets du couvert végétal sur l'érosion hydrique

Le couvert végétal, mort ou vivant agit directement et indirectement sur l'érosion. Il dissipe l'énergie cinétique des gouttes de pluies, améliore l'agrégation et la porosité du sol par les racines, contribue à la stabilité de la structure du sol à travers la matière organique et diminue la vitesse du ruissellement et par conséquent réduit la force de détachement des particules du sol causé ce dernier *(Rey et al., 2004)*.

I.1. Rôle de la végétation contre l'ablation

Le couvert végétal joue le rôle de protection en prévenant l'érosion et de barrière pour piégeage des matériaux érodés en amont *(Rey et al., 2002)*.

a. Réduction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie

Les gouttes de pluie qui tombent sur un sol nu transmettent une énergie aux particules du sol. Leur impact à intensité suffisamment forte peut mobiliser une fraction de l'horizon superficiel *(Ellison, 1947)* en provoquant ainsi des pertes en sols *(Wischmeier et Smith, 1958)* et la formation d'une croûte (pellicule) de battance *(Tackett et Pearson, 1965)*. En interceptant une partie des pluies, le couvert végétal fait dissiper l'énergie cinétique en fonction de son indice foliaire et de sa structure *(Cosandey et al., 2000)*. Cette protection mécanique permet de réduire l'effet de splash grâce aux litières et buissons qui ont un rôle plus important que celui de la canopée aérienne *(Geddes et Dunkerley, 1999)*.

b. Réduction de l'énergie du ruissellement

En partant de l'idée que l'érosion est accélérée par l'augmentation du ruissellement en surface *(Soler et al., 1994)*, le couvert végétal constitue un obstacle qui s'oppose au ruissellement en augmentant les forces de frottement en favorisant l'infiltration par rapport à l'écoulement superficiels *(Cerdà, 1998)*. Il s'agit d'un écran à la surface du sol barrant le cheminement des filets d'eau. En plus de cet effet, il joue le rôle de régulateur hydrologique par l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol qui se manifeste dans la diminution de la quantité, la concentration et le débit du ruissellement *(Lavabre et al., 2000)*. Par exemple, en forêt, les sols sont plus poreux et favorisent, de ce fait, l'infiltration de l'eau en la stockant en grandes quantités *(Rey et al., 2004)*. Il joue aussi le rôle de régulateur thermique permettant d'atténuer les écarts thermiques journaliers et réduisant les effets de gélifraction et de thermoclastie *(Rovéra et al., 1999)*.

c. Maintien du sol

Le couvert végétal permet de lutter contre l'érosion en maintenant en place les sols grâce aux systèmes racinaires *(Bonnet, 1983 ; Handel et al., 1997)*. Il améliore la cohésion des agrégats et renforce leurs propriétés mécaniques *(O'Loughlin et Zhang, 1986)*. Les racines d'environ 50cm pénétrant un sol peuvent doubler sa consistance *(Sala et Calvo, 1990)*.

I.2. Rôle du couvert végétal dans l'accumulation des sédiments (Piégeage des sédiments)

Le couvert végétal retient une partie des sédiments érodés en amont sous l'effet de filtration des écoulements chargés de sédiments. En réduisant l'énergie du transport, les écoulements déposent les sédiments fins *(Beuselinck, et al., 2000)* et grossiers *(Meyer et al., 1995)* qui restent piégés derrière les barrières végétales. Ces barrières peuvent évoluer au fur et à mesure de l'accumulation des sédiments et du développement des systèmes racinaires *(Rey et al.,2004)*. Cependant, des quantités importantes de sédiments érodés peuvent être piégées par des obstacles végétaux et ne rejoignent pas l'exutoire du bassin versant *(Diallo et al., 2000)*

II. Occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

Tenant compte des différentes dégradations que peut subir la couverture végétale dans le temps et l'espace, une carte d'occupation des sols actuelle du bassin versant Allal Al Fassi est réalisée. L'occupation des sols est la description de la couverture biophysique de la surface des terres émergées *(FAO, 1998)*. Les techniques de la télédétection spatiale, précisément le traitement des images issues des acquisitions satellitaires permettent de cartographier l'occupation des sols moyennant Systèmes d'Information Géographique et logiciels de traitement d'image par télédétection. La réalisation automatique de la carte d'occupation des sols à partir d'images satellitaires est basée sur des méthodes de classification dont l'objectif est de construire un modèle de prédiction pour chaque pixel de l'image une classe, appelée aussi étiquette. Ces méthodes sont basées sur le principe de l'apprentissage automatique. Généralement, deux approches sont distinguées : supervisée et non-supervisée. La méthode utilisée pour cartographier l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi est la classification supervisée. Les algorithmes de classification supervisée nécessitent la collecte de données de terrain et de référence afin d'extraire un nombre conséquent d'échantillons sur l'ensemble du bassin versant à cartographier. En effet, ces données de références et de terrain donnent une connaissance sur l'occupation des sols en permettant d'obtenir ainsi des échantillons d'apprentissage, pour lesquels l'occupation des sols est connue, qui sont utilisés par l'algorithme de classification supervisée. Ces échantillons d'apprentissage déterminent la précision de la carte résultante et servent aussi dans la phase d'évaluation comme échantillons test (Figure 35).

La classification de la carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi a demandé une image satellitaire de haute résolution spatiale : Landsat 8 de très faible nébulosité,

obtenue par le senseur (OLI) et comprend 9 bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 m pour les bandes de 1 à 7 et 9. Une nouvelle bande (1) (Bleu profonde) est réservée pour les études côtières et aérosols. La nouvelle bande (9) est utile pour la détection de cirrus. La résolution de la bande 8 (panchromatique) est de 15 m (Tableau 21). L'image est acquise pendant la saison estivale (le 9 juillet) de l'année 2017. La signature spectrale de la végétation, de par son caractère dynamique, change au cours de l'année. Pour l'identification de l'occupation des sols, les images recommandées sont, évidemment, les images estivales afin de faire la distinction entre les terrains occupés par l'agriculture et ceux occupés par une végétation naturelle. Au Maroc, et précisément au niveau du bassin versant Allal Al Fassi, la saison agricole, d'après la FAO, débute en novembre/décembre. Ce début désigne le stade précoce de levée des cultures, il est défini comme le point où le NDVI atteint 25% de sa valeur maximale. Le maximum de la saison est atteint en mars/avril, période où le feuillage des cultures est pleinement développé et où le NDVI est à sa valeur maximale *(Rojas et al., 2014)*.

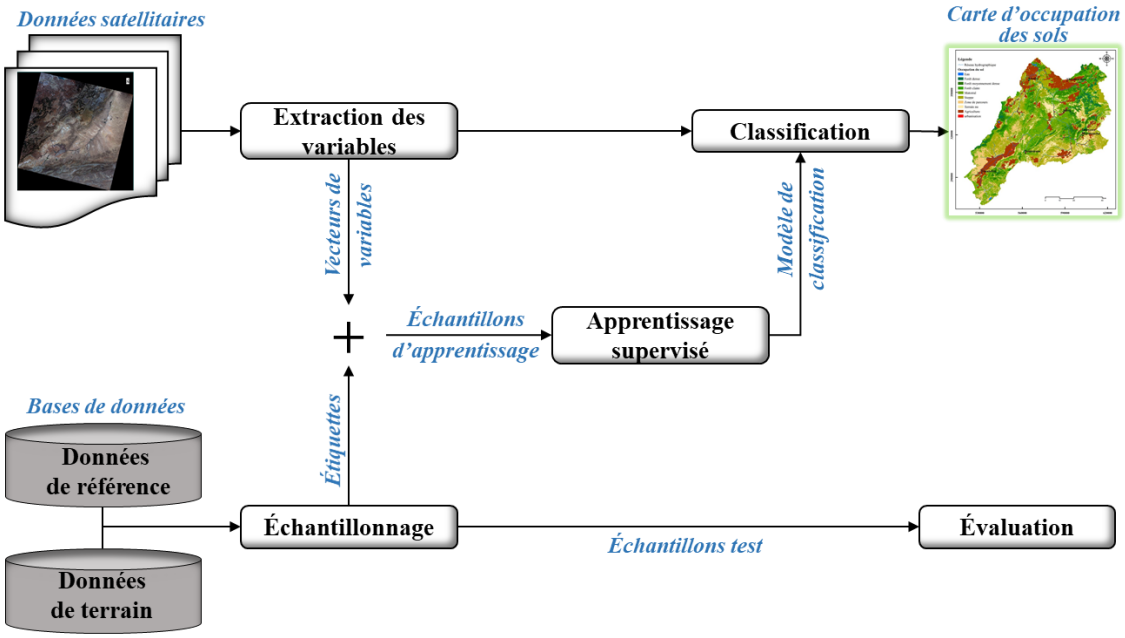


Figure 35: Processus de la classification supervisée

Tableau 21: Spécification des images LANDSAT 8

Image Landsat 8		
Taille du pixel	-	Bandes OLI multispectrales 1-7 et 9 de 30 m de résolution
	-	Bandes OLI panchromatique 8 de 15 m de résolution
Caractéristiques des données	-	Format GéoTIFF (fichier compressé d'environ 1GB) téléchargé auprès de l'USGS
	-	Projection cartographique : Universal Transversal Mercator (UTM)
	-	Datum au Système Géodésique Mondial (WGS) 84
	-	12 mètres d´erreur circulaire, 90% de confiance exactitude globale pour OLI

II.1. Pré-traitement des données satellitaires

Les données satellitaires nécessitent un pré-traitement du fait que les images acquises par les systèmes d'observation de la terre sont affectées de déformations géométriques. Le signal radiométrique ne dépend pas uniquement de la réflectance de la surface terrestre mais aussi des effets de l'atmosphère qui interviennent au cours des deux trajets. En une surface terrestre, les corrections atmosphériques permettent d'extraire du signal une information indépendante des effets de l'atmosphère, variables dans le temps et l'espace.

- **Corrections géométriques :** les images satellitaires ne sont pas directement superposables à une carte. Elles présentent des déformations géométriques qui peuvent être dues au positionnement du satellite sur son orbite, aux effets du relief terrestre, au mouvement de la terre pendant la prise de vue et aux conditions d'acquisition (mouvement du satellite et l'angle d'acquisition). Les corrections géométriques réduisent les déformations induites lors de la prise de vue, permettent le géoréférencement et rendent superposables les images à une carte. Les images sont localisées en longitude et latitude en utilisant une image de référence bien localisée au sol et un MNT en altitude.
- **Corrections radiométriques :** le signal reçu par un radiomètre contient la réflectance renvoyée par le paysage et les différentes réflexions atmosphériques, la lumière du soleil et le bruit introduit par le capteur. Les corrections radiométriques consistent à modifier le signal reçu par le capteur en valeur radiométrique, la plus proche possible, de celle mesurée au sol en convertissant les valeurs brutes des images en réflectance du sol.

II.2. Traitement des données satellitaires

Pour établir une carte d'occupation des sols une classification supervisée d'une image satellitaire Landsat 8 (Tableau 21) couvrant le bassin versant Allal Al Fassi a été adoptée. Les zones de la scène se trouvant à l'extérieur du bassin versant doivent être masquées et exclues de l'analyse radiométrique et statistique afin de faciliter l'application de l'algorithme de classification. L'extraction des différentes surfaces d'occupation des sols demande la définition des zones d'entrainement (ROI : Region Of Inerest) qui correspondent à des polygones, points ou lignes tracés sur une couche de type Vecteur superposée à l'image satellitaire. Ces objets regroupent des pixels appartenant à une surface donnée sur l'image, sorte d'apprentissage basé sur des calculs statistiques (moyenne et écart type) qui permettent au logiciel de collecter les informations spectrales des pixels de chaque surface sur plusieurs bandes spectrales de la scène. Ces informations vont être utilisées par le logiciel pour chercher les autres regroupements de pixels de l'image dont les caractéristiques radiométriques sont similaires à celles des pixels des

ROIs déjà définies. L'ensemble des pixels détectés sont attribués à la même classe correspondant à un type de surface de sol. Plusieurs algorithmes ont été testés pour cette classification, Mahalanobis Distance s'est avéré le meilleur algorithme dont la sensibilité est la plus adaptée pour distinguer les types d'occupation des sols couvrant le bassin versant. Cette méthode a été appliquée sur les bandes spectrales 1,2,3,4 et 5 pour extraire 10 classes ; eau, zones de parcours, prairies, steppes, matorrals, maquis, forêts denses, forêts moyennement denses, forêts claires et sols nus. Vue la légère variabilité de réflectance remarquée dans une même classe et qui peut être due à plusieurs facteurs (différentes espèces végétales, différentes natures lithologiques des sols nus…), chaque type de surface a été d'abord subdivisé en plusieurs sous-classes puis regroupées en une seule classe. Pour la fiabilité de la carte d'occupation de sol, les zones urbaines et les zones agricoles très proches respectivement, de point de vue radiométrique, aux sols nus et aux sols à couvert végétal, et entre lesquels le calcul statistique de séparabilité montre une possibilité d'erreur de classification spectrale, ont été digitalisées manuellement à partir des images satellitaires (hautes et très hautes résolutions consultables sur Google Earth) et intégrées à la carte.

II.3. Données de références

En plus des données satellitaires, la classification nécessite des données de références utilisées pour l'apprentissage du classifieur. Ces données sont utilisées aussi pour l'évaluation de la performance du système de classification et sa validation. Effectivement, l'apprentissage supervisé s'appuie sur les échantillons d'apprentissage décrits par l'information extraite des images satellitaires et l'occupation des sols extraite des données de références et des données de terrain. Cette étape permet de construire un modèle de classification à partir de ces échantillons d'apprentissage. Ce modèle sera ensuite utilisé pour déterminer la classe d'occupation des sols de chaque pixel des images satellitaires. L'algorithme de classification apprend le modèle de classification qui permet de prédire les classes d'occupation des sols et de généraliser et prédire l'étiquette de nouveaux échantillons.

Cette base est composée de données ponctuelles collectées pendant plusieurs compagnes de terrains réalisées au cours des années 2016 et 2017. Dans cette approche, la majorité du bassin versant Allal Al Fassi avec les types d'occupation des sols de différentes parcelles sont reporter, (Figure 36).



Figure 36: Photos des différentes occupations des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

1, 2, 3 : Sol nu ; 4, 5, 6, 7 : Terrain agricole ; 8 : Steppe + terrain agricole ; 9, 10, 11, 12 : Steppe ; 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 : Matorral ; 21 : Forêt dense ; 22 : Forêt claire ; 23 : Forêt moyennement dense ; 24 : Urbanisation + steppe

L'emplacement et l'étendue des parcelles sont définies en amont à partir des images de très haute résolution spatiale. Concernant les parcelles couvertes par les cultures et présentant des conditions de développement similaires ont été suivies en les visitant au minimum deux fois pendant deux saisons (les moments clés du cycle phénéologique) (Figure 37).

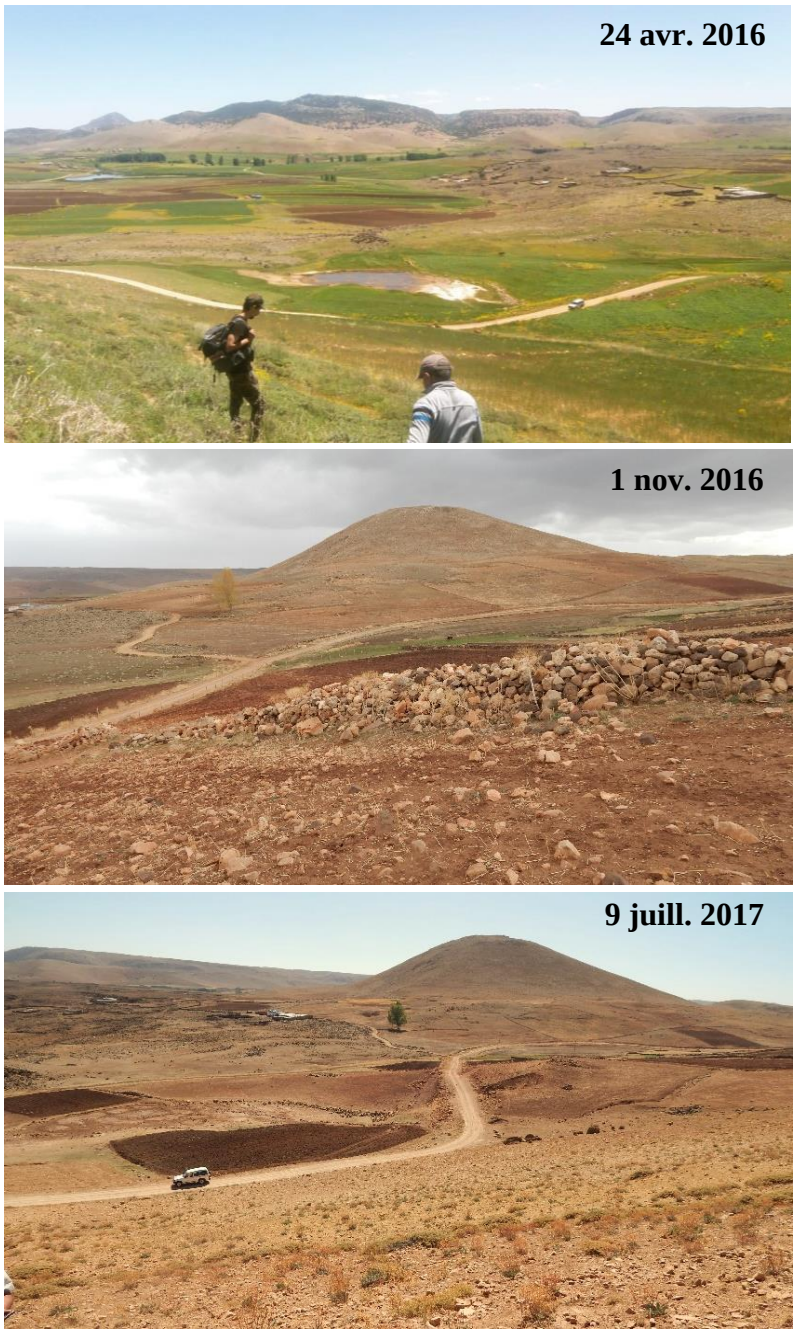


Figure 37: Photos de compagnes de terrain du site de référence Aït Quassou (Timahdite, province d'Ifrane)

II.4. Validation et évaluation de la qualité de la classification

La dernière étape du processus de la classification est l'évaluation de la précision de l'algorithme de classification et donc de la carte résultante. La validation des résultats permet de s'assurer de leurs performance et signification. Les données de terrain utilisées pour initier le processus de classification servent aussi à valider les résultats par le calcul d'une matrice de confusion. Cette étape est effectuée en comparant les classes de la donnée de référence avec celles prédites par le classifieur sur les échantillons test. Une fois l'espace spectral est découpé

en zones différenciées associées à des classes bien définies, chaque pixel de vérification est associé à une classe qui correspond à la position des vecteurs qui le représente dans l'espace spectral. Ces associations sont représentées sous forme d'une matrice de confusion. A partir de cette matrice de confusion plusieurs indices de précision sont calculés, notamment le coefficient de Kappa, la précision moyenne, la précision globale de la classification et les différentes erreurs de commissions et d'omissions. Les erreurs d'omissions se produisent lorsqu'un pixel est incorrectement exclu d'une classe. C'est la précision du système qui représente le nombre de pixels correctement classifiés, pour une classe particulière, divisé par le nombre total de pixels de vérification pour cette même classe. Inversement, les erreurs de commissions se produisent lorsqu'un pixel est assigné incorrectement à la mauvaise classe. Elles représentent la précision de l'usager pour une catégorie individuelle. C'est le nombre de pixels correctement classifiés dans une classe précise divisé par le nombre total de pixels mis dans cette même classe *(Fung et Ledrew, 1988)*. Quant à la précision moyenne, c'est la précision de chacune d'une classe, elle correspond au nombre de pixels bien classifiés divisé par la somme des pixels bien classifiés. La précision de chacune des classes peut être une précision du système (erreur d'omission) ou de l'usager (erreur de commission) *(Fung et Ledrew, 1988)*. La précision globale de la classification est égale au nombre total de pixels correctement classifiés divisé par le nombre total de pixels de vérification. Elle correspond à la mesure de la précision de l'image toute entière sans indications sur la précision des classes individuelles *(Singh, 1986)*.

Le coefficient de Kappa *(Cohen, 1960)* est considéré comme le plus approprié pour la description exacte *(Fung et Ledrew, 1988)* et la mesure de l'exactitude de la précision de la classification *(Rosenfield et Fitzpatrick-Lins, 1986)* (Tableau 22). Il permet d'estimer le taux de concordance entre deux observateurs. Il utilise toutes les cellules de la matrice de confusion prenant compte à la fois des erreurs de commission et d'omission. La formule du coefficient de Kappa est définie par l'équation 26.

$$\boldsymbol{Kappa\ (k) = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}} \qquad \textbf{(26)}$$

Avec P_o : la proportion de l'accord observé et P_e : la proportion d'un accord aléatoire.

Tableau 22: Degré d'accord et coefficient de Kappa (Landis et Koch, 1977)

Coefficient Kappa	Interprétation
< 0	Très mauvais (Poor)
0 - 0,20	Mauvais (Slight)
0,21 - 0,40	Passable (Fair)
0,41 - 0,60	Moyen (Moderate)
0,61 - 0,80	Bon (Substantial)
0,81 - 1,00	Très bon (Almost perfect)

La figure 38 représente la matrice de confusion de la classification supervisée de l'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi. Elle montre de fortes concordances pour les classes forêt dense (100%), zone de parcours (99,84%), eau (98,53%), forêt claire (96,48%), sol nu (93,15%), matorral (90,64%) et les maquis (85,61%). Les classes forêt dense et zone de parcours présentent généralement le moins de confusion. Les classes forêt moyennement dense et steppe présentent les plus faibles pourcentages de concordance (respectivement 73,03 et 76) (Figure 38). La classification confond partiellement les zones de parcours et les steppes ; les erreurs de commissions sont les plus élevées pour ces deux classes (respectivement 39,87% et 25,43%) (Tableau 23).

Le coefficient de Kappa de la classification supervisée dans le bassin versant Allal Al Fassi est égal à 0.8909 (Tableau 22). Cette valeur témoigne de la très bonne précision et l'exactitude de la classification (Tableau 23). La précision globale est très bonne avec un pourcentage de 90,87, soit 11678 pixels correctement classifiés pour un nombre total de pixels de vérification de 12851.

Classe	Eau	Forêt dense	Forêt moy. dense	Forêt claire	Matorral	Maquis	Steppe	Zone de parcours	Sol nu	Total
Eau	98,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,38
Forêt dense	0,11	100,00	12,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,44
Forêt moy. dense	0,08	0,00	73,03	1,95	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	3,38
Forêt claire	0,19	0,00	11,91	96,48	0,54	1,07	0,00	0,00	0,00	4,66
Matorral	0,00	0,00	0,00	0,00	90,64	0,38	1,67	0,16	0,13	23,68
Maquis	0,04	0,00	1,40	0,98	0,09	85,61	0,48	0,00	0,04	8,93
Steppe	0,19	0,00	0,00	0,39	2,92	7,08	76,00	0,00	5,48	9,94
Zone de parcours	0,00	0,00	0,00	0,00	5,39	0,15	17,38	99,84	1,20	8,33
Sol nu	0,87	0,00	1,05	0,20	0,42	5,33	4,47	0,00	93,15	18,25
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figure 38: Matrice de confusion associée à l'évaluation de la carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 23: Résultat du calcul des indices de précision

Classe	Commission (%)	Omission (%)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)	Précision Prod, (%)	Précision Usag. (%)	Précision Prod. (Pixels)	Précision Usag. (Pixels)
Eau	0,00	1,47	0/2619	39/2658	98,53	100,00	2619/2658	2619/2619
Forêt dense	23,89	0,00	75/314	0/239	100,00	76,11	239/239	239/314
Forêt moy. dense	3,92	26,97	17/434	154/571	73,03	96,08	417/571	417/434
Forêt claire	17,53	3,52	105/599	18/512	96,48	82,47	494/512	494/599
Matorral	0,99	9,36	30/3043	311/3324	90,64	99,01	3013/3324	3013/3043
Maquis	2,09	14,39	24/1148	189/1313	85,61	97,91	1124/1313	1124/1148
Steppe	25,43	24,00	325/1278	301/1254	76,00	74,57	953/1254	953/1278
Zone de parcours	39,87	0,16	427/1071	1/645	99,84	60,13	644/645	644/1071
Sol nu	7,25	6,85	170/2345	160/2335	93,15	92,75	2175/2335	2175/2345

II.5. Carte d'occupation des sols

La répartition de l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi présente une grande complexité. Elle montre une prédominance de matorral occupant 25% de la superficie totale qui en dérivant de la forêt indique l'ampleur de la dégradation (changements climatiques, déforestation, incendie, pâturage, etc.). Cette régression est engendrée essentiellement par la forte pression humaine agencée à d'autres facteurs de dégradation, en particulier l'érosion hydrique. La classe des steppes correspond à des formations herbacées et arbustives basses plus ou moins ouvertes et suffisamment continues pour dominer le paysage. Elle occupe 19% de la superficie, éparpillée sur la majorité du bassin versant. La troisième classe la plus représentée est celle de l'agriculture, étalée sur 14% de la superficie totale, localisée principalement à proximité des habitations et prédomine largement la province de Sefrou. Les terrains agricoles sont quasi absents dans la commune de Bou Iblane par la dominance des terrains accidentés. La classe des terrains nus occupe 11% de la superficie totale et celle des zones de parcours 9% et prédominent la province d'Ifrane (Figure 39). La forêt est une formation arborescente généralement définie par deux critères : la taille et la densité. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, la forêt prédomine les provinces de Boulemane et Sefrou. Trois types de forêts sont différenciés, forêt dense occupant 2% de la superficie, localisée principalement sur les hauteurs, forêt moyennement dense occupant 8% de la superficie et forêt claire s'étendant sur 12% de la superficie totale (Figure 40).

L'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi peut être divisée en quatre grands ensembles : végétation naturelle, agriculture, terrains incultes et parcours et plans d'eau.

II.5.1. Végétation naturelle

La végétation naturelle dans le bassin versant Allal Al Fassi est très diversifiée. La répartition des différentes essences forestières et pré-forestières dépend de l'influence combinée de plusieurs paramètres écologiques à savoir, le climat, l'altitude, l'exposition, la pente, la pédologie, etc.).

Les principales essences forestières du bassin versant Allal Al Fassi sont, par ordre d'importance, le chêne vert, le genévrier rouge, le thuya de Berberie, le cèdre de l'Atlas, le genévrier thurifière et le pin d'Alep. Des essences secondaires se présentent sous formes de matorrals ou se trouvent associés aux essences forestières principales, en particulier : Stippa Tenassissima, Ceratonia Ciliqua, Pistacia Lentiscus, Phillyrea Media, Rosmarinus Officinalis, Juniperus Oxycedrus, Fraxinus Dimorpha, Buxus Balearica, Chamaerops Humilis, Olea Oleastis, etc. Le chêne vert, connu par sa plasticité écologique, occupe la plus grande superficie forestière du bassin versant allant de l'étage bioclimatique semi-aride supérieur à l'étage bioclimatique subhumide supérieur. Généralement, il est en association avec d'autres essences forestières principales et secondaires tels que Tetraclinis Articulata, Junuperus Phoenicia, Cedrus Atlantica, Juniperus Oxycedrus Chamaerops Humulis, Fraxinus Dimorpha, Buxus Balearica, Stipa Tenassissima. Le cèdre de l'Atlas est concentré dans les zones de haute altitude et occupe des superficies discontinues, généralement, à l'état vieux et parfois dépérissant. Il est particulièrement observé dans Jbel Tichoukt, Jbel Msioujène, Jbel saghla, Jbel Bou Iblane (Taffert), Ain Kahla, Jbel Habri, Jbel Michlifen et dans la forêt d'Aghbalou larbi. Le Pin d'Alep, à l'état naturel, apparaît sous forme d'îlots sur des étendues limitées le long des vallées et sur des falaises dans le canton de Tichoukt. Le genévrier rouge occupe des surfaces très étendues réparties sur tout le bassin versant dans des stations peu favorables à l'installation du Thuya de Bérberie. Ce dernier occupe des superficies de moindre importance dans le canton de Tichoukt et de Jbel Bou Iblane et se trouve en association avec Pistacia Lentiscus, Phillyrea Media, Rosmarinus Officinalis, Cistus Albidus et Libanitis, Juniperus Oxycedrus, Juniperus Phoenicea et Stipa Tenassissima. Le genévrier thurifère s'étend sur les zones de haute altitude, très dégradées. Il est particulièrement localisé dans la forêt d'Ain Nokra, Jbel Tichoukt, Jbel Bou Iblane, généralement marqué par un état de dégradation très avancé.

II.5.2. Agriculture

Les terrains agricoles dans le bassin versant Allal Al Fassi couvrent 14% de la superficie totale. La grande partie des exploitations agricoles pratiquent des cultures annuelles en bour,

dominées par des rotations de type céréales/légumineuses ou céréales/jachères/légumineuses. Les sols sont généralement travaillés à l'araire et le semis est réalisé à la volée. Les principales cultures sont l'orge qui occupe 50 à 75% et le blé dur qui couvre 14 à 37 % de la superficie réservée à la céréaliculture. Ces deux cultures constituent l'alimentation de base de l'ensemble des foyers ruraux. Le blé tendre et le maïs occupent également une place non négligeable. Les légumineuses sont souvent associées aux céréales en rotation bisannuelle. Les principales espèces cultivées sont les lentilles, les fèves et les pois-chiches (85 à 100% de la superficie des légumineuses). L'arboriculture fruitière couvre 1 à 18 % de la superficie du bassin versant selon les provinces. La principale essence fruitière rencontrée est l'olivier. D'autres essences fruitières existent soit en mélange ou en blocs homogènes avec des densités à l'hectare très faibles. C'est le cas du figuier, du prunier, de la vigne, de l'amandier et du noyer. L'aire de l'arboriculture est localisée principalement dans la région d'El Menzel où l'olivier occupe une place de choix. Dans la commune rurale de Skoura, l'olivier est cultivé depuis longtemps sur les terrasses où l'infrastructure hydraulique d'irrigation date de la période coloniale. Les rosacées (pommiers, poiriers, pêchers) sont largement représentées dans la région d'Azrou où le climat et les conditions du sol répondent aux exigences de ces espèces. Les cultures maraîchères de plein champ occupent 1 à 5% de la superficie, selon les provinces. Cependant, le maraîchage commence à connaître un développement important dans le bassin versant et constitue une source importante des exploitations. Il se localise, principalement, dans les zones irriguées et équipées d'une infrastructure préexistante ou à proximité des oueds à écoulement pérenne où l'initiative privée a donné naissance à un investissement particulier. Les cultures maraîchères sont dominées principalement par la pomme de terre et la tomate qui coexistent avec des cultures saisonnières (navets, carottes, choux, menthe, etc.).

II.5.3. Terrains nus et zones de parcours

Ils s'étalent sur 20% de la superficie du bassin versant et sont essentiellement représentés par les terrains de parcours, les affleurements rocheux, les terrains dénudés et les badlands. Ils dominent principalement la province d'Ifrane (Figure 39).

II.5.4. Plans d'eau

Les plans d'eau dans le bassin versant Allal Al Fassi de dépassent pas 0,11% de la superficie totale. Ce pourcentage négligeable est principalement représenté par la retenue du barrage Allal Al Fassi, dayat Ifrah, dayat Aguelmam Tiffounassin et dayat Aguelmam Sidi Ali (Figure 40).

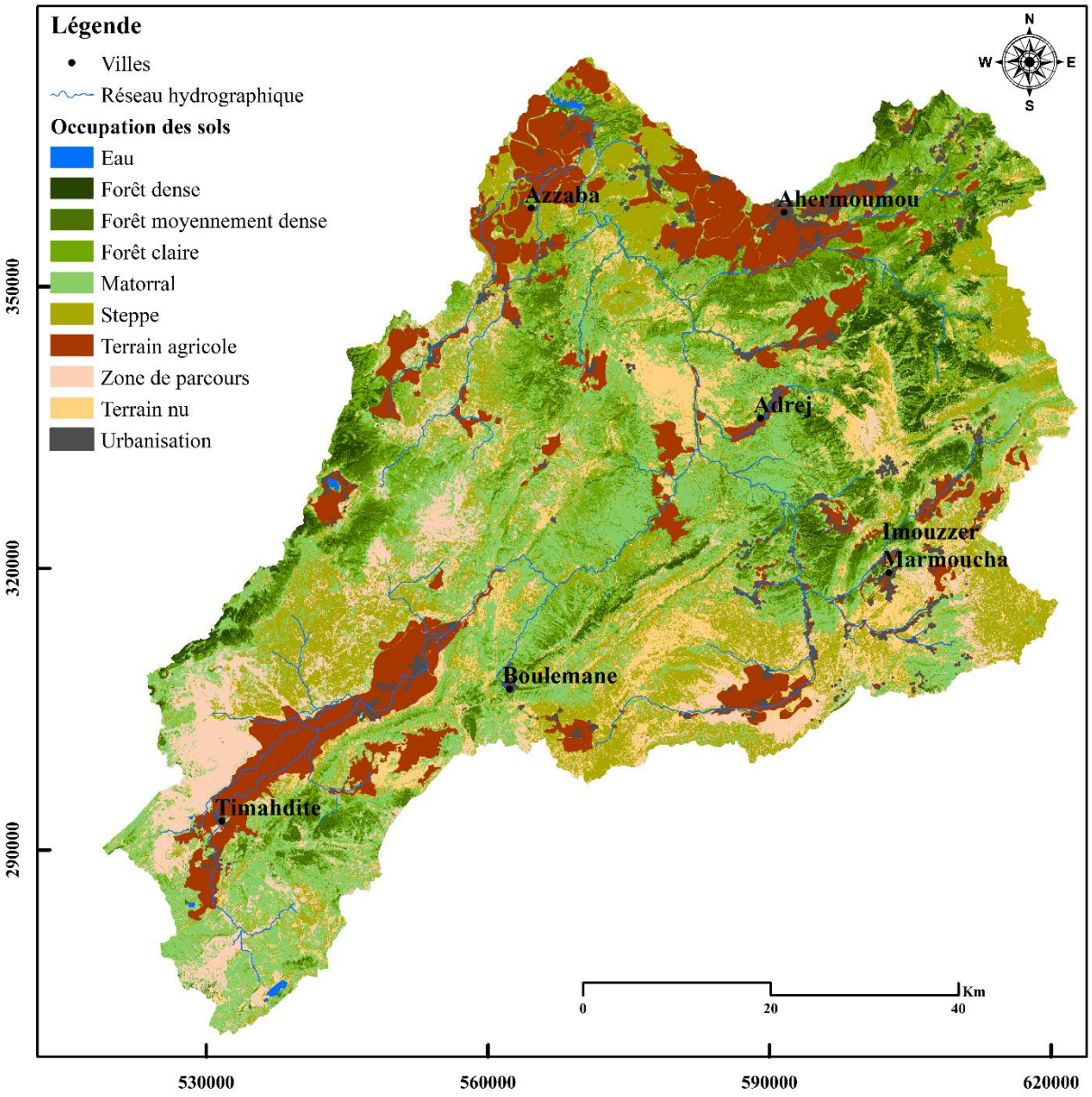


Figure 39: Carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi

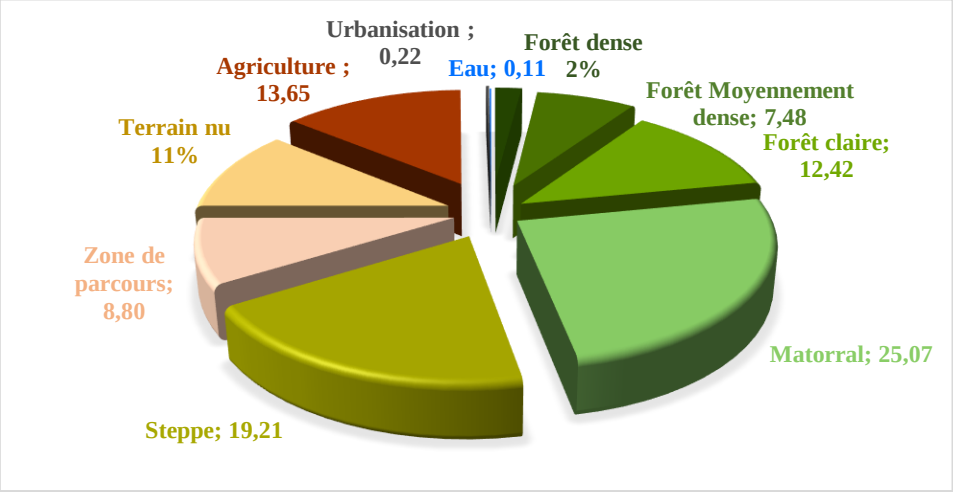


Figure 40: Superficies (%) de l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

II.6. Comparaison des occupations des sols entre 1997 et 2017 dans le bassin versant Allal Al Fassi

La carte d'occupation des sols de l'année 1997 réalisée par le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification *(PABV-HCEFLCD, 1997)* est comparée à la carte d'occupation des sols de l'année 2017 *(El Kamel et al., 2020b)* (Figure 41, Tableau 24).

Les résultats montrent qu'il existe une régression importante de la forêt en termes de superficie, passée de 40% pendant 1997 à environ 22% pendant 2017, et en termes de densité. En effet, la forêt dense a connu une dégradation très importante en passant de 22% en 1997 à seulement 2,01% en 2017. La dégradation de la forêt mène à l'apparition du matorral couvrant 25,07% de la superficie du bassin versant. Ce qui signifie que la déforestation conduit à la matorralisation de la forêt et la dégradation en s'aggravant cause la dématorralisation qui instaure une steppisation expliquée par l'augmentation des steppes de 17,21% (Figure 41).

Sur la période considérée, la diminution des terrains agricoles atteint 10,35% de la superficie qu'ils occupaient en 1997. Cette diminution assez importante est certainement en faveur des sols sans usage ou boisés. La dynamique démographique conjuguées aux effets des changements climatiques peuvent en être la cause. En effet, au Maroc, où la petite agriculture prédomine, la désertification de plusieurs millions d'hectares et la perte de terres cultivables sous l'effet des facteurs climatiques et anthropiques ont contribué aux processus migratoires *(Requier-Desjardins, 2008)*. Le taux d'accroissement démographique du milieu rural de la région Fès-Meknes est de -0,20 entre l'année 2004 et l'année 2014 *(Haut-Commissariat au Plan, 2017)*.

Tableau 24: Variations de l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi après deux décennies (1997/2017)

Occupation des sols	Pourcentage de surface	
	Occupation des sols 1997	Occupation des sols 2017
Forêt dense	22	2,01
Forêt Moyennement dense	8	7,48
Forêt claire	10	12,42
Matorral	--	25,07
Steppe	2	19,21
Zone de parcours	34	8,8
Terrain nu		11,03
Agriculture	24	13,65
Urbanisation	--	0,22
Eau	--	0,11
Totale	100	100

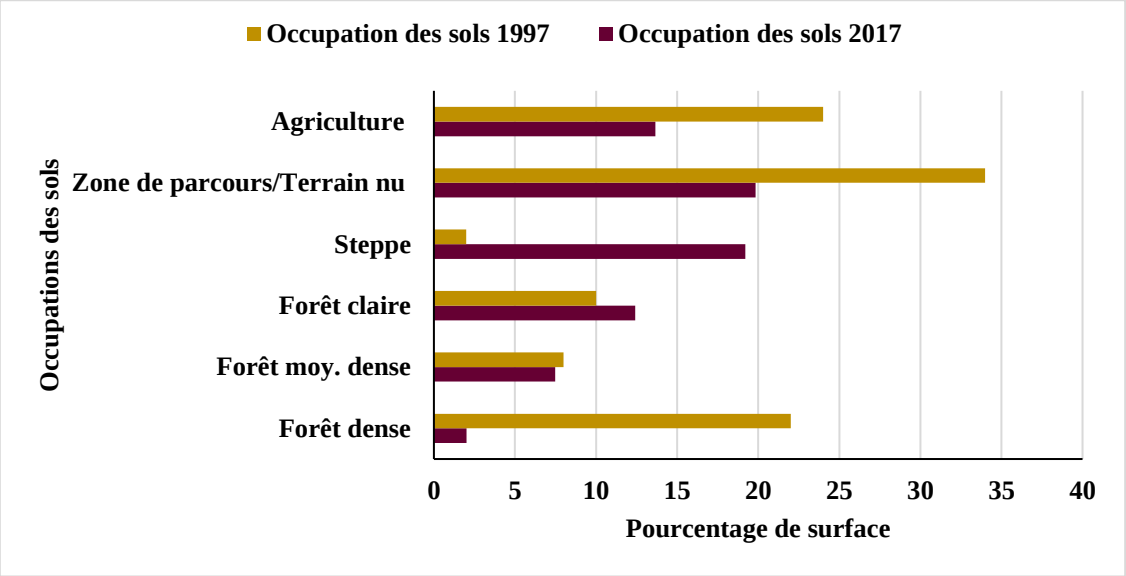


Figure 41: Variations des occupations des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi après deux décennies (1997/2017)

III. Dynamique spatio-temporelle de la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi

Le couvert végétal est sous l'action combinée des effets des fluctuations climatiques et de l'action anthropique. Actuellement il s'avère important de faire un suivi du couvert végétal dans le temps et l'espace, rendu possible grâce à la télédétection et les SIG qui permettent l'extraction des cartes de végétation. La télédétection de la végétation repose sur la forte absorption du rayonnement rouge par les végétaux verts, alors qu'ils réfléchissent la lumière solaire dans les longueurs d'onde correspondant à l'infrarouge. Les capteurs des satellites sont équipés de canaux centrés sur ces portions spectrales. Les indices de végétation mettent en évidence les relations entre le taux du couvert végétal et des combinaisons linéaires des données de ces canaux. Le plus utilisé parmi ces indices de végétation est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) *(Tucker, 1979)* qui correspond à une expression simple du contraste entre les valeurs mesurées dans les bandes rouge (R) et infrarouge (IR) selon l'équation 27.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \qquad (27)$$

Le NDVI n'est pas uniquement sensible aux variations de l'abondance du couvert végétal mais aussi aux effets atmosphériques et aux propriétés spectrales des sols qui peuvent modifier le contraste Réflectance R/Réflectance IR quand ils sont que partiellement recouverts par la végétation. En effet, dans le cas des sols à couvert végétal de densité moyenne, le

rayonnement solaire reçu puis réfléchi par les sols interagit avec le couvert végétal et les propriétés spectrales du mélange sol-végétation ne varient pas de façon linéaire avec la proportion des deux composants *(Escadafal et Huete, 1991)*.

Afin de remédier à ces perturbations introduites par les effets atmosphériques, un indice de végétation a été ajusté. Il s'agit de l'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Equation 28) *(Huete, 1988)*

$$\boldsymbol{SAVI = \frac{IR - R}{IR + R + L}\,(1 + L)} \qquad \textbf{(28)}$$

Où L est un facteur d'ajustement indépendant du type de sol. Il est égal à 0 pour une végétation très dense et 1 pour une végétation clairsemée. La valeur L=0,5 permet un meilleur ajustement (Huete, 1988) quand la densité du couvert végétal varie, comme dans le bassin versant Allal Al Fassi où la couverture végétale est relativement homogène.

Afin de mieux comprendre la dynamique du couvert végétal du bassin versant Allal Al Fassi, une étude diachronique est menée au moyen des deux indices de végétation NDVI et SAVI mettant en évidence l'ampleur des changements du couvert végétal entre l'année 1985 et l'année 2020. Pour ce faire 35 images satellitaires Landsat (Landsat 4-5, Landsat 7 et Landsat 8) ont été choisies (Tableau 25). L'ensemble des images est saisi pendant la saison de maturation de la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi qui correspond aux mois de mars et avril désignant la période où le feuillage des cultures est pleinement développé et le NDVI atteint sa valeur maximale *(Rojas et al. 2014)*.

Tableau 25: Caractéristiques des données satellitaires utilisées

Année	Image	Capteur	Radiomètre	Bande	Résolution	Longueur d'onde (µm)
1985-1999	Landsat 4-5	TM (Thematic Mapper)	TM	1 (B)	30m x 30m	0,45 - 0,52
				2 (V)	30m x 30m	0,52 - 0,60
				3 (R)	30m x 30m	0,63 - 0,69
				4 (IR)	30m x 30m	0,76 - 0,90
				5 (SWIR-1)	30m x 30m	1,55 - 1,75
				6 (TIR)	120m x 120m	10,4 - 12,5
				7 (SWIR-2)	30m x 30m	2,08 - 2,35
2000-2012	Landsat 7	1 capteur embarqué: ETM+ (Enhanced Thematic Mapper +)	ETM+	1 (B)	30m x 30m	0,45 - 0,52
				2 (V)	30m x 30m	0,53 - 0,61
				3 (R)	30m x 30m	0,63 - 0,69
				4 (IR)	30m x 30m	0,78 - 0,90
				5 (SWIR-1)	30m x 30m	1,55 - 1,75
				6 (TIR)	60m x 60m	10,4 - 12,5

				7 (SWIR-2)	30m x 30m	2,09 - 2,35
				8 (Pan)	15m x 15m	0,52 - 0,90
2013-2020	Landsat 8	2 capteurs embarqués OLI (Operational Land Imager) TIRS (Thermal Infrared Sensor)	OLI	1 (C/A)	30m x 30m	0,43 - 0,45
				2 (B)	30m x 30m	0,45 - 0,51
				3 (V)	30m x 30m	0,53 - 0,60
				4 (R)	30m x 30m	0,63 - 0,68
				5 (PIR)	30m x 30m	0,85 - 0,88
				6 (SWIR-1)	30m x 30m	1,56 - 1,66
				7 (SWIR-2)	30m x 30m	2,10 -2,30
				8 (Pan)	15m x 15m	0,50 - 0,68
				9 (Cirrus)	30m x 30m	1,36 - 1,39
			TIRS	10 (TIR-1)	100m*100m	10,60 - 11,19
				11 (TIR-2)	100m*100m	11,50 - 12,51

III.1. Indice de végétation par différence normalisé NDVI

La courbe de l'évolution de l'indice NDVI ne montre aucune tendance dans la série, confirmée par le test de Mann-Kendall. Etant donné que la P-valeur calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0,05, l'hypothèse ne peut pas être rejetée. La dynamique de la végétation montre une variabilité peu marquée selon les années avec un coefficient de variation interannuel moyen de seulement 14,50%. Elle ne présente aucune corrélation avec l'indice de précipitations standardisé (SPI_3) (Figure 42).

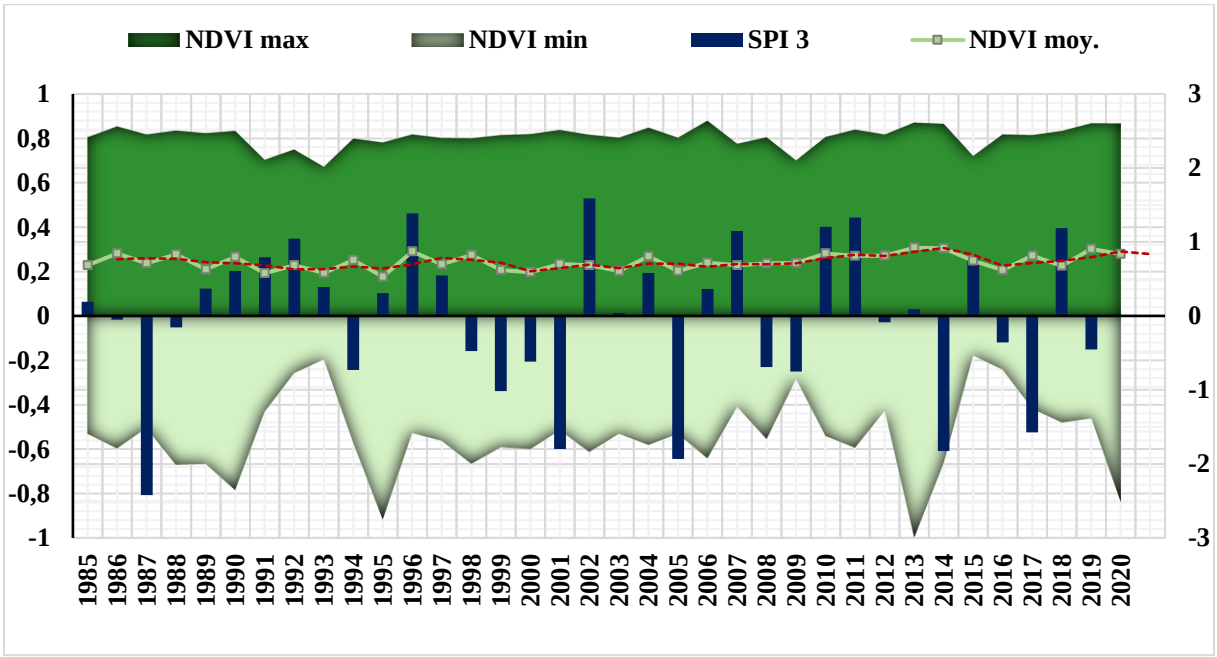


Figure 42: Variations interannuelles de l'indice NDVI et SPI3 dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

Les années de forte activité végétale dans le bassin versant Allal Al Fassi sont 2013, 2014, 2019 et 1996 avec des valeurs de NDVI moyen de 0,30 pour les trois premières années et 0,28 pour l'année 1996. A l'opposé, les années 1991, 1993, 1995 et 2000 représentent les années de faible activité végétale au cours de la série temporelle 1985-2020, les valeurs du NDVI moyen sont de 0,17 pour l'année 1995 et 0,19 pour les trois dernières années (Figure 43 et 44).

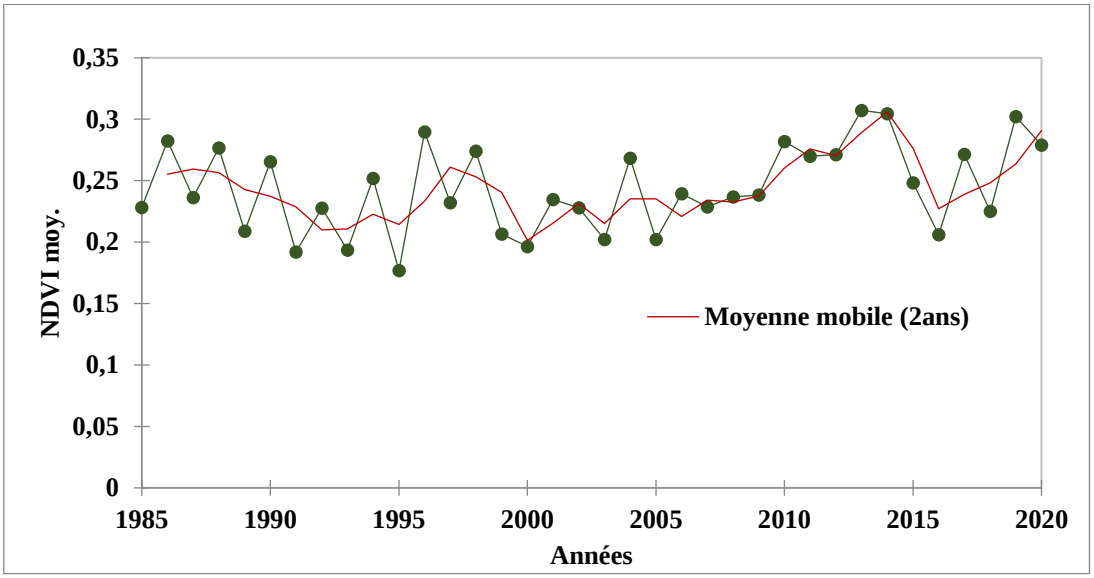


Figure 43: Variations interannuelles de l'indice NDVI moyen dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

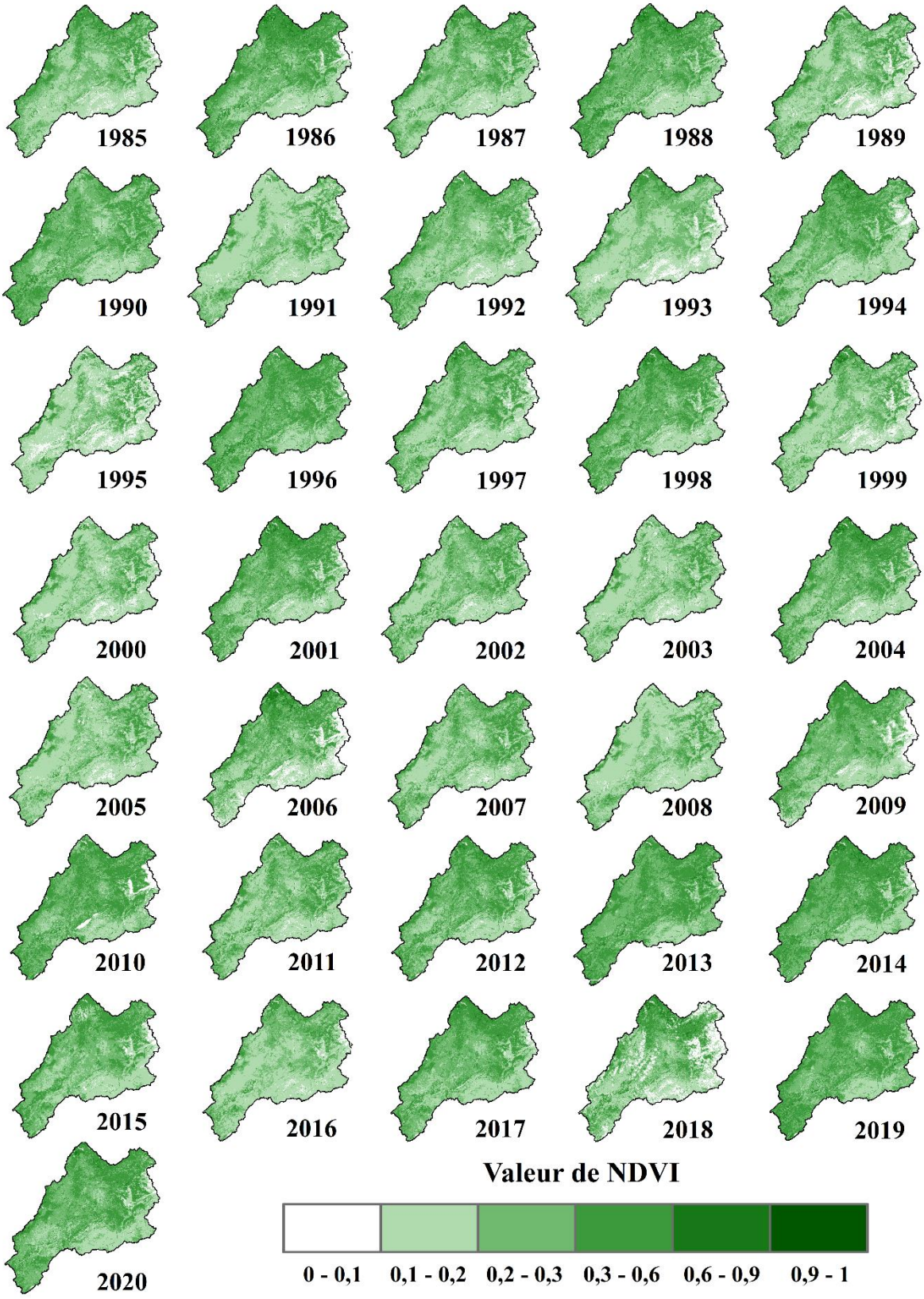


Figure 44: Dynamique spatio-temporelle de l'indice NDVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

III.2. Indice de végétation ajusté pour le sol SAVI

L'analyse de la courbe de variation de l'indice SAVI, montre une évolution qui ne suit aucune tendance significative. Le test de Mann-Kendall confirme qu'il n'y a pas de tendance dans la série. Etant donné que la P-valeur calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0,05, l'hypothèse est maintenue. La dynamique de la végétation montre une variabilité bien marquée d'une année à l'autre avec un coefficient de variation de 43,62%. En effet une année de très faible productivité végétale peut être intercalée par deux années de grande productivité végétative. Cette dynamique interannuelle de la végétation masque certainement une variabilité intra-annuelle différenciée. La pente d'évolution temporelle de la végétation est négative. L'indice SAVI ne présente aucune corrélation avec l'indice de précipitations standardisé (SPI_3) (Figure 45). La variation de la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi n'est pas directement orchestrée par les facteurs climatiques.

Les années de forte activité végétale dans le bassin versant Allal Al Fassi sont 2003, 2019, 1996 et 1986 avec des valeurs de SAVI moyen de 0,36, 0,30, 0,29, 0,28 respectivement. A l'opposé, les années 2016, 2007, 2001 et 2013 qui représentent les années de faible activité végétale au cours de la série temporelle 1985-2020, ont des valeurs du SAVI moyen de 0,02, 0,05, 0,06 et 0,07 respectivement (Figure 46 et 47).

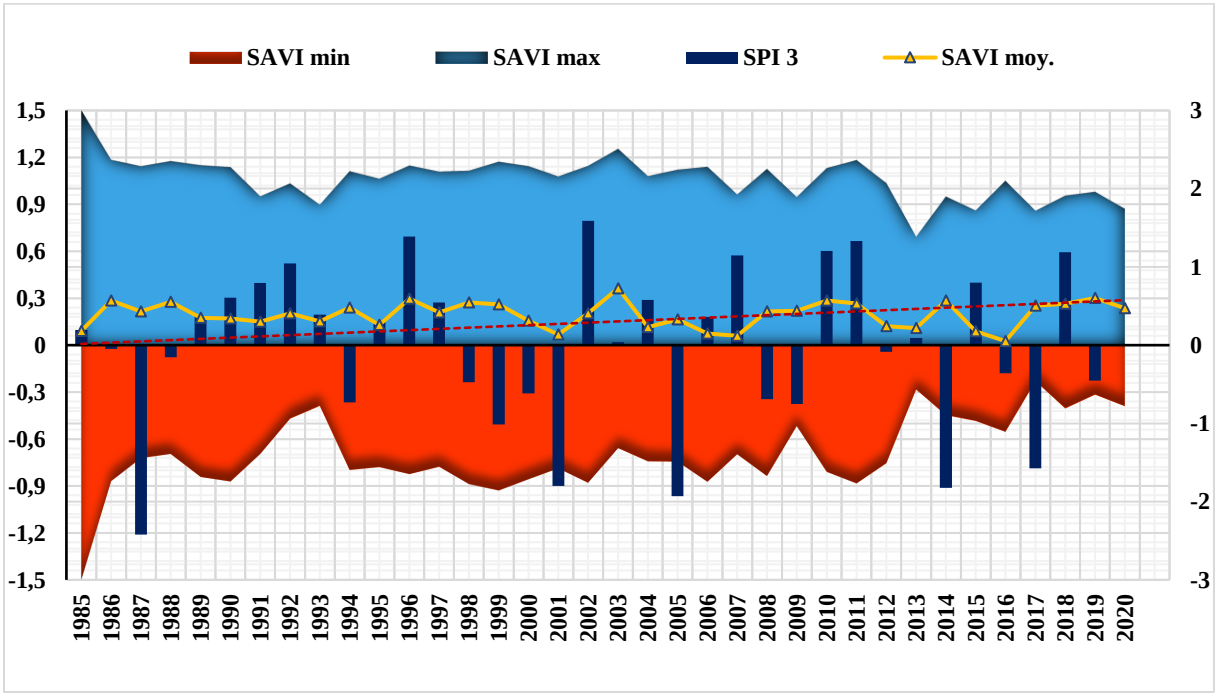


Figure 45: Variations interannuelles de l'indice SAVI et SPI_3 dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

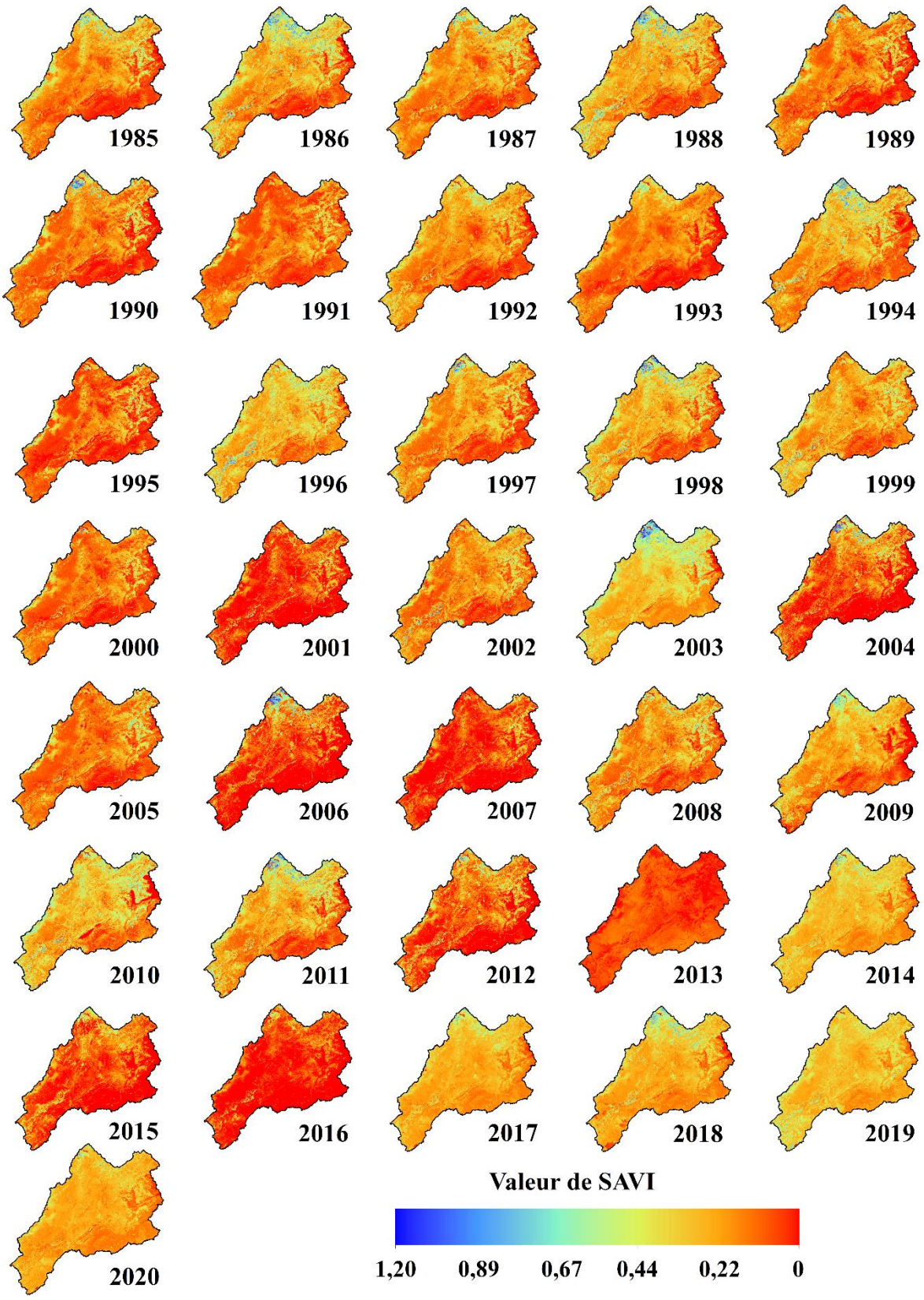


Figure 46: Dynamique spatio-temporelle de l'indice SAVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

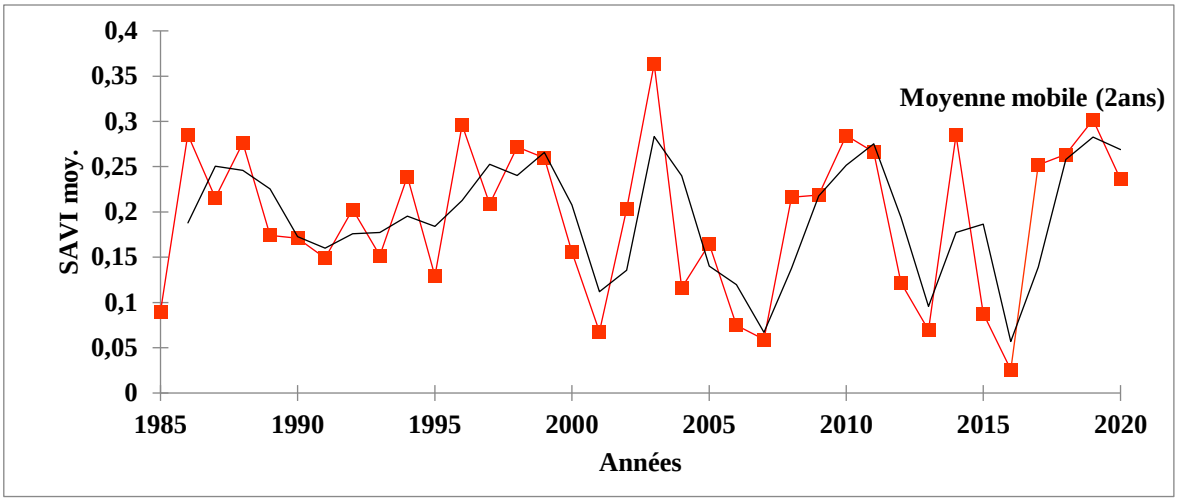


Figure 47: : Variations interannuelles de l'indice SAVI moyen dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

III.3. Comparaison des indices NDVI et SAVI

La figure 48 illustre la comparaison des indices NDVI et SAVI en utilisant une résolution spéciale de 30 m. Les indices de végétation NDVI et SAVI sont moyennement corrélés avec un coefficient de corrélation de Pearson (r) égal à 0,32 et un coefficient de détermination R^2 expliquant 10,36% seulement de la variabilité du NDVI (Figure49). Comme la P-valeur est supérieure ou égale à 0,05, il n'y a pas de relation statistiquement significative entre NDVI et SAVI au niveau de confiance de 95,0% ou plus.

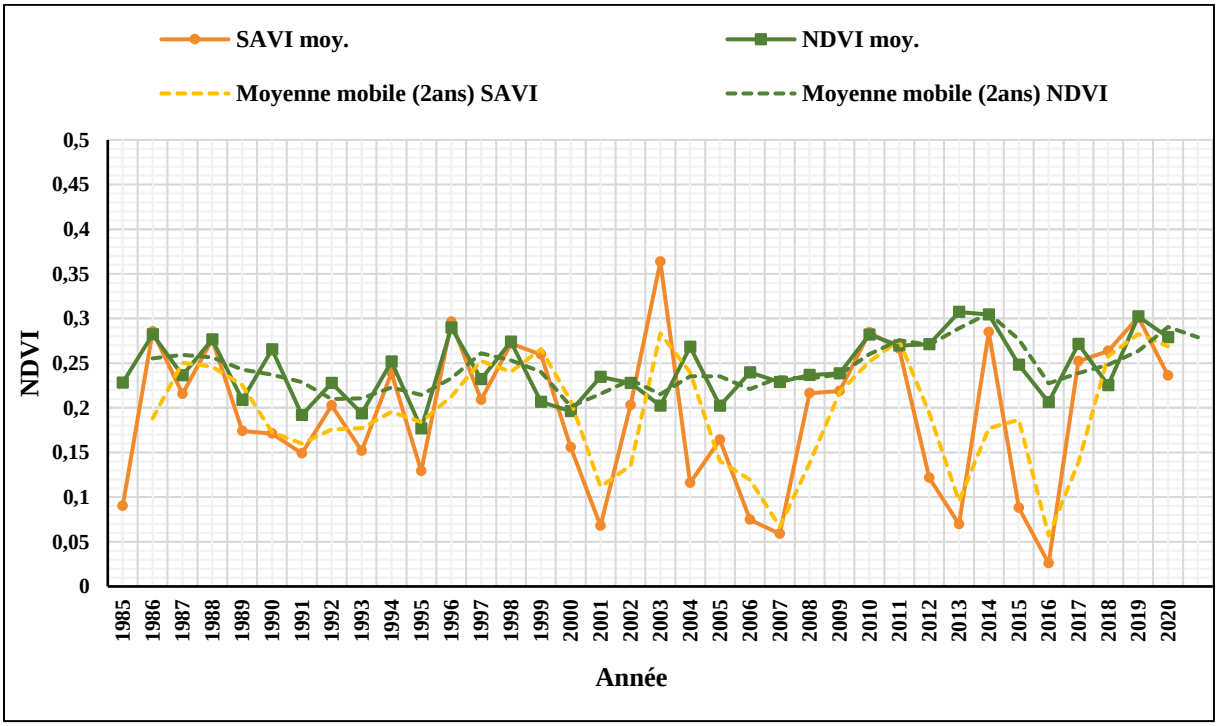


Figure 48: Comparaison des indices NDVI et SAVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

Les courbes des valeurs moyennes des indices NDVI et SAVI montrent que le dernier présente une grande variabilité de l'activité végétative dans le bassin versant Allal Al Fassi au cours de la série temporelle 1985-2020. Il est clair que l'indice SAVI présente une plus grande sensibilité à la présence de la végétation, pour une résolution de 30m par rapport à l'indice NDVI.

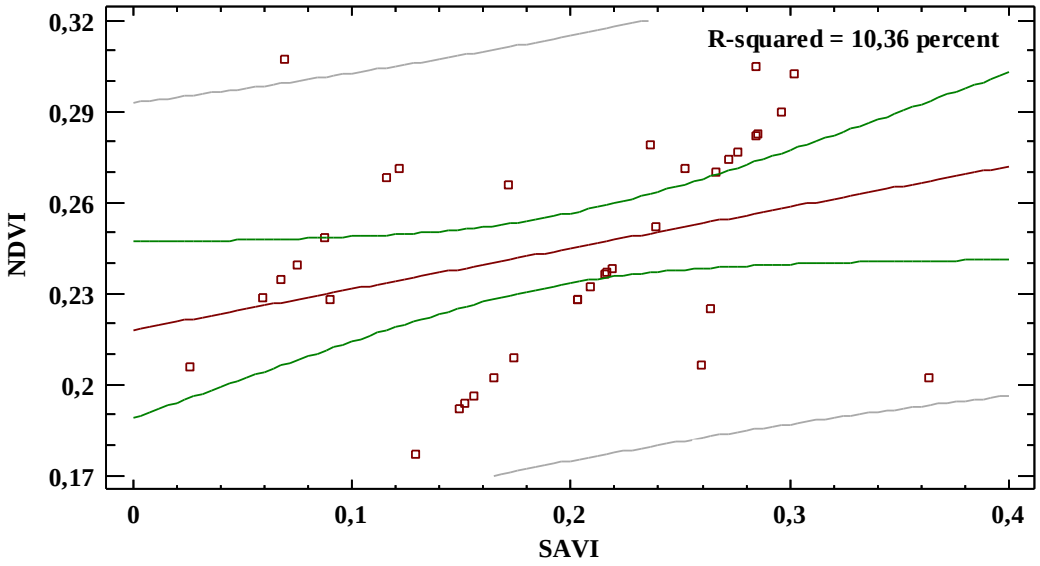


Figure 49: Courbe de régression des indices NDVI et SAVI

III.4. Evolution sol nu/végétation par les indices NDVI et SAVI

Les figures 50 et 51 illustrent les résultats de quantification de la végétation et des sols nus dans le bassin versant Allal Al Fassi, obtenus par l'analyse des indices NDVI et SAVI. Les résultats du NDVI et du SAVI ont été reclassifiés en deux classes : terrains nus et végétation. Ils ne montrent aucune corrélation entre les deux avec r=-0,062 et R^2 n'expliquant que 4% de la variation des indices. Le test de Mann-Kendall ne montre aucune tendance pour les deux indices.

L'indice SAVI, étant étalonné de manière à normaliser les variations liées à la nature du sol afin qu'elles n'influent pas sur la mesure du couvert végétal, montre une grande variabilité des sols nus au dépend de la végétation avec un coefficient de variation de 24,76%. La pente de la courbe de la tendance linéaire des sols nus est négative. L'indice NDVI ne montre pas de fluctuations significatives avec un coefficient de variation de seulement 5,43%.

Globalement, l'indice NDVI n'est pas approprié pour le suivi de la végétation à l'échelle du bassin versant Allal Al Fassi, avec une résolution des données de base de 30m. En effet les effets du sol peuvent augmenter et influer sur les valeurs de l'indice, montrant ainsi une faible

variation de la végétation. Quant au SAVI, il a été développé pour éliminer le facteur sols sur la réflectance de la végétation en utilisant le facteur d'ajustement L. L'indice de végétation SAVI est plus approprié que l'indice NDVI, notamment en zones semi-arides où le sol nu est plus élevé et en particulier avec une résolution spatiale moyenne des données de base.

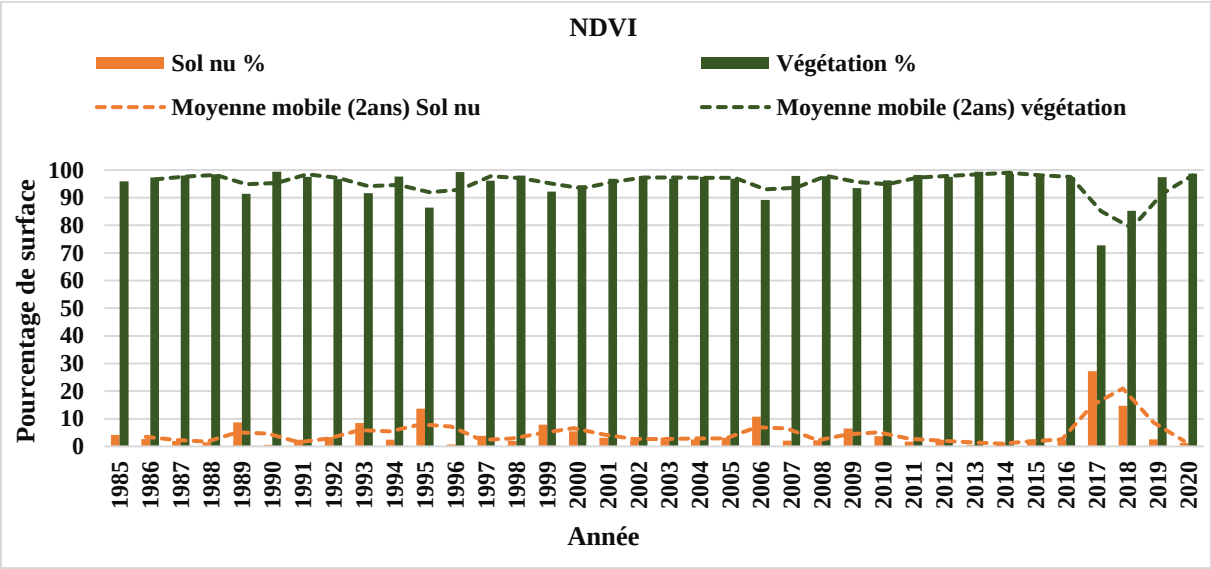


Figure 50:Evolution spatio-temporelle de la végétation et du sol nu par l'indice NDVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

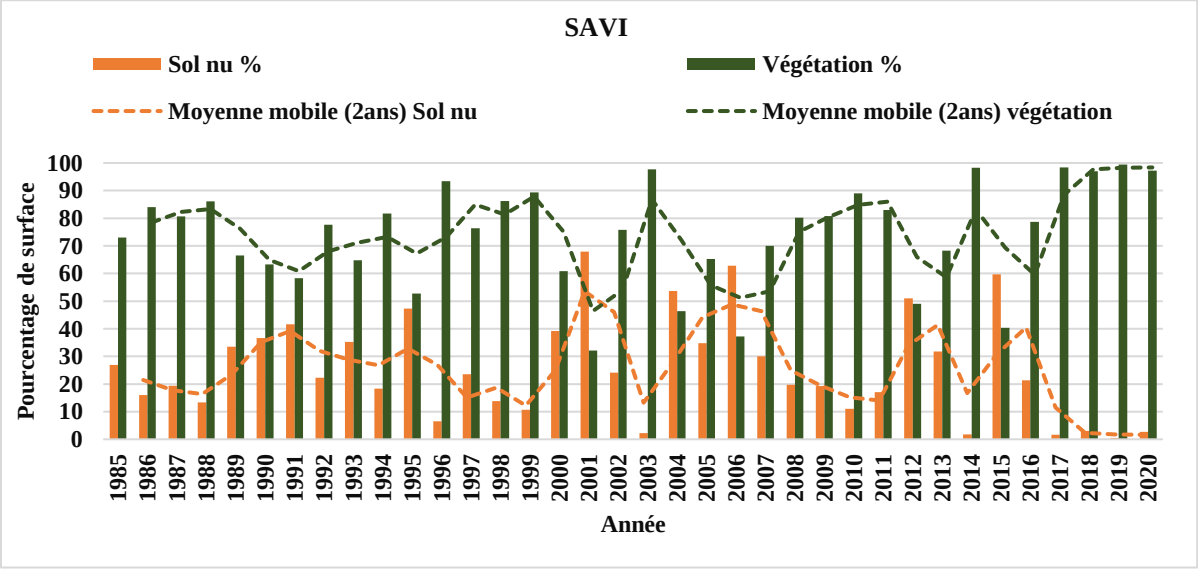


Figure 51: Evolution spatio-temporelle de la végétation et du sol nu par l'indice SAVI dans le bassin versant Allal Al Fassi (1985-2020)

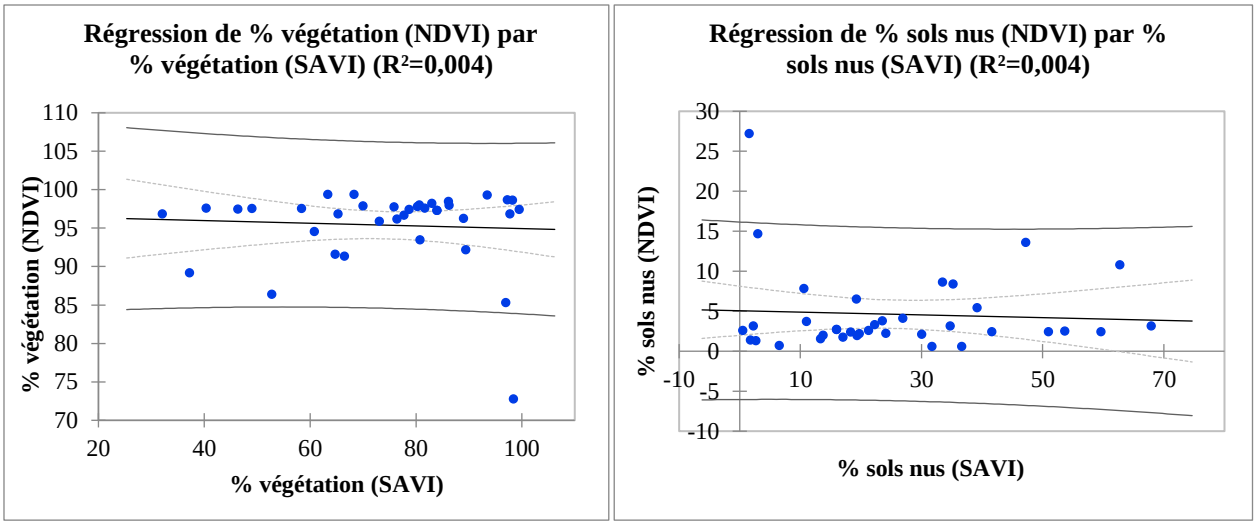


Figure 52: Régression des pourcentages de la végétation et du sol nu par les indices SAVI et NDVI

IV. Conclusion

La couverture végétale est l'un des facteurs les plus importants dans la prévention et la lutte contre l'érosion. Tenant compte des différentes dégradations qu'elle peut subir dans le temps et dans l'espace, une carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi est réalisée par le traitement d'image issue des acquisitions satellitaires Landsat8 de 30m de résolution, par une classification supervisée moyennant Systèmes d'Information Géographique, logiciels de traitement d'image par télédétection et plusieurs missions de terrain. La validation et l'évaluation ont montré que la classification est de très bonne qualité.

La répartition de l'occupation des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi est bien complexe, dominée par le matorral (25% de la superficie totale) suivi par les steppes (19% de la superficie totale). Les terrains agricoles s'étendent sur 14% de la superficie, prédominant principalement la province de Sefrou. Les classes sol nu et zones de parcours occupent 20% de la superficie. Les forêts, dense, moyennement dense et claire, occupent un total de 22% de la superficie. Les plans d'eau dans le bassin versant Allal Al Fassi ne dépassent pas 0,11% de la superficie totale, représentés principalement par la retenue du barrage Allal Al Fassi, dayat Ifrah, dayat Aguelmam Tiffounassin et dayat Aguelmam Sidi Ali.

La comparaison entre l'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi entre l'année 1997 et l'année 2017 montre une régression très importante de la forêt (18%) menant à l'apparition du matorral, indicateur important de la dégradation de la végétation naturelle dans le bassin versant. Elle montre aussi l'augmentation des steppes de 17,21% et la diminution des terrains agricoles de 10,35%.

Les résultats de la dynamique spatio-temporelle de la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi ont permis de conclure que les relations qui existent entre la dynamique et la végétation et le facteur climatique sont très faibles, voire inexistantes. Ils ont permis aussi de démontrer la pertinence des indices de végétation pour l'étude diachronique du couvert végétal. L'indice SAVI s'avère plus approprié pour le suivi de la végétation notamment dans les zones semi-arides où les sols nus sont importants avec une résolution moyenne des données de base (30m).

La variation interannuelle de la végétation par l'indice SAVI est beaucoup plus marquée que celle par l'indice NDVI. En effet, le SAVI élimine le facteur sols sur la réflectance de la végétation par l'utilisation du facteur d'ajustement L, contrairement au NDVI pour qui les effets du sol peuvent augmenter et influer sur ses valeurs, d'où la faible variation interannuelle. Cette dynamique interannuelle de la végétation masque certainement une variabilité intra-annuelle bien différenciée. Les deux indices ne montrent aucune tendance dans la série temporelle assez importante (1985-2020). Hypothèse est confirmée par des tests de Mann-Kendall. Etant donné que la P-valeur calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0,05, l'hypothèse n'est pas rejetée.

Les indices NDVI et SAVI ne présentent aucune corrélation significative avec l'indice de précipitations standardisé (SPI_3). La variation de la végétation dans le bassin versant Allal Al Fassi n'est pas directement orchestrée par les facteurs climatiques.

CHAPITRE IV

Facteur anthropique et vulnérabilité

▪ Chapitre V : Facteur anthropique et vulnérabilité

L'humanité primitive s'intégrait parfaitement à la biosphère sans causer plus de dégâts de n'importe quelle autre espèce, prélevant par la cueillette ou par la chasse une part des revenus des écosystèmes sans altérer le capital. L'action destructrice commence avec l'apparition de l'outil et du feu et celle de la civilisation agraire qui entraîne de grands défrichements au détriment des forêts. La destruction s'accélère au cours de l'Antiquité, du Moyen-Age et du début des temps modernes avec l'augmentation rapide de la population. Mais c'est depuis les derniers siècles que l'augmentation très rapide des effectifs, notamment l'explosion démographique et surtout l'apparition des engins mécanisés, et des moyens de transport qui ont si brutalement accentué la destruction des milieux naturels que l'épuisement des ressources de la planète, ou du moins de certaines d'entre elles.

La préservation de l'environnement nécessite un équilibre entre l'action humaine et les ressources naturelles. Le facteur anthropique est un des moteurs essentiels de l'évolution des géosystèmes. Depuis plusieurs millénaires, les activités humaines, particulièrement l'agriculture, ont conduit à la transformation progressive d'une grande partie des surfaces terrestres. En effet, l'intensification des pratiques, notamment la fertilisation, les pesticides, le pâturage, le travail du sol... mène forcément à un effet négatif sur la biodiversité en terme de réduction de la richesse spécifique. Le drainage des terrains agricoles, la construction des barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau, modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique. La construction des barrages perturbe de différentes manières le fonctionnement des rivières. Ils modifient leur régime hydrologique, perturbent les conditions écologiques à l'amont comme à l'aval de la retenue, diminuent le pouvoir auto-épuratoire, modifient les processus d'érosion et de transport solide, stockent les sédiments et les polluants, fragmentent l'habitat des espèces aquatiques et font obstacle aux déplacements des grands migrateurs. Enfin, ils constituent un danger en cas de rupture et peuvent aggraver les risques d'inondation en aval.

L'agriculture intensive n'est pas seulement affaire de superficie utilisée mais surtout les systèmes de production agricole caractérisés par l'usage important d'intrants en cherchant à maximiser la production par rapport aux facteurs de production, qu'il s'agisse de la main d'œuvre, du sol ou des autres moyens de production, tel que le matériel agricole. Elle se caractérise par un ensemble de pratiques au niveau parcellaire, notamment l'augmentation des

intrants chimiques (engrais, pesticides), l'introduction de nouvelles cultures, le recours important à la monoculture, l'évolution du travail du sol et des calendriers des travaux, etc.

L'action humaine est un moteur de la dynamique, souvent régressive, rarement progressive. Elle se traduit par la déstabilisation ou le dysfonctionnement des écosystèmes entraînant, soit une accélération des mécanismes d'évolution, soit un blocage. Devant ces actions, souvent négatives, destructives, dégradantes et génératrices de déséquilibre et face à l'anthropisation généralisée des géosystèmes terrestres, la prise en compte de l'impact de l'homme sur les milieux naturels est devenue l'une des préoccupations majeures de l'étude actuelle du fonctionnement des écosystèmes.

Les écosystèmes méditerranéens témoignent d'une pression millénaire de l'homme sur les milieux naturels, soit par les activités agro-sylvo-pastorales qui contribuent fortement au façonnage des paysages, soit par les coutumes ancestrales d'incendies et de débroussaillement, soit par le développement urbain, les infrastructures, les aménagements touristiques multiples, les activités culturales modernes, pollutions chimiques par l'agriculture, le rejet de déchets dans les milieux naturels, incendies…. Toutes ces activités sont d'autant plus graves qu'ils agissent sur les milieux déjà fragilisés. « Il faut convenir qu'à la différence des rapports internes dans le géosystème, qui sont soumis aux lois naturelles, les rapports des géosystèmes avec les systèmes territoriaux de production doivent être considérés comme des rapports externes et soumis aux lois socio-économiques » *(Beroutchachvili et Bertrand, 1978).*

Le présent chapitre tente d'insérer l'analyse sociale dans la problématique du bassin versant Allal Al Fassi, à savoir l'érosion hydrique, en définissant le complexe territorial naturel à partir de l'étude des différentes composantes sociales comme la démographie, l'habitat, le régime foncier et les systèmes culturaux et la mesure de leur vulnérabilité. Le bassin versant apparaitrait alors à la fois comme une structure naturelle fonctionnelle et comme un produit de l'action social.

I. Caractéristiques démographiques

L'étude du facteur anthropique nécessite la mise en évidence de la croissance démographique et de l'installation humaine dans le bassin versant Allal Al Fassi mettant en évidence les mutations des activités exercées et les modes d'occupation des terrains au cours du temps.

En se référant à l'évolution synthétique dressée par Jennan *(2004)*, le Moyen Atlas central n'a jamais été densément peuplé. Cette région, considérée comme une zone de passage, est différente des régions montagneuses voisines, caractérisée par un peuplement relativement récent et une densité humaine inférieure à la moyenne nationale. Elle est riche en ressources naturelles très variées (eau, forêt, mines, etc.). Au cours du XVI^{ème} siècle, la région a été utilisée comme terre de pâturage d'été par quelques tribus *(Seignobos, 2011)*. A la fin du XVIII^{ème} siècle les tribus berbères Sanhaja ont occupé la partie centrale du Moyen Atlas. En 1960, la densité n'était que de 12 hab/km^2 jusqu'au début du XXème siècle où la région est devenue peu peuplée *(Noin, 1970)*.

L'évolution de l'installation humaine et la croissance démographique dans le bassin versant Allal Al Fassi sont accompagnées, dans le temps et l'espace, par des mutations de l'occupation des sols et des activités exercées. En effet, le bassin versant Allal Al Fassi a connu une intensification des exploitations agricoles, en exerçant une pression inquiétante sur les ressources naturelles (eau, forêt, sol…).

Les résultats des recensements des années 1982, 1994, 2004 et 2014 montrent que l'évolution démographique dans le bassin versant Allal Al Fassi, est en harmonie avec celle du Maroc (Figure 53) marquée par une augmentation entre 1982 et 2014 et un grand contraste intra-communal à hétérogénéité dans le taux d'accroissement. Ceci peut être expliqué par la concentration des populations dans les zones favorables aux pratiques agricoles, notamment, à proximité des ressources en eau, le long des oueds et dans les cuvettes. Entre 1982 et 2014, la population du bassin versant Allal AL Fassi est passée de 0,11 millions à près de 0,30 millions d'habitant, avec les zones montagneuses moins peuplées.

Cette évolution est bien marquée dans les communes urbaines où la population connait un accroissement exponentiel. La population rurale, quant à elle, connaissait des cycles d'augmentation et de réduction : une croissance entre 1982 et 1994 et une décroissance entre 1994 et 2004, avant d'entamer une évolution démographique positive jusqu'en 2014. Il faut toutefois souligner que cette évolution est certainement liée à celle de l'exode rural, au reclassement des centres ruraux en centres urbains et aux niveaux de la fécondité plutôt qu'à ceux de la mortalité. Tout cela, conduit à une redistribution de la population au profit des zones urbaines où l'effet est conjoint d'une augmentation de l'accroissement naturel et des conditions socio-économiques.

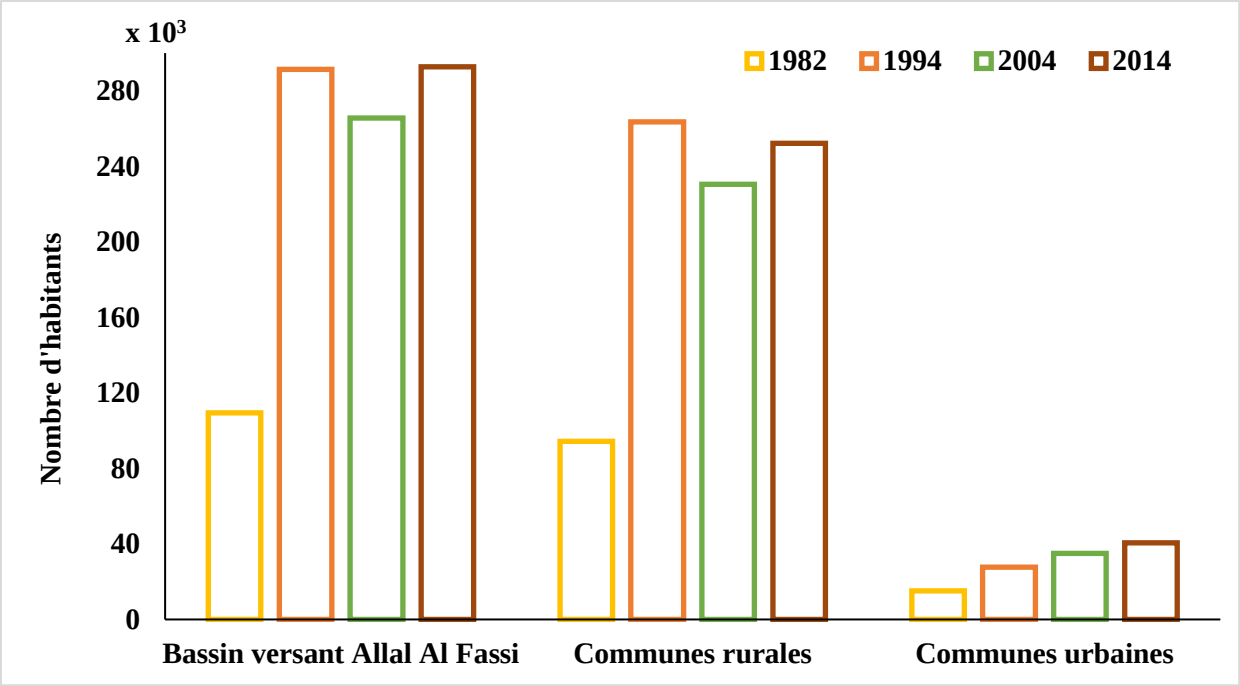


Figure 53: Evolution démographique du bassin versant Allal Al Fassi (1982-1994-2002-2014)

II. Erosion anthropique et lutte antiérosive

L'emprise de l'homme sur l'érosion hydrique se pose avec clairvoyance. Il contribue à rompre l'équilibre des écosystèmes et à accélérer l'érosion. En effet, la densité des populations a pour conséquence des modes de production, notamment dans le secteur agricole par des pratiques culturales inadaptées comme le défrichement du couvert végétal naturel en faveur des besoins agricoles, l'agro-productivisme, les intrants chimiques, la disparition de jachère, le surpâturage, les brulis, etc. *(Rishirumuhirwa, 1993 ; Leménager et al., 2014)*.

L'homme agit sur le phénomène d'érosion en l'accroissant mais aussi en le réduisant. Les activités protectrices ou réparatrices restent limitées et se focalisent principalement sur la lutte contre les risques naturels et la conservation des terrains agricoles. Bien que ces aménagements soient efficaces, ils causent le déséquilibre des écosystèmes naturels. De ce fait, les scénarios antiérosifs dont l'utilité pourra sensiblement améliorer ou réduire en grande partie les conséquences désastreuses de la dynamique érosive, doivent se baser sur la conception d'un plan de développement qui respecte l'intégrité de l'environnement, l'utilisation durable des ressources, l'efficacité, l'équité économique et sociale et la solidarité avec les générations à venir.

II.1. Facteurs d'érosion anthropique

Une forte pression démographique provoque l'épuisement des ressources et appauvrissement des sols et rend vulnérable les populations. La relation population-environnement doit nécessairement prendre en considération les espaces, qui à travers la distribution spatiale de la population apparaissent ainsi que des régions exerçant une surpression démographique qui fragilise les milieux *(Leménager et al., 2014)*. L'activité humaine néfaste est traduite principalement par l'excavation chaotique des sols pour l'implantation des terrains agricoles, des carrières, des habitats, des routes, etc. Les incendies répétés et le déboisement illégal détériorent les forêts favorisant le ruissellement et par conséquent l'érosion.

L'érosion hydrique est l'une des formes principales de l'action humaine, qui, entrant en contact avec la mainmise humaine et les processus d'érosion naturels déploie la vulnérabilité des terres culturales et pastorales *(Durruau, 2010)*. Depuis plusieurs millénaires, l'activité humaine, particulièrement l'agriculture, a conduit à une dégradation progressive dans une grande partie du globe terrestre *(Burel et al., 2008)*. Les préoccupations à propos de l'érosion et de la biodiversité se concentrent principalement sur la dégradation et la destruction des milieux naturels. En effet, de nombreux paysages gérés par l'homme contiennent une diversité comparable à celle des écosystèmes naturels *(Altieri, 1999)*. De ce fait, il parait évident d'intégrer non seulement les espaces naturels, mais aussi ceux gérés par l'homme *(Tscharntke et al., 2005)*. L'intensification de l'exploitation des terrains agricoles et forestiers est incontournablement la principale cause du changement planétaire et de la perte de la biodiversité. Cependant, l'utilisation rationnelle et la gestion durable des occupations des sols peuvent également être des éléments importants des programmes de conservation de la biodiversité à grande échelle *(Tscharntke et al., 2005)* (Figure 54).

Les pratiques culturales traditionnelles n'associent pas de façon systématique les techniques de fertilisation et de conservation des sols. La raréfaction des terres cultivables a entraîné la réduction de la jachère. Aux pratiques agricoles inadéquates, s'ajoutent les pratiques pastorales (surpâturage), la coupe de bois abusive (besoins domestiques, constructions et combustibles) et les feux de brousse. Ces défrichements abusifs dégarnissent le couvert végétal des espèces naturelles laissant apparaître par endroits de vastes zones nues, les exposant à l'agression des facteurs climatiques, notamment l'érosion hydrique.

Compte tenu des potentialités naturelles du bassin versant Allal Al Fassi, il a vécu des mutations profondes liées à la croissance démographique. Ces mutations sont liées aussi bien à l'histoire politique du pays, notamment la succession de dynasties qu'à la croissance

démographique et aux changements socio-économiques. En effet, l'occupation des sols subi des transitions au fil du temps parallèlement aux transitions démographiques et économiques. Les sociétés semblent vivre une séquence de dégradation suivant les différents les régimes d'occupation des sols, de la végétation naturelle avant la colonisation au défrichement des frontières, puis à l'agriculture de subsistance et aux petites exploitations agricoles et enfin à l'agriculture intensive, aux zones urbaines et aux activités récréatives *(Foley et al., 2005)* (Figure 54).

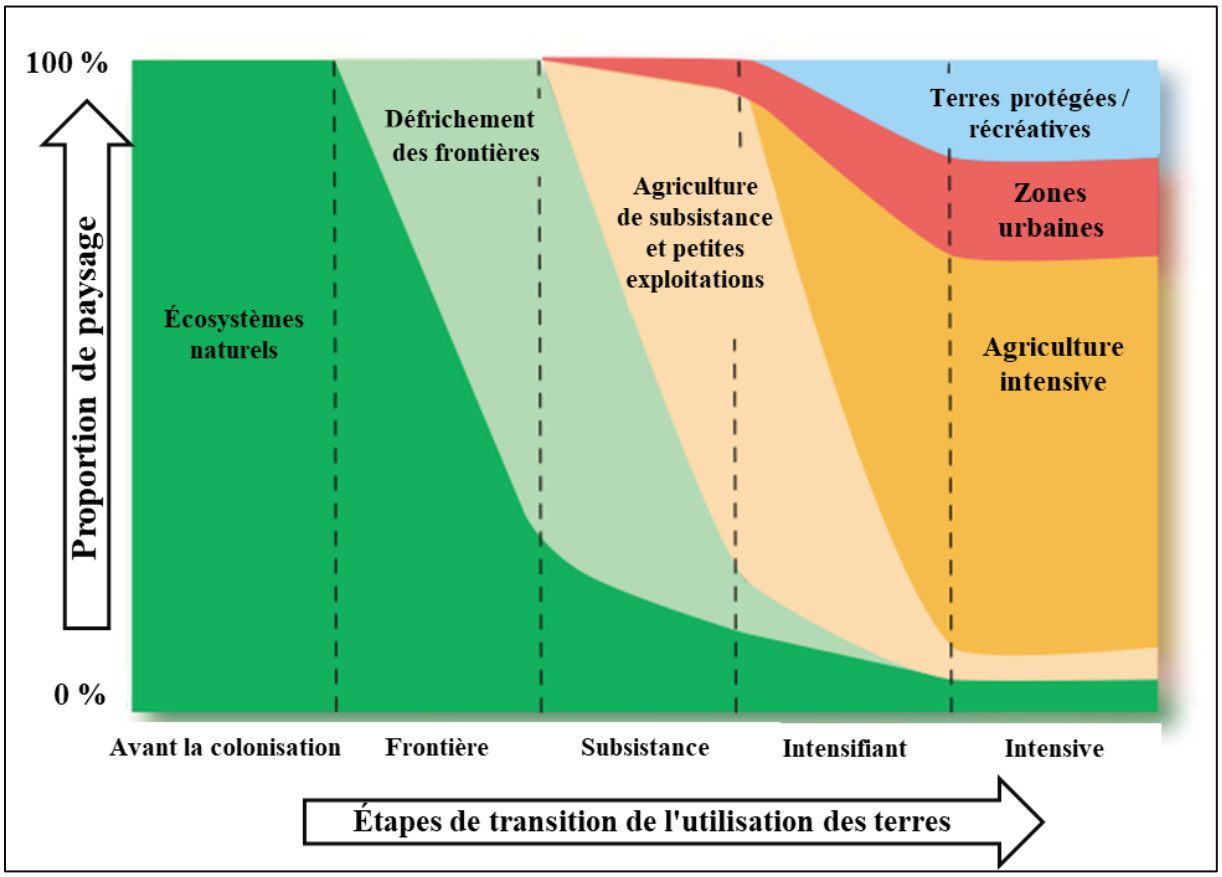


Figure 54: Transitions de l'occupation des sols (Foley et al., 2005)

La relation entre les activités anthropiques, l'occupation des sols et les changements environnementaux peut être décrite comme un système couplé homme-environnement avec des composantes socio-économiques, écologiques et biophysiques en tant que sous-systèmes *(Mather, 2006).* Par exemple, l'agriculture est influencée par le climat et la qualité des sols et, à son tour, affecte le climat, notamment par les flux d'énergie et d'eau et l'émission de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, et la qualité du sol par l'appauvrissement en matière organique, la destruction de sa structure, etc. La pression des populations envers les ressources naturelles et la biodiversité et l'effet du manque des ressources naturelles sur la qualité de vie des populations sont deux effets antagonistes. Selon cette approche, les sous-

systèmes humains qui couvrent les processus de prise de décision, notamment dans la gestion de l'occupation des sols (pratiques culturales et exploitation des ressources forestières, etc.), menèrent directement à des changements environnementaux (Figure 55).

L'homme et l'environnement sont étroitement liés, la gestion des occupations des sols et les modes d'exploitation des ressources naturelles par l'homme entrainent des changements dans le fonctionnement des processus écosystémiques et par conséquent leur capacité à subvenir au besoin en ressources naturelles. En effet, une gestion agricole non durable (intensive par exemple) conduit à la dégradation des sols sous forme d'érosion et par conséquent épuisement des éléments nutritifs des sols. La dégradation des sols qui en résulte entraîne la baisse du rendement des cultures obligeant les agriculteurs, tôt ou tard à abandonner leurs terres au dépend des terrains naturels.

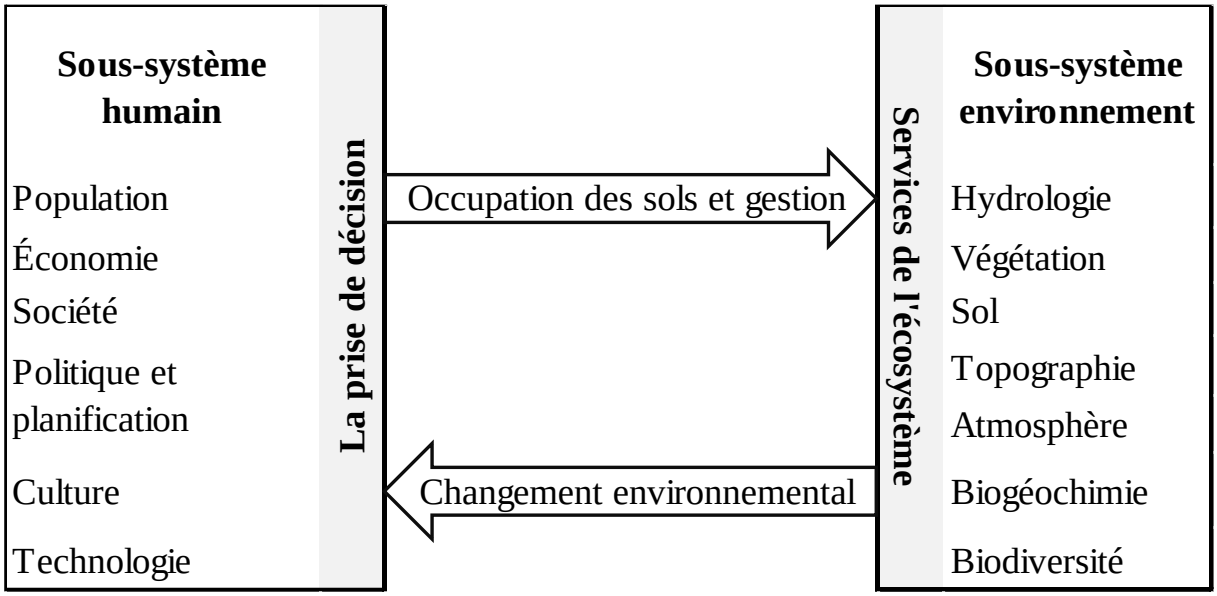


Figure 55: Modèle conceptuel reliant occupation des sols et gestion et changement environnemental (Mather, 2006)

II.2. Lutte antiérosive

La gestion intégrée des ressources naturelles dans les bassins versants est un processus basé sur la concertation des décideurs, des usagers et de la société civile. Elle vise la planification et la meilleure harmonisation des mesures de protection et d'exploitation des ressources naturelles. Et ce, dans une optique de développement durable.

Face à la situation alarmante causée par l'érosion hydrique au Maroc, la protection des bassins versants à travers la lutte contre l'érosion hydrique est alors devenue l'une des priorités du Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. A cet effet,

plusieurs milliers d'hectares en zones montagneuses ont été traités dans le cadre du projet Défense et Restauration des Sols (DRS) par l'Administration des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols (AEFCS), suite au dahir du 20 mars 1951 qui fait appel à la notion de l'approche participative attribuant à l'administration forestière le droit d'intervenir hors du domaine forestier pour cause d'utilité publique. Cette stratégie d'aménagement des bassins versants poursuivie par le Maroc depuis toutes ces années, résulte de l'intérêt que revêt la mobilisation des eaux et la réduction de l'envasement des retenues des barrages. Ce dernier a mis 1,5 million d'hectares comme tranche prioritaire et urgente à traiter à l'horizon 2020, dont le bassin versant Allal Al Fassi en amont de la retenue du barrage *(HCEFLCD, 2010)* qui connait une forte érosion aggravée par l'action anthropique, notamment l'exploitation irrationnelle et inadaptée des ressources naturelles. Plusieurs aménagements antiérosifs sont réalisés au niveau du bassin versant Allal Al Fassi, notamment dans les provinces de Boulemane et Sefrou (114 douars) entre l'année 2008 et l'année 2014 en coopération avec la Banque Japonaise de la Coopération Internationale et le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêt et la Lutte Contre la Désertification.

Les aménagements antiérosifs dans le bassin versant Allal Al Fassi sont élaborés en prenant en compte un ensemble de considérations techniques et socio-économiques, notamment la réduction de l'intensité de l'érosion, au moins au seuil de tolérance des sols, en prenant en considération la nature du sol, la topographie, l'utilisation des sols et le type d'érosion présente ; la gestion durable de ressources naturelles en se basant sur les bilan énergétique et fourrager appelant à la consolidation et au développement des ressources ligneuses et fourragères ; l'amélioration des revenus de la population appuyée sur l'étude socio-économique du bassin versant Allal Al Fassi qui signale un revenu agricole très faible par foyer. Cette amélioration suppose l'augmentation des rendements des cultures et l'orientation de la production vers des spéculations plus rentables : la participation de la population qui consiste à la collaboration des agriculteurs dans l'identification des problèmes posés au niveau des exploitations et le choix des différentes alternatives d'aménagement.

Les aménagements antiérosifs dans le bassin versant Allal Al Fassi peuvent être répartis en actions suivantes (Figure 56) :

- Aménagements des terrains agricoles,
- Aménagements fonciers,
- Aménagements hydro-agricoles,
- Aménagements forestiers,

- Aménagements des parcours,
- Aménagements du réseau hydrographique,
- Entretiens des plantations fruitières existantes,
- Infrastructures et équipements.

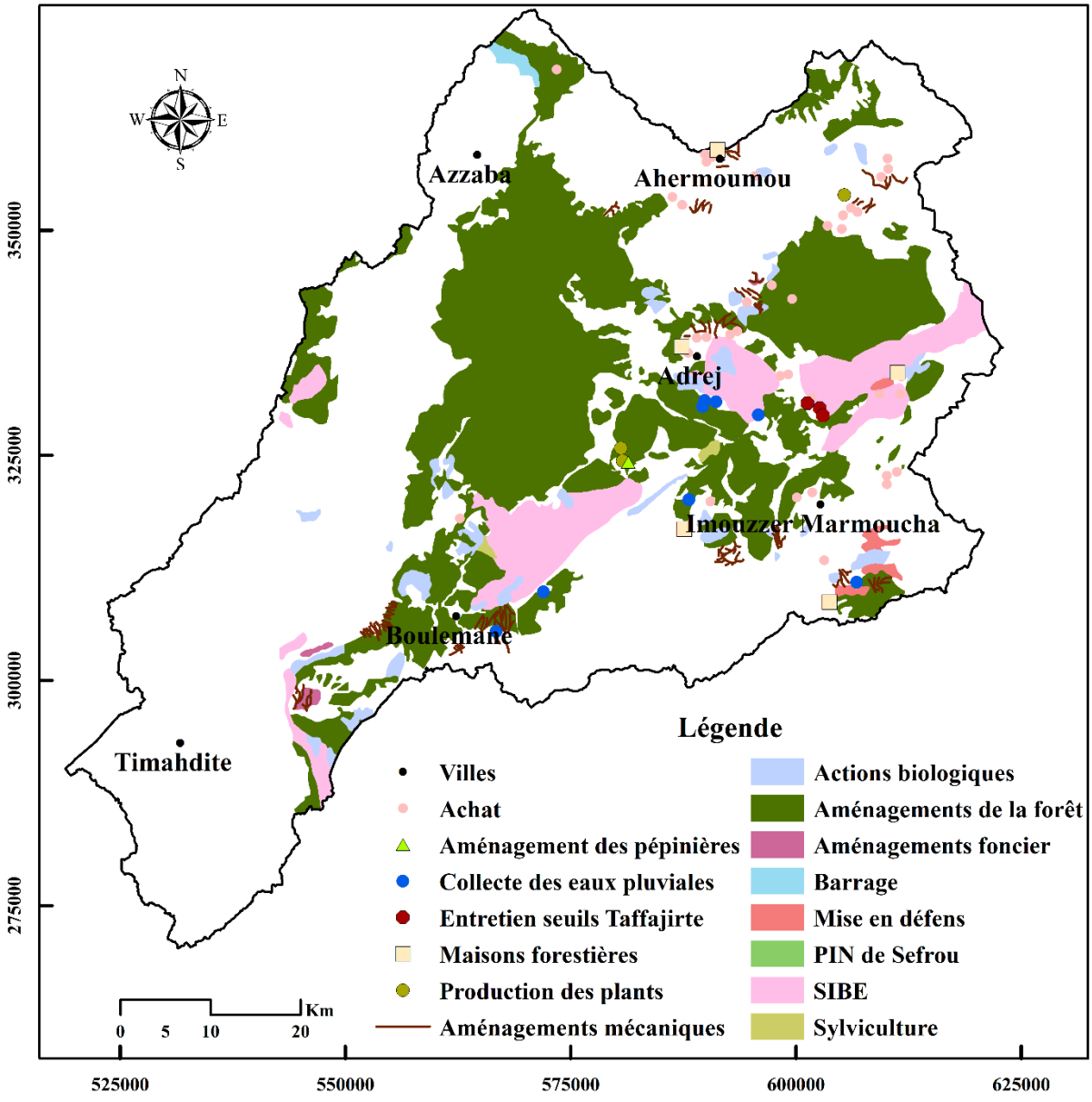


Figure 56: Carte des différents aménagements réalisés dans le bassin versant Allal Al Fassi (DREFLCD-FB, 2010)

II.2.1. Aménagements des terrains agricoles

Les terrains agricoles dans le bassin versant Allal Al Fassi sont sujet à une forte pression liée à la population et à la charge excessive du cheptel. L'érosion hydrique causée par l'agressivité des précipitations et les fortes pentes est aggravée par des pratiques culturales

inappropriées, notamment les labours dans le sens de la pente. Afin de limiter l'érosion, l'utilisation des sols doit s'approcher de leur vocation naturelle, intensifier les cultures sur des terrains à faible pente ayant un potentiel de production important et développer l'agroforesterie sur les terrains à fortes pentes et fort potentiel érosif.

Sur les terrains à faibles pentes, les interventions visent à intensifier les cultures à fort rendement, notamment le blé tendre et les cultures industrielles (oléagineuses), à améliorer la jachère par l'introduction des légumineuses et les cultures fourragères et à vulgariser les techniques du minimum labour permettant de garder une grande partie des résidus de cultures sur place. Cela permet de restituer les éléments minéraux et la matière organique exportés par les cultures tout en protégeant le sol contre l'érosivité des gouttes de pluies, des eaux de ruissellement, en particulier durant la saison d'automne.

Sur les terrains à pentes moyennes, les interventions consistent en la vulgarisation des techniques de préparation des sols en suivant les courbes de niveau afin de réduire le ruissellement, d'améliorer le bilan hydrique et d'augmenter le rendement ; l'installation des cultures en bandes alternées, notamment les céréales, les légumineuses et les cultures fourragères, suivent les courbes de niveau ; la confection de banquettes céréalières sur les sols profonds à substrat non marneux et la confection de cordons en pierres sèches suivant les courbes de niveau sur les terrains caillouteux, notamment dans les plantations fruitières.

Sur les terrains à fortes pentes, les interventions consistent à rétablir un couvert végétal par la plantation d'essences fruitières le long des courbes de niveau, soutenu par des ouvrages antiérosifs comme les banquettes, les fossés, les gradins, les murettes, etc.

II.2.2. Aménagements fonciers

L'aménagement foncier consiste en l'épierrage des terrains peu accidentés, caillouteux et à potentiel de production élevé afin de mettre en place des cordons et des murettes suivant les courbes de niveau. Des plantations fruitières sont réalisées le long des ouvrages antiérosifs et dans l'espace inter-ouvrage.

II.2.3. Aménagements hydro-agricoles

Les aménagements hydroagricoles visent l'augmentation de la productivité des sols et efficience des eaux d'irrigation. Ils correspondent à l'entretien et la réfection du réseau des séguias existant, le développement des techniques de petites terrasses irriguées et leur consolidation par des ouvrages ou des plantations et le développement des techniques de

collecte des eaux pluviales au profit de l'irrigation, de l'abreuvement et l'utilisation domestiques.

II.2.4. Aménagements forestiers

Le bassin versant Allal Al Fassi présente des potentialités sylvicoles importantes. L'étude socio-économique montre que ces potentialités sont sujettes à une importante dégradation résultant des exploitations excessives de bois et de fourrages. Plusieurs actions d'aménagement sont réalisées au niveau de la forêt et des parcours en forêt, les reboisements et les reconstitutions de la forêt constituent les actions majeures. Elles visent à réduire la dégradation, à améliorer le taux du couvert végétal de manière durable et à augmenter la production forestière. En effet, face au défrichement accentué et la régression inquiétante des formations forestières, les plantations permettent de consolider la forêt, rétablir l'équilibre entre celle-ci et les besoins des populations, conserver les sols, diminuer la quantité des eaux de ruissellement et réduire le déficit en produits ligneux. La reconstitution de la forêt favorise la réinstallation des espèces autochtones tel le Cèdre, le Pin d'Alep et le Thuya. Les interventions consistent en l'ameublissement des sols tout en produisant des gradins ou cuvettes pour améliorer le bilan hydrique du lit de semences ou des plants ; l'entretien des jeunes semis à travers des travaux de désherbage, binages, arrachage du sous-bois et la mise en défens durant la période fixée selon les espèces à régénérer.

Afin de satisfaire les besoins en bois, des plantations énergétiques à base d'espèces à croissance rapide sont réalisées au niveau des zones dégradées, localisées principalement aux voisinages des agglomérations.

II.2.5. Aménagements des parcours

Dans le bassin versant Allal Al Fassi, l'état des parcours est dégradé à cause de la surexploitation et la gestion irrationnelle. Les troupeaux broutent largement la végétation, qu'elle soit annuelle ou pérenne jusqu'au stade de la dégradation irréversible. Les aménagements des parcours visent à rétablir un équilibre entre la charge animale et le milieu naturel. Les interventions portent sur la préparation du sol (labour, scarifiage, etc.), l'introduction des espèces fourragères et pastorales, adaptées aux condition écologiques et édaphiques du milieu, l'épierrage des sols (les pierres récupérées à l'édification de cordons de pierres suivant les courbes de niveau), la fertilisation des sols afin de les protéger et augmenter la production fourragère et pastorale, l'aménagement des points d'eau, notamment le captage de sources superficielles, l'aménagement des puits existants et le creusement de nouveaux puits.

Les interventions concernent la constitution de margelles en béton, la construction des aires bétonnées et la confection des d'abreuvoirs.

II.2.6. Aménagements du réseau hydrographique

Le ravinement, stade d'érosion très avancé, est favorisé par la topographie, la lithologie et l'érosivité des pluies et aggravé par l'action anthropique, notamment par le défrichement, le déboisement et la mise en culture des versants à fortes pentes. La stabilisation des ravins, assurée par la combinaison des traitements biologiques et mécaniques, vise à réduire l'évolution des ravinements et rétablir le profil d'équilibre des ravins. Les corrections biologiques consistent en la végétalisation des ravins généralement accidentés et instables avec des sols peu fertiles. Elles permettent d'atténuer la dynamique des berges et des lits et de réduire la vitesse du ruissellement. Les espèces utilisées sont choisies en fonction de leur capacité d'adaptation au milieu local, leur action protectrice et leur rapidité de croissance. Les corrections mécaniques s'appuient sur la construction de seuils en gabions, en bois et en pierres sèches. Ils permettent de réduire la vitesse d'écoulement des eaux et de piéger les sédiments.

II.2.7. Entretiens des plantations fruitières existantes

La majorité des terrains plantés en arbres fruitiers, dans le bassin versant Allal Al Fassi, nécessite des travaux d'entretiens en vue d'améliorer la production et conserver les ressources en eaux et en sols. Les interventions correspondent essentiellement à la confection des cuvettes ou d'impluviums, le binage, la fertilisation minérale et organique, la vulgarisation des techniques de taille et les traitements phytosanitaires.

II.2.8. Infrastructures et équipements

L'enclavement de quelques douars et l'état des pistes dans le bassin versant Allal Al Fassi, principalement en période pluvieuse, présentent un obstacle majeur pour toute action de développement rural. Les interventions consistent en l'ouverture et l'entretien des pistes afin de désenclaver les régions inaccessibles et rendre accessibles les périmètres qui font objet d'autres interventions et faciliter le circuit de commercialisation des produits agricoles, la collecte des eaux pluviales, la réfection et bétonnage de seguia, les aménagements fonciers sur des terrains privés par épierrage et la construction des cordons en pierres sèches qui évoluent en terrasses, les achats visant le développement de la population locale et le maintien d'une source de revenu, il s'agit des achats et des acquisitions suivantes : plants fruitiers d'amandier et d'olivier, semences et plants, ruches d'abeilles, bulbes de Safran et matériels apicoles, etc.,

l'aménagement des pépinières et la production des plants et l'aménagement des maisons forestières.

III. Vulnérabilité

La gestion des risques nécessite la maitrise de l'aléa mais aussi la vulnérabilité territoriale. La présente étude tente d'acquérir une connaissance précise de la vulnérabilité territoriale, appropriée au risque d'érosion hydrique. L'étude est basée sur le recensement des différents enjeux présents dans le bassin versant Allal Al Fassi, qui tend à l'exhaustivité, et l'évaluation de leur vulnérabilité, dans la mesure où ils peuvent compromettre, perturber ou même interrompre le fonctionnement et le développement du bassin versant, en se basant sur une méthode d'aide à la décision hiérarchique multicritère, en respectant la répartition spatiale de cette vulnérabilité en faisant appel aux outils géomatique.

Les études en termes de vulnérabilité à l'érosion des milieux semi-arides ont permis de prouver leur fragilité. Ces milieux sont extrêmement sensibles à l'érosion hydrique, notamment pour l'absence ou le faible recouvrement végétal qui les caractérise et la forte variabilité intra et interannuelle des précipitations. Cette fragilité est bien intensifiée par l'empreinte anthropique, considérée comme un facteur extrêmement influant capable d'être à l'origine des bouleversements des écosystèmes. En effet, si on admet que l'homme, c'est-à-dire la société, est dans la nature, le facteur humain doit être pris en compte dans le schéma théorique du géosystème *(Beroutchachvili et Bertrand, 1978)*. Le facteur anthropique se limite à la prise en compte de l'impact économique et social sur le complexe territorial naturel, c'est-à-dire aux modifications apportées aux géofaciès et aux géohorizons et à leurs conséquences sur les états et le comportement du géosystème.

La vulnérabilité traduit la fragilité des éléments exposés, vis-à-vis d'un phénomène donné. Pour un niveau d'aléa donné, un enjeu sera d'autant plus affecté que sa vulnérabilité est forte. La réduction de la vulnérabilité lorsqu'elle est possible est un moyen de réduire le risque. Elle est définie par Burton et al. *(1978)* comme l'exposition aux différents dommages. Cette vulnérabilité est générée par des processus sociaux, économiques et politiques qui influencent la manière dont les risques affectent les gens de différentes manières et avec des intensités différentes. Elle exprime les caractéristiques d'une personne ou un groupe de personnes et leur situation qui influencent leur capacité à anticiper, à faire face, à résister et à se remettre de l'impact d'un aléa naturel, un événement ou un processus naturel extrême *(Wisner et al., 2004 ; Bidou et Droy, 2009).*

La prise en considération de la vulnérabilité dans l'évaluation du risque de l'érosion hydrique est plus récente que celle de l'aléa. Plusieurs auteurs ont évalué la vulnérabilité en estimant le coût de reconstruction des infrastructures touchées par les catastrophes naturelles, ne prenant en compte que l'aspect financier *(Blong, 2003 ; Zêzere et al., 2008)*. D'autre l'ont considérée de manière plus globale, prenant en compte tous les enjeux, notamment les populations, les biens physiques ou diverses activités. La vulnérabilité est évaluée en quantifiant leurs niveaux d'endommagement, soient les préjudices corporels, les dommages structurels et les perturbations fonctionnelles engendrés par une catastrophe naturelle *(Léone, 1996 ; Aviotti, 2011)*. Cette évaluation est fondée sur un ensemble d'indicateurs répartis en quatre grands ensembles : population, urbanisation, socio-économie et autres éléments exposés (*Figure 57*). Pour chaque enjeu, la valeur de chaque indicateur permet l'évaluation de sa vulnérabilité par un indice de perte. L'indice de perte est défini de façon arbitraire par une valeur comprise entre 0 et 1 proportionnelle à l'intensité de sa vulnérabilité, où 1 représente la classe considérée comme étant la plus vulnérable.

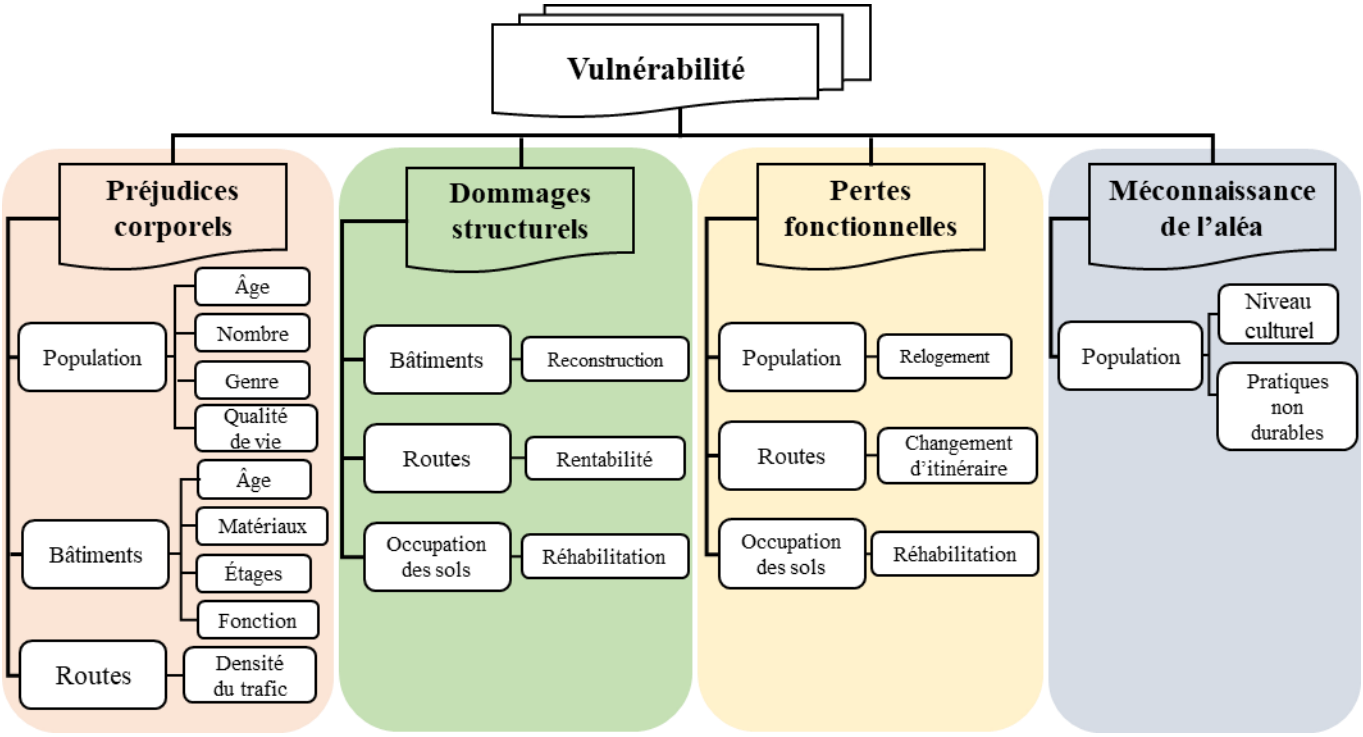


Figure 57: Organigramme méthodologique de l'évaluation de la vulnérabilité dans le bassin versant Allal Al Fassi (inspiré de Léone, 1996))

La carte de vulnérabilité est générée à partir des quatre cartes estimant préjudices corporels, dommages structurels, pertes fonctionnelles et méconnaissance de l'aléa par les populations. Ces cartes sont bâties à partir de valeurs d'indices de pertes attribuées aux différents éléments

à risque. Pour chaque pixel, la somme des indices de pertes des différents thèmes a été établie et les résultats ont été harmonisés sur une échelle de 0 à 1 indiquant la vulnérabilité. La gravité des dommages doit être appréciée sur des valeurs non seulement économiques (dommages structurels), mais tenant compte du problème de chiffrage monétaire d'une vie humaine (préjudices corporels). En effet un risque potentiel peut avoir un coût monétaire mais aussi affectif, environnemental, etc.

III.1. Evaluation et pondérations des critères

Le but d'attribuer des poids aux critères est d'exprimer le degré d'importance de chaque facteur par rapport aux autres dans le processus d'évaluation, un défi dans le processus de prise de décision.

L'évaluation de la vulnérabilité nécessite la prise en compte de plusieurs indicateurs. Les méthodes d'analyses des données sont pour la plupart qualitatives, alors que la majorité des indicateurs sont considérés comme descriptifs, non quantifiables, ce qui rend difficile l'analyse de leur l'impact intégré. Le processus d'hiérarchie analytique est considéré comme une approche très efficace pour quantifier les indicateurs qualitatifs, ainsi leurs impacts intégrés peuvent être obtenus en termes quantitatifs *(Shenavr et Hosseini, 2014).* Le poids déterminé selon cette méthode est comparable à celui des deux critères. C'est une méthode de comparaison appariée pour comparer l'importance relative des indicateurs dans un continuum divisé en neuf classes (Tableau 26 et 27) *(Saaty et Vargas, 1980).*

Tableau 26: Echelle de Saaty de comparaisons binaires (Saaty 1980)

Valeur	Echelle sémantique	Description
1	Importance égale des deux critères	Les deux critères concurrents de la même manière à l'objectif
3	Faible importance d'un critère par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un critère par rapport à un autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent fortement un critère par rapport à un autre
7	Importance attestée d'un critère par rapport à un autre	Un critère est largement dominant et sa dominance est démontrée dans la pratique
9	Importance absolue d'un critère par rapport à un autre.	La dominance d'un critère par rapport à un autre est démontré et absolue
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations

Tableau 27: Échelle de Saaty pour l'attribution des poids (Saaty 1980)

Poids								
Moins important				Également	Plus important			
Extrêmement	Très fortement	Fortement	Modérément		Modérément	Fortement	Très fortement	Extrêmement
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

Une fois la matrice de comparaison par paires est formée, il est possible de vérifier la cohérence de l'approche en calculant le ratio de cohérence ou de consistance (CR). Il constitue un test d'acceptation des poids des différents critères et vise à détecter les incohérences éventuelles dans la comparaison de l'importance de chaque paire de critères. Le ratio de cohérence est calculé par l'équation 29.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{29}$$

Avec CI, indice de consistance et Ri, indice randomisé

L'indice de consistance est calculé comme suit : $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$

Avec λ_{max} : la valeur propre maximale et n le nombre de critères.

L'indice randomisé dépend de la taille de la matrice (nombre de critères) (Tableau 28)

Tableau 28: Indice randomisé

Nombre de critères	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Dans ce cas d'étude le rapport de cohérence CR est égal à 0.0931. La valeur du CR est acceptable et conclue que les jugements de comparaison par paires sont cohérents. En effet, d'après Yurdakul *(2004)* la valeur du rapport de cohérence doit être inférieure à 0,1. Si la valeur est supérieure à 0,1, les coefficients de la matrice sont incohérents *(Wong et Li, 2008)*.

III.2. Combinaison SIG-AHP

Les systèmes d'information géographique SIG fournissent un ensemble d'outils puissants pour la manipulation et l'analyse des informations spatiales. Cependant la liste des outils fournis par les SIG, bien qu'impressionnante n'est pas complète. En effet, dans la plupart des logiciels SIG, la fonctionnalité d'analyse spatiale réside principalement dans la capacité à effectuer des opérations de superposition. Cette capacité devient d'une utilisation limitée lorsque les critères

et les objectifs multiples et contradictoires sont concernés. La combinaison des techniques de l'analyse multicritère avec les SIG fournit un ajout précieux à leurs fonctionnalités.

La cartographie de la vulnérabilité dans le bassin versant Allal Al Fassi est réalisée par le biais des logiciels SIG permettant de produire l'information, l'organiser et la représenter. Les données numériques sont traitées et générées sous forme de cartes en mode raster. La simplicité de l'unicité du format raster permet l'automatisation des traitements. Toutefois, la capacité des SIG à superposer différentes couches ou cartes ne permet pas de prendre en compte la différence de l'importance et l'influence des variables *(Janssen et Rietveld, 1990)* d'où le choix de l'analyse multicritère *(Carver, 1991)* afin d'évaluer la vulnérabilité au moyen de critères de décision *(Jankowski et al., 2001)*. L'approche combinée SIG-AHP a permis de transformer, stocker et manipuler les données numériques cartographiques en tout point (pixel) du bassin versant. L'évaluation de la vulnérabilité est réalisée en superposant les composantes de celle-ci dans le bassin versant Allal Al Fassi, réparties en trois ensembles, le découpage communal, la carte du réseau routier et la carte d'occupation des sols (Figure 58). Par exemple la répartition de la population dans le bassin versant est étudiée par commune, quant à la vulnérabilité des bâtiments et les rendements agricoles et forestiers, ils sont étudiés par type d'occupation des sols. Les critères d'entrée utilisés dans l'étude de la vulnérabilité sont, souvent de nature très précise. Par exemple, l'âge de la population (inférieur à 14 ans, entre 14 et 60 ans, plus que 60 ans), le nombre d'habitants par famille (inférieur ou égal à 4, supérieur à 5), le genre (femme, homme). La vulnérabilité des routes est définie par catégorie de routes se trouvant dans une commune, un critère d'inclusion. L'approche combinée SIG-AHP permet de passer d'un très grand nombre d'alternatives à une liste restreinte plus petite et plus gérable dans un ensemble unique. Malgré la nature déterministe de leur application, les SIG permettent de maintenir un certain degré de flexibilité, permettant ainsi de modifier les critères à tout stade de l'analyse (Annexe).

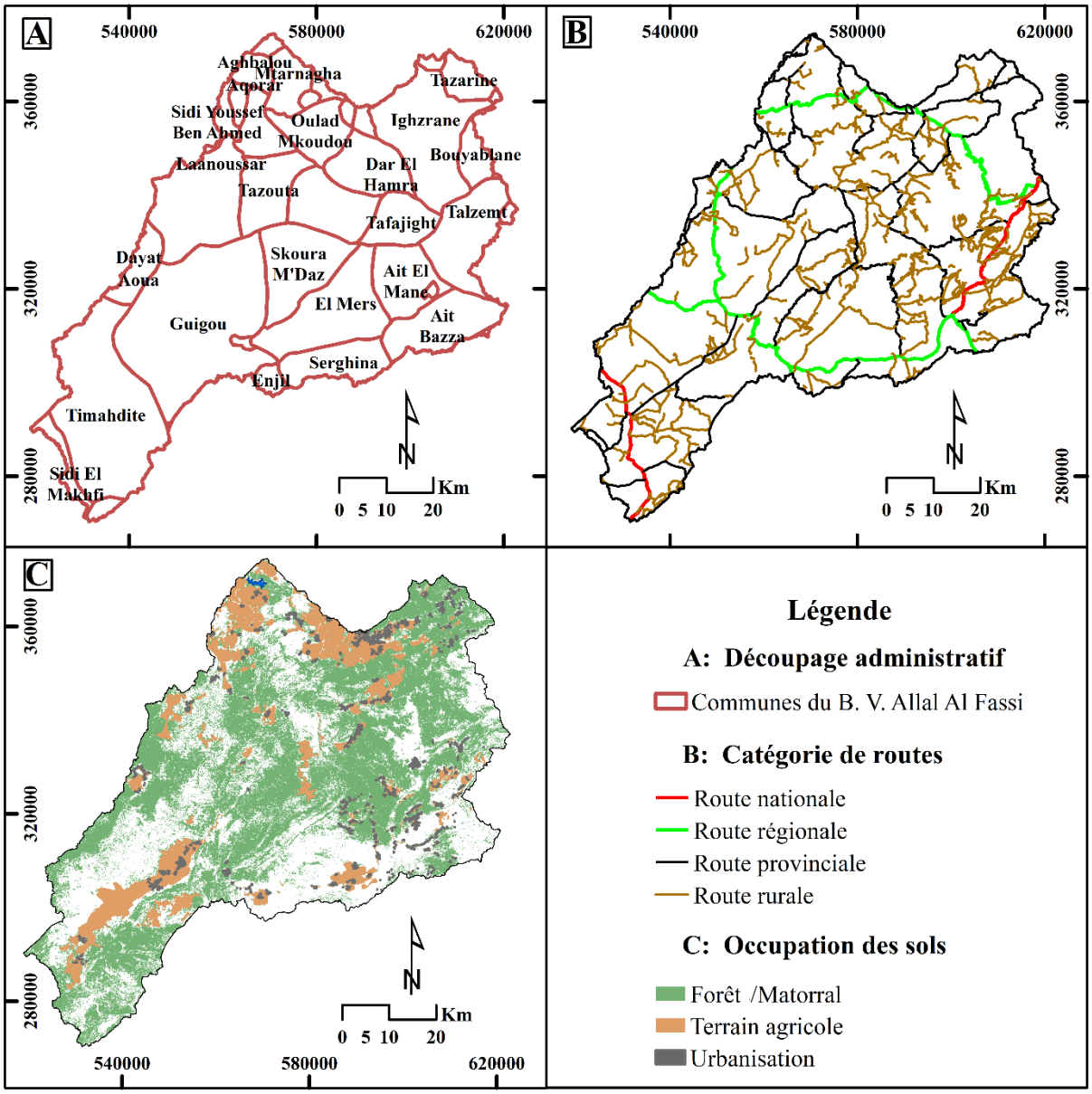


Figure 58: Composantes de la vulnérabilité du bassin versant Allal Al Fassi

III.3. Evaluation des préjudices corporels

L'évaluation des préjudices corporels est fondée sur la notion d'endommagement corporel qui s'applique aux personnes. Le niveau d'endommagement corporel d'une personne interagissant avec un phénomène (l'érosion hydrique dans le cas du bassin versant Allal Al Fassi) est fonction de l'intensité du phénomène mais aussi de la sensibilité et la vulnérabilité de cette personne envers ce phénomène. Trois indicateurs de vulnérabilité sont distingués, la population, les bâtiments et les routes (Figure 59).

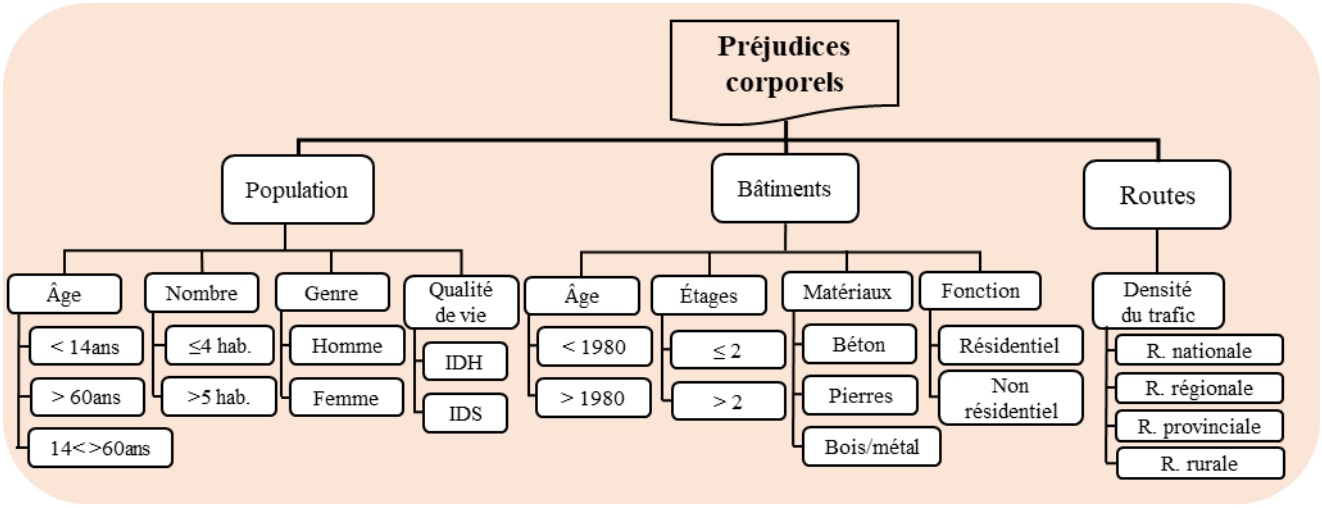


Figure 59: Composantes des préjudices corporels

III.3.1. Population

La quantification des préjudices corporels est propre à la population, leurs nombre, âge, genre et pauvreté. Ces indices définissent le comportement des personnes envers un risque par leur niveau de perception du danger, de leurs connaissances des moyens de protection du danger et de leur capacité de mobilité face au danger. En effet, plus le nombre de personnes s'élève, plus la vulnérabilité augmente. Parmi les personnes, certaines sont plus vulnérables que d'autres. La population est classée par tranche d'âge et par genre. Les enfants et les personnes âgées sont plus vulnérables aux risques. Les femmes ont une perception plus élevée du risque et sont mieux préparées à l'action. Cependant, les femmes peuvent avoir plus de difficultés pendant une période de rétablissement, souvent en raison de leurs salaires inférieurs et de leurs responsabilités familiales. La qualité de vie des populations est déterminée par le biais de deux indices, le premier est l'indice de développement humain (IDH), défini par le Haut-Commissariat au Plan comme l'indice qui mesure la qualité de vie moyenne de la population, tenant compte de trois dimensions du développement humain, à savoir, la possibilité d'avoir une vie longue et en santé, le niveau de scolarisation et le standard de vie calculé à partir du produit intérieur brut (PIB) réel par habitant (exprimé en parité de pouvoir d'achat (PPA)). Le deuxième est l'indice de développement social (IDS) qui constitue une synthèse de trois indicateurs à savoir, l'accès à l'eau potable, l'accès à l'électricité et l'accès au réseau routier.

Tableau 29: Indices de perte selon l'âge, le genre, le nombre de personnes par famille et la qualité de vie de la population du bassin versant Allal Al Fassi

Provinces	Communes	Population			
		Indices de pertes			
		Structure d'âge	Genre	Nombre	Qualité de vie
Sefrou	**Adrej**	0,98	0,96	0,83	0,51
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,88	0,85	0,67	0,51
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,93	0,88	1,00	0,60
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,86	0,89	0,83	0,70
Boulemane	**Ait Bazza**	0,92	0,87	0,83	0,71
Boulemane	**Ait El Mane**	1,00	0,95	0,50	0,67
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,85	0,88	0,67	0,69
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,97	0,87	0,50	0,65
Sefrou	**Azzaba**	0,89	0,89	0,83	0,55
Taza	**Barkine**	0,94	0,87	0,67	0,86
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,86	0,88	0,83	0,61
Boulemane	**Boulmane**	0,81	0,93	0,50	0,46
Taza	**Bouyablane**	0,88	0,85	0,83	1,00
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,97	0,93	0,83	0,47
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,83	0,87	0,67	0,82
Sefrou	**El Menzel**	0,83	0,93	0,83	0,46
Boulemane	**El Mers**	0,94	0,88	0,67	0,71
Boulemane	**Enjil**	0,88	0,89	0,83	0,74
Boulemane	**Guigou**	0,83	1,00	0,67	0,66
Sefrou	**Ighzrane**	0,95	0,93	0,67	0,58
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,83	0,92	0,83	0,51
Khenifra	**Itzer**	0,86	0,94	0,67	0,50
Sefrou	**Laanoussar**	0,87	0,86	0,83	0,64
Taza	**Maghraoua**	0,92	0,90	0,83	0,83
Sefrou	**Mtarnagha**	0,94	0,92	0,83	0,50
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,96	0,87	0,83	0,76
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,96	0,92	0,67	0,52
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,85	0,94	0,67	0,64
Boulemane	**Serghina**	0,90	0,91	0,67	0,60
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,83	0,87	0,67	0,65
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,86	0,87	0,83	0,45
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,92	0,91	0,67	0,60
Sefrou	**Tafajight**	0,98	0,90	1,00	0,53
Boulemane	**Talzemt**	0,90	0,87	0,50	0,72
Taza	**Tazarine**	0,77	0,88	0,83	0,71
Sefrou	**Tazouta**	0,92	0,85	1,00	0,60
Ifrane	**Timahdite**	0,83	0,87	0,83	0,69
Taza	**Zrarda**	0,87	0,95	0,67	0,62

III.3.2. Bâtiments

La quantification des préjudices corporels est aussi fonction des bâtiments, notamment l'ancienneté, les matériaux de construction, le nombre d'étages et la fonction du bâtiment. En effet, les personnes occupant un bâtiment soumis à une forme d'érosion, subiront un faible préjudice tant que la structure du bâtiment qui les abrite est stable. Le principal matériau de construction des sols et des murs détermine la fragilité physique et indique leur résistance aux dommages. Les matériaux de construction sont définis selon le type de logement (Tableau 30). Les bâtiments dont les éléments principaux sont le bois ou le métal sont les plus vulnérables aux glissements de terrain par exemple, d'où l'attribution de la valeur 1 (Tableau 31). La hauteur des bâtiments est importante pour la vulnérabilité aux risques. Les étages supérieurs des bâtiments peuvent servir à protéger les personnes et leurs biens. L'année de construction du bâtiment est également un indicateur de la vulnérabilité. En effet, pour un même type de bâtiment, plus le bâtiment est vieux, plus il a subi l'action de phénomènes extérieurs et plus il est vulnérable.

Tableau 30: Matériaux de construction selon le type de logement

Types de logement	Matériaux de construction
Habitat sommaire/autres	Bois/métal/Autre
Logement de type rural	Pierres
Villa, Appartement, Maison marocaine	Béton

Tableau 31: Indices de perte selon l'âge, le nombre d'étages, la fonction et les matériaux de constructions des bâtiments dans le bassin versant Allal Al Fassi

Province	Commune	Indice de perte en fonction des bâtiments			
		Age	Etages	Fonctions	Matériaux de construction
Sefrou	**Adrej**	1,00	1,00	0,56	0,58
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,43	1,00	0,58	0,56
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,60	1,00	0,64	0,24
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,39	1,00	0,60	0,48
Boulemane	**Ait Bazza**	0,68	1,00	0,81	0,59
Boulemane	**Ait El Mane**	0,87	1,00	0,66	0,99
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,36	1,00	0,53	0,63
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,73	1,00	0,69	0,66
Sefrou	**Azzaba**	0,52	1,00	0,70	0,13
Taza	**Barkine**	0,62	1,00	0,86	0,97
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,48	1,00	0,70	0,57
Boulemane	**Boulmane**	0,62	1,00	0,40	0,46

Taza	**Bouyablane**	0,76	1,00	0,87	1,00
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,52	1,00	0,65	0,44
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,27	1,00	0,64	0,16
Sefrou	**El Menzel**	0,45	1,00	0,43	0,23
Boulemane	**El Mers**	0,54	1,00	0,66	0,58
Boulemane	**Enjil**	0,58	1,00	0,59	0,54
Boulemane	**Guigou**	0,35	1,00	0,47	0,43
Sefrou	**Ighzrane**	0,56	1,00	0,79	0,32
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,42	1,00	0,42	0,28
Khenifra	**Itzer**	0,50	1,00	0,46	0,73
Sefrou	**Laanoussar**	0,37	1,00	0,62	0,57
Taza	**Maghraoua**	0,77	1,00	0,76	0,85
Sefrou	**Mtarnagha**	0,51	1,00	0,85	0,67
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,94	1,00	0,71	0,89
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,59	1,00	0,68	0,41
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,31	1,00	0,49	0,13
Boulemane	**Serghina**	0,55	1,00	0,58	0,50
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,40	1,00	0,41	0,63
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,36	1,00	0,57	0,10
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,49	1,00	0,54	0,33
Sefrou	**Tafajight**	0,96	1,00	1,00	0,91
Boulemane	**Talzemt**	0,76	1,00	1,00	0,43
Taza	**Tazarine**	0,79	1,00	0,96	0,80
Sefrou	**Tazouta**	0,57	1,00	0,80	0,69
Ifrane	**Timahdite**	0,42	1,00	0,45	0,56
Taza	**Zrarda**	0,40	1,00	0,45	0,20

III.3.3. Routes

Les routes représentent un indicateur de vulnérabilité corporelle. En effet, toute route menacée ou touchée par une des formes d'érosion, augmente le risque d'accident. Cependant, la densité d'automobilistes sur une route est un indicateur de vulnérabilité corporelle. Le nombre d'automobiliste est déterminé pour chaque catégorie de route présente dans le bassin versant Allal Al Fassi, à savoir les routes nationales, régionales, provinciales et rurales (Figure 60).

L'indice de perte est défini en fonction du nombre d'automobilistes. Ce dernier est recueilli à partir des rapports du comptage routier par différentes directions des routes par le Ministère de l'Equipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau (Tableau 32). Pour les routes ne disposant pas d'un point de comptage, le nombre d'automobilistes a été estimé en se basant sur la moyenne nationale de circulation d'après le recueil du trafic routier 2018 (Tableau 33) *(METLE, 2018)*.

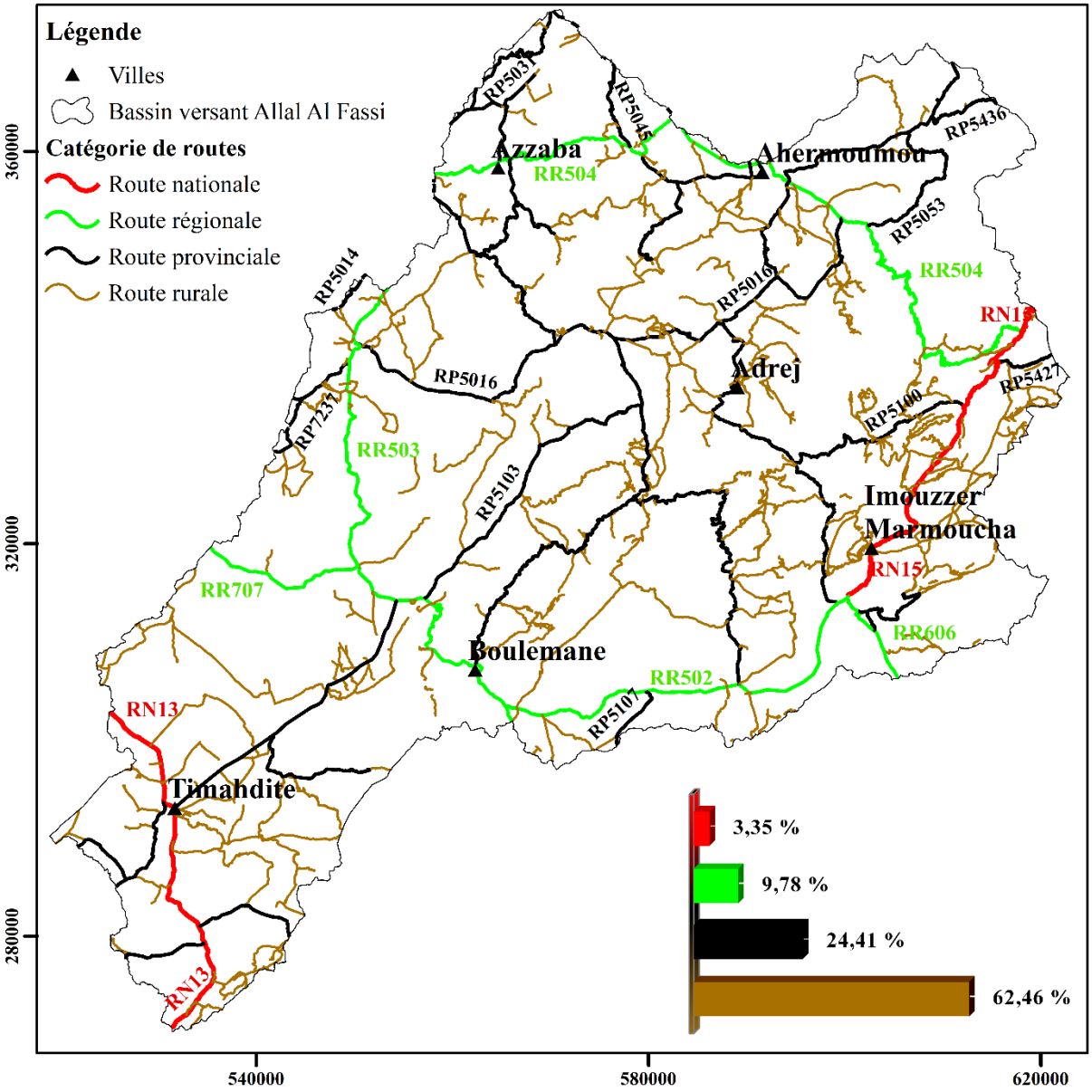


Figure 60: Réseau routier du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 32: Indices de perte en fonction de la densité d'automobilistes par catégorie de route

Commune	Indice de perte par nombre de véhicules Km/J. par catégorie de route			Indice de perte par nombre de véhicules
	RN	RR	RP	
Adrej	0,00	0,00	0,66	0,33
Aghbalou Aqorar	0,00	0,00	0,34	0,17
Ahl Sidi Lahcen	0,00	0,10	0,38	0,24
Ain Timguenai	0,00	0,11	0,01	0,06
Ait Bazza	0,00	0,35	0,24	0,30
Ait El Mane	0,27	0,05	0,44	0,38
Ait Sebaa Lajrouf	0,00	0,00	0,00	0,00
Almis Marmoucha	0,00	0,00	0,00	0,00

Azzaba	0,00	0,06	0,08	0,07
Barkine	0,03	0,00	0,00	0,02
Bir Tam Tam	0,00	0,00	0,15	0,07
Boulemane	0,00	0,00	0,04	0,02
Dar El Hamra	0,00	0,00	0,47	0,24
Dayat Aoua	0,00	0,12	0,11	0,11
El Menzel	0,00	0,12	0,03	0,07
El Mers	0,00	0,00	0,49	0,24
Enjil	0,00	0,08	0,00	0,04
Guigou	0,00	1,00	1,00	1,00
Ighzrane	0,00	0,80	0,88	0,84
Imouzzer Marmoucha	0,08	0,00	0,00	0,04
Itzer	0,20	0,00	0,00	0,10
Laanoussar	0,00	0,44	0,59	0,52
Mtarnagha	0,00	0,17	0,16	0,17
Oulad Mkoudou	0,00	0,00	0,33	0,16
Ribate El Kheir	0,00	0,06	0,10	0,08
Serghina	0,00	0,46	0,18	0,32
Sidi El Makhfi	0,00	0,00	0,19	0,10
Sidi Youssef Ben Ahmed	0,00	0,08	0,15	0,12
Skoura M'Daz	0,00	0,00	0,80	0,40
Tafajight	0,00	0,00	0,19	0,10
Talzemt	0,96	0,25	0,30	0,75
Tazarine	0,00	0,00	0,30	0,15
Tazouta	0,00	0,00	0,46	0,23
Timahdite	1,00	0,00	0,84	0,92
Zrarda	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 33: Circulation et réseau routier national d'après le recueil du trafic routier 2018 (METLE, 2018).

Circulation nationale en millions de veh. Km/J.			**Réseau routier national en Km**		
RN	**RR**	**RP**	**RN**	**RR**	**RP**
43,51	20,67	19,35	10928	9867	24249

III.4. Evaluation des dommages structurels

L'évaluation des dommages structurels s'appuie sur l'évaluation d'endommagement matériel qui s'applique aux biens physiques. Le niveau d'endommagement d'un bien matériel interagissant avec un phénomène est fonction de l'intensité du phénomène, de la sensibilité et la résistance du bien. La résistance physique mesure la manière dont les constructions (bâtiments et routes) et l'occupation des sols (cultures, forêt…) supportent et résistent au phénomène. Les habitations et les routes sont des zones de dépôt d'érosion qui peuvent être recouvertes de boue. Cependant, la gravité des dommages va être appréciée sur des valeurs

économiques par une évaluation monétaire des biens environnementaux. De ce fait, les coûts comptabilisés correspondent aux mesures de réhabilitation et de reconstruction.

III.4.1. Bâtiments

L'indice de perte est attribué selon le coût de la reconstruction du bâtiment au mètre carré, qui est déterminé en se basant sur différents appels d'offre du marché public marocain *(MENFPESRS, 2021)*. La valeur de reconstruction d'un bâtiment en pierres ou un bâtiment en bois et métal n'est pas distingué (Figure 61). Tout bâtiment endommagé devrait être reconstruit en béton de manière à diminuer sa vulnérabilité. En effet, la valeur de vulnérabilité la plus faible est attribuée aux bâtiments construit en béton.

Les indices de pertes ont été calculés en proportion de bâtiments vulnérables par communes (Figure 62) (Tableau 34).



Figure 61: Bâtiments en pierre, en bois/métal et autres dans le bassin versant Allal Al Fassi



Figure 62: Bâtiments vulnérables dans la région de Boulemane

Tableau 34: Indices de perte en fonction des coûts de reconstruction des bâtiments

Commune	Indice de perte selon la reconstruction des bâtiments		
	Superficie (m^2)	Coût de réhabilitation (million de DH)	Indice de perte
Ait Bazza	496068,60	2480,34	0,17
Ait El Mane	497222,08	2486,11	0,17
Almis Marmoucha	-	-	-
El Mers	233282,01	1166,41	0,08
Enjil	193068,29	965,34	0,07
Guigou	2902531,55	14512,66	1,00
Serghina	477566,71	2387,83	0,16
Skoura M'Daz	-	-	-
Talzemt	236542,81	1182,71	0,08
Boulemane	75507,62	377,54	0,03
Imouzzer Marmoucha	75951,89	379,76	0,03
Oulad Ali Youssef	-	-	-
Adrej	225734,54	1128,67	0,08
Ain Timguenai	426668,99	2133,34	0,15
Bir Tam Tam	0,00	0,00	0,00
Dar El Hamra	171078,21	855,39	0,06
Ighzrane	1159495,07	5797,48	0,40
Mtarnagha	783971,58	3919,86	0,27
Oulad Mkoudou	724055,99	3620,28	0,25
Tafajight	93870,53	469,35	0,03

Ait Sebaa Lajrouf	-	-	-
El Menzel	398620,19	1993,10	0,14
Ribate El Kheir	947652,94	4738,26	0,33
Aghbalou Aqorar	132365,64	661,83	0,05
Ahl Sidi Lahcen	228006,31	1140,03	0,08
Azzaba	37464,83	187,32	0,01
Laanoussar	718711,71	3593,56	0,25
Sidi Youssef Ben Ahmed	102697,92	513,49	0,04
Tazouta	332919,47	1664,60	0,11
Dayat Aoua	77812,36	389,06	0,03
Sidi El Makhfi	-	-	-
Timahdite	176419,72	882,10	0,06
Itzer	-	-	-
Barkine	-	-	-
Bouyablane	-	-	-
Maghraoua	-	-	-
Tazarine	68840,97	344,20	0,02
Zrarda	12169,99	60,85	0,00

III.4.2. Routes

L'indice de perte est attribué selon le coût de réhabilitation des routes au Kilomètre (Km). Les coûts de réhabilitation des routes sont déterminés en se basant sur un ensemble d'appels d'offres du marché public marocain *(METLE, 2021)* (Tableau 35). *Les* indices de perte sont calculés en fonction du linéaire de routes par commune. Les catégories de routes ne sont pas différenciées et les coûts de réhabilitation des routes nationales, régionales et provinciales sont presque similaires. Dans le cas des voies doubles, le coût est multiplié par un facteur variant de 1,5 à 1,8 en plus des coûts d'éclairage et du TPC (terre-plein centrale) (Figure 63).

Tableau 35: Indices de perte en fonction du coût de réhabilitation des routes

Province	**Commune**	**Indice de perte selon le coût de réhabilitation par catégorie de route (DH)**			
		RN	**RR**	**RP**	**Piste**
Sefrou	**Adrej**	0,00	0,00	0,66	0,42
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,00	0,00	0,34	0,05
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,00	0,10	0,38	0,07
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,00	0,11	0,01	0,00
Boulemane	**Ait Bazza**	0,00	0,35	0,24	0,23
Boulemane	**Ait El Mane**	0,27	0,05	0,44	0,39
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,00	0,00	0,00	0,00
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,00	0,00	0,00	0,00
Sefrou	**Azzaba**	0,00	0,06	0,08	0,00

Taza	**Barkine**	0,03	0,00	0,00	0,04
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,00	0,00	0,15	0,03
Boulemane	**Boulemane**	0,00	0,00	0,04	0,02
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,00	0,00	0,47	0,28
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,00	0,12	0,11	0,11
Sefrou	**El Menzel**	0,00	0,12	0,03	0,03
Boulemane	**El Mers**	0,00	0,00	0,49	0,50
Boulemane	**Enjil**	0,00	0,08	0,00	0,06
Boulemane	**Guigou**	0,00	1,00	1,00	0,77
Sefrou	**Ighzrane**	0,00	0,80	0,88	0,40
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,08	0,00	0,00	0,02
Khénifra	**Itzer**	0,20	0,00	0,00	0,07
Sefrou	**Laanoussar**	0,00	0,44	0,59	0,42
Sefrou	**Mtarnagha**	0,00	0,17	0,16	0,04
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,00	0,00	0,33	0,26
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,00	0,06	0,10	0,06
Boulemane	**Serghina**	0,00	0,46	0,18	0,13
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,00	0,00	0,19	0,04
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,00	0,08	0,15	0,05
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,00	0,00	0,80	0,49
Sefrou	**Tafajight**	0,00	0,00	0,19	0,16
Boulemane	**Talzemt**	0,96	0,25	0,30	0,88
Taza	**Tazarine**	0,00	0,00	0,30	0,01
Sefrou	**Tazouta**	0,00	0,00	0,46	0,17
Ifrane	**Timahdite**	1,00	0,00	0,84	1,00
Taza	**Zrarda**	0,00	0,00	0,00	0,02



Figure 63: Dégradation de l'infrastructure routière dans le bassin versant Allal Al Fassi

III.4.3. Occupation des sols

Les dommages structurels concernent aussi les dommages économiques dans les zones agricoles, en raison de la dégradation des sols attribuable à l'érosion hydrique. Cette dernière entraînant le sol de surface, réduit son taux de matière organique et contribue au bris de sa structure. Tous ces effets influent négativement sur la fertilité du sol, la circulation de l'eau à la surface du sol, la production agricole et à long terme nuisent à la santé agroenvironnementale. Ces dégradations se reflètent sur le rendement et la rentabilité des cultures. Les formes de l'érosion se manifestent, dans les champs de culture, sous forme de rigoles ou de ravines.

Sur le plan agricole, le bassin versant Allal Al Fassi présente de réels avantages notamment la fertilité des sols et le climat favorable, choses qui lui confèrent des potentialités de développement non négligeables. La forêt dans le bassin versant Allal Al Fassi est répartie entre Boulemane (677,858 hectares) et Sefrou (137,780 hectares). Elle comprend essentiellement des chênes verts qui représentent près de 20 % de sa superficie globale, des thuyas (3,4 %), des genévriers (2,7 %) et des cèdres (2,3 %). De par son étendue et sa diversité, la forêt dans le bassin versant Allal Al Fassi offre un potentiel socio-économique important à travers la vente de bois de cèdre. Les essences naturelles sont représentées, à l'exception des feuillus et des résineux, par plusieurs essences secondaires, herbacées et champignons dont le thym et l'origan. L'exploitation de ces plantes s'avère intéressante sur le plan économique dans le cadre des activités forestières. La culture de l'Alfa est aussi une ressource végétale exploitée.

L'économie forestière est caractérisée par plusieurs activités, notamment la production de bois de construction et de chauffage, la production d'Alfa destinée à l'industrie de transformation, papier et cellulose, et à la production de fourrages, la production de plantes médicinales diverses et la production du charbon de bois et du bois d'œuvre produit surtout à Boulemane. Selon le rapport de la direction régionale des eaux et forêts de la région Fès-Boulemane, cette richesse procure quelques 8 millions de dirhams au profit des communes rurales et génèrent près de 173.000 journées de travail par an. Cependant, cette forêt connaît une grande dégradation en raison notamment de la surexploitation des ressources forestières. Face aux dégradations que subit la forêt dans le bassin versant Allal Al Fassi, la DREF a mis en place des programmes annuels de traitement contre le dépérissement du chêne vert sur une superficie de 3,400 ha, soit 2,85 % des 119,000 ha occupés par cette espèce. Dans le cadre de la prévention des incendies fréquents, la DREF a adopté des mesures sylvicoles notamment les élagages, le dépressage et l'élimination du bois mort gisant. Concernant le reboisement et la protection des sols contre l'érosion, la DREF a créé quatre pépinières qui produisent environ 2 millions de plants forestiers divers par an. Les opérations de reboisement ont concerné 1.050 hectares au cours de la campagne (2001-2002). Depuis 1990-1991, 10.600 hectares ont été reboisés.

Les indices de perte sont calculés selon le coût de réhabilitation des terrains agricoles et forestiers par province (Tableaux 36, 37, 38 et 39). Le ministère de l'agriculture dans le cadre du fond du développement agricole fixe le montant d'équipement des terres agricoles en 65.000 dh/ha pour les surfaces élémentaires de moins de 5 hectares et en 45.000 dh/ha pour les surfaces

élémentaires de plus de 5 hectares. Le reboisement ou l'équipement en arboriculture diffère entre 12.000 et 28.000 dh/ha *(MAPM, 2019)*.

Tableau 36: Indices de perte en fonction de la réhabilitation des terrains agricoles et forestiers

Province	Commune	Indice de perte selon le coût de réhabilitation		
		Agriculture	Reboisement	Forêt/matorral/alfa
Sefrou	**Adrej**	0,311	0,008	0,182
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,311	0,008	0,182
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,311	0,008	0,182
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Ait Bazza**	0,107	0,001	0,962
Boulemane	**Ait El Mane**	0,107	0,001	0,962
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,107	0,001	0,962
Sefrou	**Azzaba**	0,311	0,008	0,182
Taza	**Barkine**	0,239	0,068	0,068
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Boulemane**	0,107	0,001	0,962
Taza	**Bouyablane**	0,239	0,068	0,068
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,311	0,008	0,182
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,007	0,018	0,163
Sefrou	**El Menzel**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**El Mers**	0,107	0,001	0,962
Boulemane	**Enjil**	0,107	0,001	0,962
Boulemane	**Guigou**	0,107	0,001	0,962
Sefrou	**Ighzrane**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,107	0,001	0,962
Khénifra	**Itzer**	1,000	1,000	1,000
Sefrou	**Laanoussar**	0,311	0,008	0,182
Taza	**Maghraoua**	0,239	0,068	0,068
Sefrou	**Mtarnagha**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,107	0,001	0,962
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,311	0,008	0,182
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Serghina**	0,107	0,001	0,962
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,007	0,018	0,163
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,107	0,001	0,962
Sefrou	**Tafajight**	0,311	0,008	0,182
Boulemane	**Talzemt**	0,107	0,001	0,962
Taza	**Tazarine**	0,239	0,068	0,068
Sefrou	**Tazouta**	0,311	0,008	0,182
Ifrane	**Timahdite**	0,007	0,018	0,163
Taza	**Zrarda**	0,239	0,068	0,068

Tableau 37: Indices de perte en fonction de la production agricole

Provinces	SAU (ha)	Indice de perte de production par type de culture				
		Céréales	Légumineuses	Cultures fourragères	Cultures Maraîchères	Plantations fruitières
Boulemane	0,250	0,110	0,000	0,030	0,190	0,200
Sefrou	0,290	1,000	0,000	0,180	0,130	0,210
Ifrane	0,260	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000
Taza	0,600	0,620	0,000	0,000	0,040	0,500
Khénifra	1,000	0,880	1,000	1,000	1,000	1,010

Tableau 38: Indices de perte en fonction de la production animale

Indice de perte de l'élevage			Indice de perte total Elevage
Caprins	Ovins	Bovins	
0,002	0,002	0,001	0,001
1,000	1,000	1,000	1,000
0,001	0,002	0,001	0,001
0,001	0,001	0,003	0,002
0,001	0,003	0,002	0,002

Tableau 39: Indices de perte en fonction de la production forestière

Province	Superficie des forêts reboisées et naturelles (ha) 2015/2016							
	Reboisement	Feuillues naturelles	Résineuses naturelles	Matorral	Alfa	Autres	Total naturel	Total reboisement
Boulemane	0,001	0,071	0,183	0,219	1,000	1,000	0,962	0,001
Sefrou	0,008	0,187	0,178	0,008	0,000	0,989	0,182	0,008
Ifrane	0,018	0,145	0,135	0,528	0,000	0,000	0,163	0,018
Taza	0,068	0,145	0,308	1,000	0,000	0,000	0,275	0,068
Khénifra	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000



Figure 64: Formes d'érosion des terrains agricoles

III.5. Evaluation des pertes fonctionnelles

L'évaluation des pertes fonctionnelles s'appuie sur la fonction d'endommagement fonctionnel, qui s'applique aux activités et fonctions diverses définissant les dysfonctionnements ou les perturbations fonctionnelles. Les pertes fonctionnelles dans le bassin versant Allal Al Fassi concernent les dysfonctionnements des bâtiments, des routes et des terrains agricoles et forestiers.

Le dysfonctionnement des bâtiments concerne le nombre de famille à reloger en cas de destruction totale ou partielle de leurs habitats. L'indice de perte est calculé en fonction du nombre de ménages et le type d'habitat. Un habitat en bois et métal ou autre est plus vulnérable qu'un habitat construit en béton.

Le dysfonctionnement des routes concerne leur indisponibilité. En effet, une coulée boueuse ou un glissement de terrain peut rendre une route impraticable et les automobilistes qui l'empruntent doivent changer d'itinéraire. La valeur de l'indice de perte associée au changement d'itinéraire quantifie les difficultés engendrées en Km. Le nombre de kilomètres rajoutés par un changement d'itinéraire, en cas d'interruption du trafic, est estimé par commune et par catégorie de route (Tableau 40).

Pour la réhabilitation des terrains agricoles et forestiers, les données sont les mêmes utilisées pour l'évaluation des dommages structurels.

Tableau 40: Indices des pertes fonctionnelles

Provinces	Communes	Indice de perte		
		Population	Occupation des sols	Routes
		Nbr de famille à reloger	Réhabilitation	Changement d'itinéraire (Km)
Sefrou	**Adrej**	0,144	0,167	0,823
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,696	0,167	0,423
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,155	0,167	0,357
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,325	0,167	0,105
Boulemane	**Ait Bazza**	0,225	0,357	0,105
Boulemane	**Ait El Mane**	0,170	0,357	0,367
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	1,000	0,167	0,001
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,171	0,357	0,000
Sefrou	**Azzaba**	0,095	0,167	0,026
Taza	**Barkine**	0,608	0,125	0,022
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,684	0,167	0,182
Boulemane	**Boulmane**	0,102	0,357	0,049
Taza	**Bouyablane**	0,154	0,125	0,000
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,278	0,167	0,588

Ifrane	**Dayet Aoua**	0,087	0,063	0,003
Sefrou	**El Menzel**	0,078	0,167	0,092
Boulemane	**El Mers**	0,384	0,357	0,612
Boulemane	**Enjil**	0,581	0,357	0,092
Boulemane	**Guigou**	0,882	0,357	0,086
Sefrou	**Ighzrane**	0,394	0,167	0,170
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,027	0,357	0,059
Khenifra	**Itzer**	0,541	1,000	0,136
Sefrou	**Laanoussar**	0,554	0,167	0,233
Taza	**Maghraoua**	0,534	0,125	0,000
Sefrou	**Mtarnagha**	0,391	0,167	0,005
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,363	0,357	0,000
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,389	0,167	0,408
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,116	0,167	0,057
Boulemane	**Serghina**	0,259	0,357	0,304
Ifrane	**Sidi EL Makhfi**	0,856	0,063	0,241
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,043	0,167	0,102
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,406	0,357	1,000
Sefrou	**Tafajight**	0,129	0,167	0,241
Boulemane	**Talzemt**	0,182	0,357	0,362
Taza	**Tazarine**	0,183	0,125	0,377
Sefrou	**Tazouta**	0,482	0,167	0,579
Ifrane	**Timahdite**	0,447	0,063	0,355
Taza	**Zrarda**	0,211	0,125	0,000

III.6. Méconnaissances de l'aléa

La méconnaissance de l'aléa est fonction des facteurs intrinsèques aux personnes, psycho-sociologiques et comportementaux, notamment le comportement des personnes en cas de danger de par leur niveau de perception du danger, de leurs connaissances des moyens de protection du danger et de leur capacité de mobilité face au danger. La méconnaissance de l'aléa est définie à travers trois indicateurs, le niveau culturel, le taux d'analphabétisation et les pratiques non durables, notamment, la surexploitation des ressources naturelles et des terrains agricoles (Figure 65).

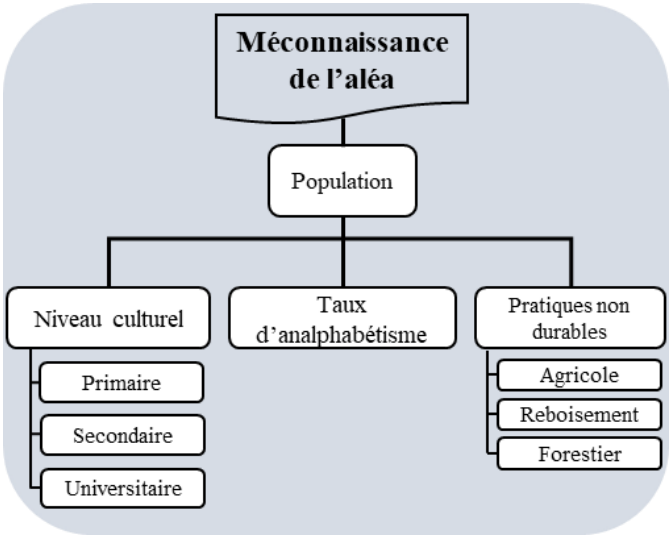


Figure 65: Composantes de la méconnaissance de l'aléa

Le niveau de scolarité est lié au statut socio-économique, un faible niveau de scolarité limite la capacité de comprendre les informations d'alerte et d'accéder aux informations sur la récupération. Les personnes ayant un niveau d'éducation plus élevé sont plus capables d'exécuter efficacement des mesures d'urgence. Les personnes moins scolarisées semblent avoir moins de capacité de récupération que les personnes moyennement touchées par un risque. L'indice de perte est défini en fonction du niveau culturel et le taux d'analphabétisme (Tableau 41).

Les communes rurales représentent 90% du bassin versant Allal Al Fassi et sont marquées par un sous équipement en matière d'infrastructure économique et sociale. La population rurale se caractérise par un taux d'accroissement en régression entre l'année 1994 et 2004, puis une augmentation entre les années 2004 et 2014, une structure jeune (environ 90% de la population est à moins de 60 ans), un degré d'analphabétisation très important (environ 50%) et un taux de chômage élevé (environ 20%). L'agriculture et l'élevage restent leurs activités principales et représentent une source d'emploi pour plus de la moitié de la population active. Les prélèvements énergétiques et fourragères par les habitants dépassent les possibilités de production des forêts et des parcours, provoquant ainsi de grands déficits. L'indice de perte est défini en fonction de la production agricole et forestière (Tableau 42).

Tableau 41: Indices de perte selon le niveau culturel et le taux d'analphabétisme

Vulnérabilité fonctionnelle selon la méconnaissance						
Provinces	Communes	Indices de pertes				Indice de perte niveau culturel
		Analphabétisme	Niveau de scolarité			
			Primaire	Secondaire	Universitaire	
Sefrou	**Adrej**	0,69	0,74	0,18	0,16	**0,50**
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,69	0,86	0,32	0,38	**0,64**
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,66	0,89	0,28	0,36	**0,62**
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,54	0,92	0,14	0,11	**0,48**
Boulemane	**Ait Bazza**	0,86	0,72	0,74	0,42	**0,77**
Boulemane	**Ait El Mane**	0,83	0,73	0,41	0,28	**0,64**
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,66	0,83	0,22	0,36	**0,59**
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,75	0,77	0,40	0,24	**0,61**
Sefrou	**Azzaba**	0,59	0,93	0,19	0,31	**0,57**
Taza	**Barkine**	0,86	0,72	0,78	0,42	**0,79**
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,63	0,86	0,19	0,16	**0,52**
Boulemane	**Boulmane**	0,42	0,91	0,10	0,06	**0,42**
Taza	**Bouyablane**	0,94	0,59	1,00	1,00	**1,00**
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,82	0,75	0,42	0,63	**0,74**
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,75	0,80	0,42	0,56	**0,72**
Sefrou	**El Menzel**	0,37	1,00	0,11	0,06	**0,44**
Boulemane	**El Mers**	0,74	0,80	0,31	0,31	**0,61**
Boulemane	**Enjil**	0,75	0,72	0,22	0,22	**0,54**
Boulemane	**Guigou**	0,54	0,92	0,15	0,10	**0,49**
Sefrou	**Ighzrane**	0,85	0,66	0,33	0,38	**0,63**
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,51	0,87	0,12	0,07	**0,45**
Khenifra	**Itzer**	0,43	1,00	0,12	0,08	**0,46**
Sefrou	**Laanoussar**	0,86	0,72	0,74	0,50	**0,80**
Taza	**Maghraoua**	0,91	0,59	0,33	0,31	**0,61**
Sefrou	**Mtarnagha**	0,63	0,93	0,27	0,22	**0,58**
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,84	0,76	0,58	0,33	**0,71**
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,58	0,90	0,19	0,14	**0,51**
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,49	0,93	0,13	0,09	**0,46**
Boulemane	**Serghina**	0,67	0,77	0,18	0,19	**0,51**
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,75	0,74	0,22	0,24	**0,55**
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,66	0,88	0,27	0,29	**0,60**
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,65	0,83	0,19	0,14	**0,51**
Sefrou	**Tafajight**	1,00	0,50	0,32	0,56	**0,67**
Boulemane	**Talzemt**	0,94	0,61	0,56	0,56	**0,75**
Taza	**Tazarine**	0,81	0,74	0,54	0,50	**0,73**
Sefrou	**Tazouta**	0,80	0,78	0,56	0,71	**0,81**
Ifrane	**Timahdite**	0,69	0,83	0,25	0,19	**0,55**
Taza	**Zrarda**	0,46	0,92	0,11	0,11	**0,45**

Tableau 42: Indices de perte selon la production agricole et forestière

Province	Commune	Indice de perte de production agronomique et forestière			
		Agriculture	Elevage	Reboisement	Forêt/matorral/alfa
Sefrou	**Adrej**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Ait Bazza**	0,107	0,001	0,001	0,962
Boulemane	**Ait El Mane**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Azzaba**	0,311	1,000	0,008	0,182
Taza	**Barkine**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Boulemane**	0,107	0,001	0,001	0,962
Taza	**Bouyablane**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,311	1,000	0,008	0,182
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,007	0,001	0,018	0,163
Sefrou	**El Menzel**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**El Mers**	0,107	0,001	0,001	0,962
Boulemane	**Enjil**	0,107	0,001	0,001	0,962
Boulemane	**Guigou**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Ighzrane**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,107	0,001	0,001	0,962
Khénifra	**Itzer**	1,000	0,002	1,000	1,000
Sefrou	**Laanoussar**	0,311	1,000	0,008	0,182
Taza	**Maghraoua**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Mtarnagha**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Serghina**	0,107	0,001	0,001	0,962
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,007	0,001	0,018	0,163
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Tafajight**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Talzemt**	0,107	0,001	0,001	0,962
Taza	**Tazarine**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Tazouta**	0,311	1,000	0,008	0,182
Ifrane	**Timahdite**	0,007	0,001	0,018	0,163
Taza	**Zrarda**	0,239	0,002	0,068	0,068

III.7. Cartes des composantes de la vulnérabilité

Les cartes des quatre composantes de la vulnérabilité à savoir les préjudices corporels, les dommages structurels, les pertes fonctionnelles et la méconnaissance de l'aléa sont élaborées à partir d'indices de pertes attribués aux différents éléments à risque du bassin versant Allal Al Fassi. Pour chaque pixel, les indices de pertes des différentes composantes sont quantifiés à partir d'indicateurs de vulnérabilité par la méthode de hiérarchie multicritère AHP. Les cartes résultantes présentent une similitude due principalement aux éléments de base considérés pour les élaborer à savoir, le découpage communal, le réseau routier et l'occupation des sols. Les communes les moins vulnérables sont celles qui comprennent le minimum d'éléments à risque (Figure 66).

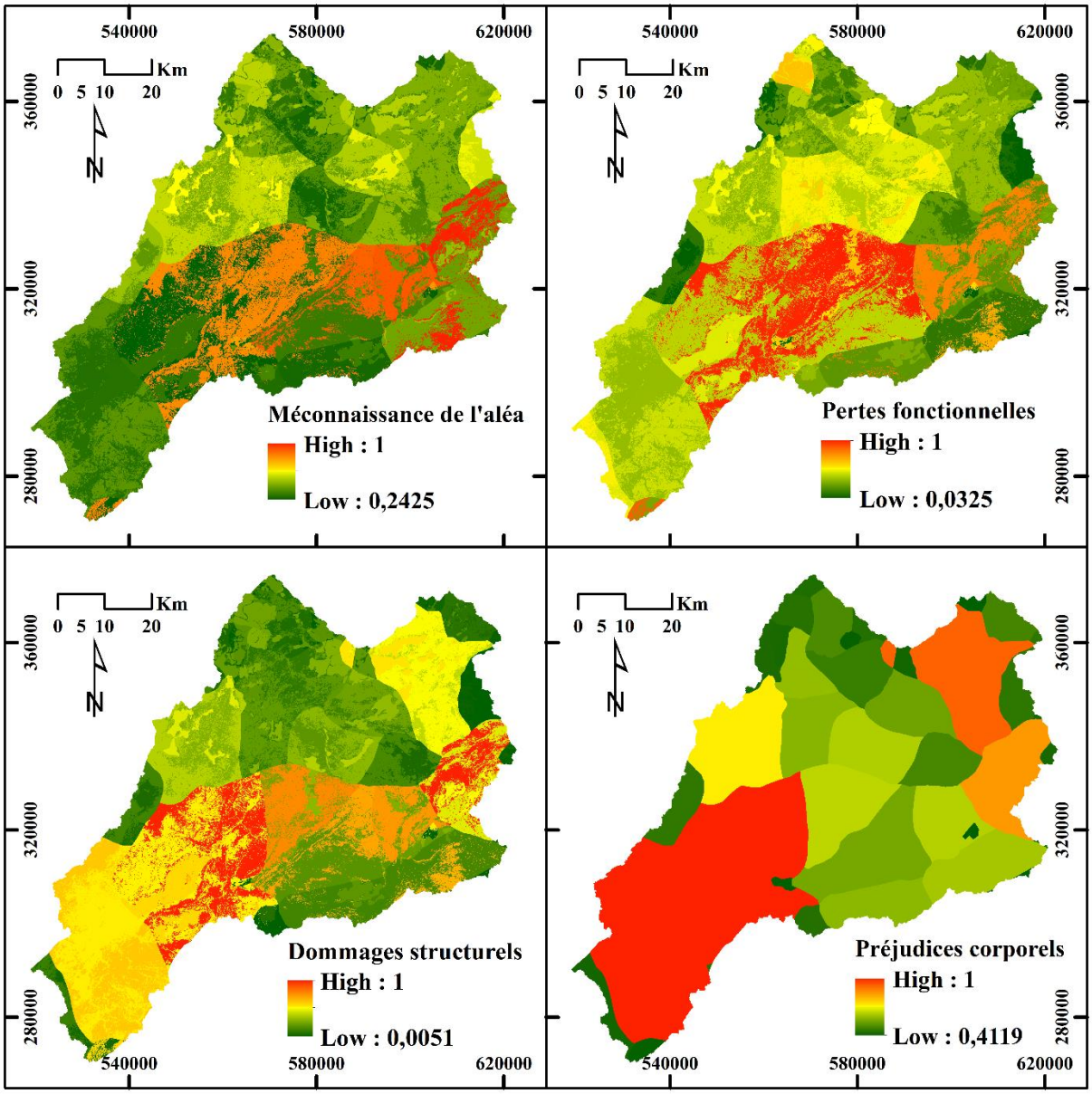


Figure 66: Cartes des composantes de la vulnérabilité du bassin versant Allal Al Fassi

La cartes de la méconnaissance de l'aléa montre que les communes Almis Marmoucha, Ait Bazza, Berkine et Talzemt sont celles qui présentent le maximum d'ignorance du risque de l'érosion. La carte des pertes fonctionnelles montre que les communes Skoura M'Daz, El Mers et Guigou présentent le maximum de pertes fonctionnelles. Talzemt et Guigou sont les communes qui présentent le maximum de dommages structurels. Les communes Timahdite et Guigou présentent un maximum de préjudices corporels (Figure 66).

III.8. Carte de vulnérabilité

La carte de la vulnérabilité est le résultat de la superposition des cartes des composantes de la vulnérabilité, préjudices corporels, dommages structurels, pertes fonctionnelles et méconnaissances de l'aléa, par la méthode de hiérarchie multicritère AHP combinée aux outils SIG. La carte résultante est classifiée en cinq classes de vulnérabilité, très faible, faible, moyenne, forte et très forte (Figure 67).

La classe de la vulnérabilité très forte ne représente que 4,88% de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi. Elle est bien évidente dans la commune de Guigou qui présente le maximum de dommages structurels, de pertes fonctionnelles et de préjudices corporels. Les classes de vulnérabilité faible et très faible, représentent 60,32% de la superficie totale et correspondent aux communes présentant le minimum de préjudices corporels, de dommages structurels, de pertes fonctionnelles et de méconnaissance de l'aléa (Figure 67).

La carte de vulnérabilité peut être utilisée pour attirer l'attention sur les zones géographiques où les impacts du risque de l'érosion devraient être les plus importants et qui doivent donc nécessiter des interventions d'adaptation pour la gestion et la diminution du risque de l'érosion.

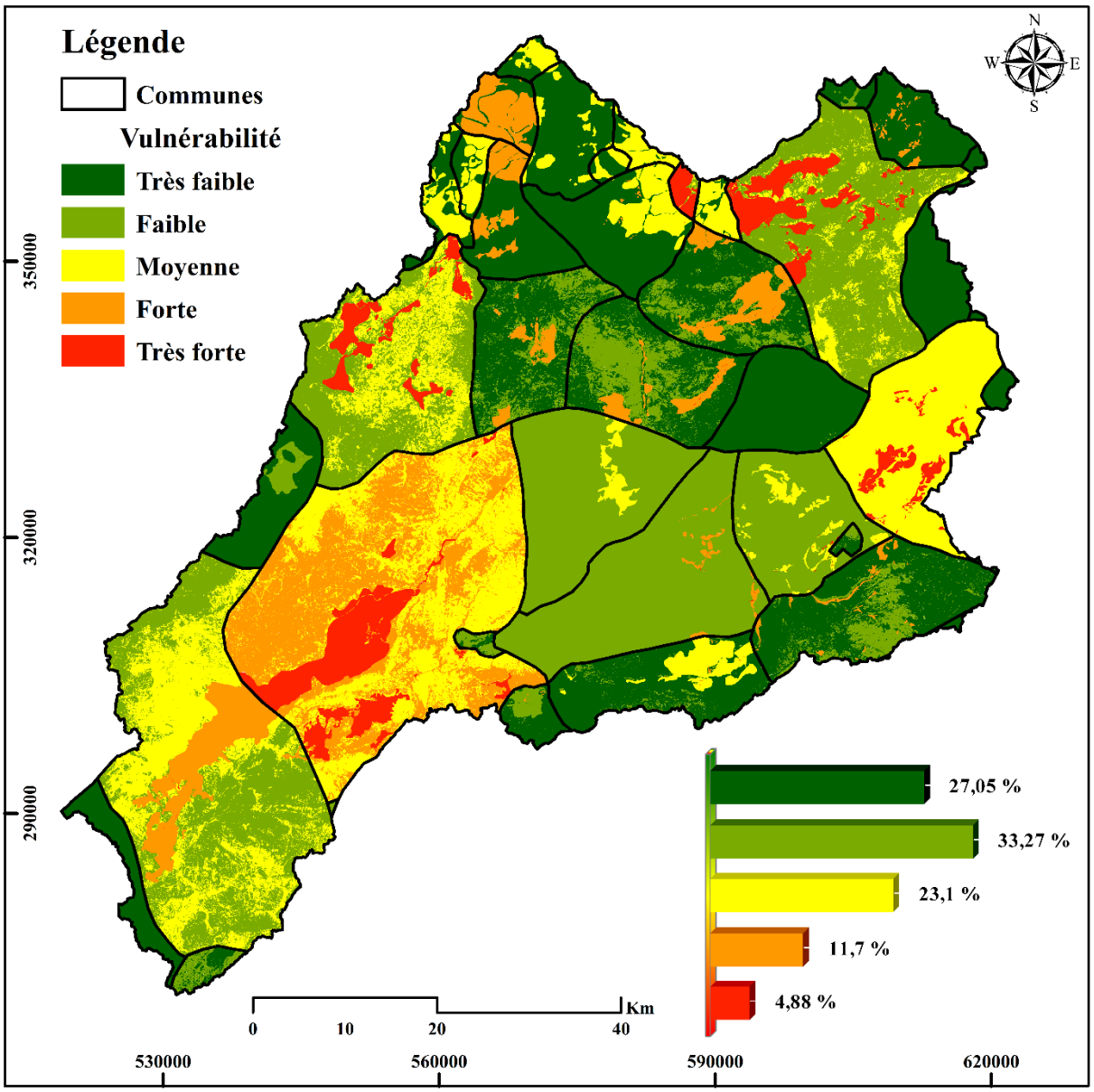


Figure 67: Carte de vulnérabilité du bassin versant Allal Al Fassi

IV. Conclusion

Le facteur anthropique, moteur essentiel de l'évolutions des géosystèmes, intervient dans le phénomène de l'érosion hydrique en l'accroissant mais aussi en le réduisant. En effet, la forte pression démographique et la gestion non durable provoque l'épuisement des ressources, notamment l'agriculture intensive et le défrichement abusif, dégarnissant le couvert végétal des espèces naturelles laissant apparaître par endroits de vastes zones nues, les exposant à l'agression des facteurs climatiques, notamment l'érosion hydrique. Face à la forte érosion aggravée par l'action anthropique, notamment l'exploitation irrationnelle et inadaptée des ressources naturelles, plusieurs aménagements antiérosifs sont réalisés au niveau du bassin

versant Allal Al Fassi afin d'augmenter les rendements agricoles et forestiers et d'orienter la production vers des spéculations plus rentables et durables. En effet, de par la fertilité de ses sols, son climat favorable et ses richesses forestières, le bassin versant Allal Al Fassi présente des possibilités de développement non négligeables. Cependant 90% des communes du bassin versant sont rurales où l'agriculture et l'élevage représentent l'activité principale de plus de la moitié de la population active.

La gestion du risque de l'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi nécessite l'évaluation de sa vulnérabilité par le recensement des différents enjeux pouvant perturber ou interrompre son fonctionnement. Le processus d'hiérarchie analytique est utilisé pour quantifier les indicateurs qualitatifs, et les impacts intégrés des indicateurs peuvent être obtenus en termes quantitatifs en se basant sur la méthode d'aide à la décision hiérarchique multicritère AHP combinée aux outils SIG.

L'évaluation de la vulnérabilité est basée sur l'appréciation de quatre composantes à savoir, les préjudices corporels, les dommages structurels, les pertes fonctionnelles et la méconnaissance de l'aléa. Les classes de vulnérabilité faible et très faible, représentent 60,32% de la superficie totale et correspondent aux communes présentant le minimum de préjudices corporels, de dommages structurels, de pertes fonctionnelles et de méconnaissance de l'aléa.

.

Deuxième partie

Évaluation de l'érosion et effet du barrage M'Dez dans le bassin versant ***Allal Al Fassi***

CHAPITRE I

Tendances de l'érosion et érosion potentielle dans le bassin versant ***Allal Al Fassi***

Chapitre I : Tendances de l'érosion et érosion potentielle dans le bassin versant Allal Al Fassi

L'activité humaine de plus en plus importante a sûrement entrainé une forte augmentation du taux d'érosion des terrains naturels et agricoles, en détruisant l'équilibre entre la formation du sol et son érosion. La diminution graduelle des ressources en sol, conséquence de cette destruction, a été à l'origine du déclin de civilisations historiques. La variation et l'interaction des facteurs causaux provoquant la perte en sols, affectent le patrimoine pédologique et entrainent de graves conséquences des points de vue socio-économique et écologique. L'objectif de ce chapitre est d'établir l'état des lieux du bassin versant, en délimitant d'abord les zones des tendances de l'érosion aggravantes qui risquent d'atteindre des stades irréversibles, en se basant sur les effets des facteurs causaux et leurs interactions. Ensuite en déterminant les facteurs causaux qui peuvent être prépondérants sur l'érosion potentielle. Enfin, en utilisant le coefficient de corrélation, la régression linéaire et l'analyse en composantes principales, par étude statistique, pour révéler les degrés de relations entre les facteurs causaux et les états érosifs.

Pour atteindre l'objectif fixé, la méthode PAP/CAR (Centre d'Activités Régionales du Programme d'Actions Prioritaires) a été choisie *(PAP/CAR, 1992)*. Il s'agit d'un ensemble de directives pour la formulation d'un programme de lutte antiérosive dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qui permet de cartographier et mesurer l'érosion.

I. Modèle probabiliste PAP/CAR

Cette méthode se base sur un ensemble de facteurs naturels qui conditionnent le régime érosif : facteurs invariants comme la lithologie et la topographie et facteurs variants comme la densité de la couverture végétale et l'occupation des sols. Elle comporte trois approches *(PAP/CAR, 1992)* (Figure 68) :

- approche prédictive qui consiste à intégrer les quatre facteurs physiques qui conditionnent l'érosion et à réaliser les différentes cartes thématiques pour définir les facteurs prépondérants de l'érosion. Elle permet l'étude préliminaire du risque d'érosion ;
- approche descriptive consiste à décrire qualitativement les processus d'érosion actuels par observation directe sur le terrain. La carte résultante de cette approche est la carte

des formes de l'érosion réelle. Elle donne une idée sur les processus d'érosion prépondérants dans le bassin versant ;

- approche d'intégration consiste à intégrer et combiner les résultats de l'approche prédictive et l'approche descriptive. Elle génère une carte finale permettant de déterminer les tendances de l'érosion et le devenir du bassin versant.

La méthode PAP/CAR pourrait être l'outil de contrôle de l'état du bassin versant et aussi de l'orientation des décisions à prendre pour protéger le bassin versant contre l'érosion et les aménagements futurs.

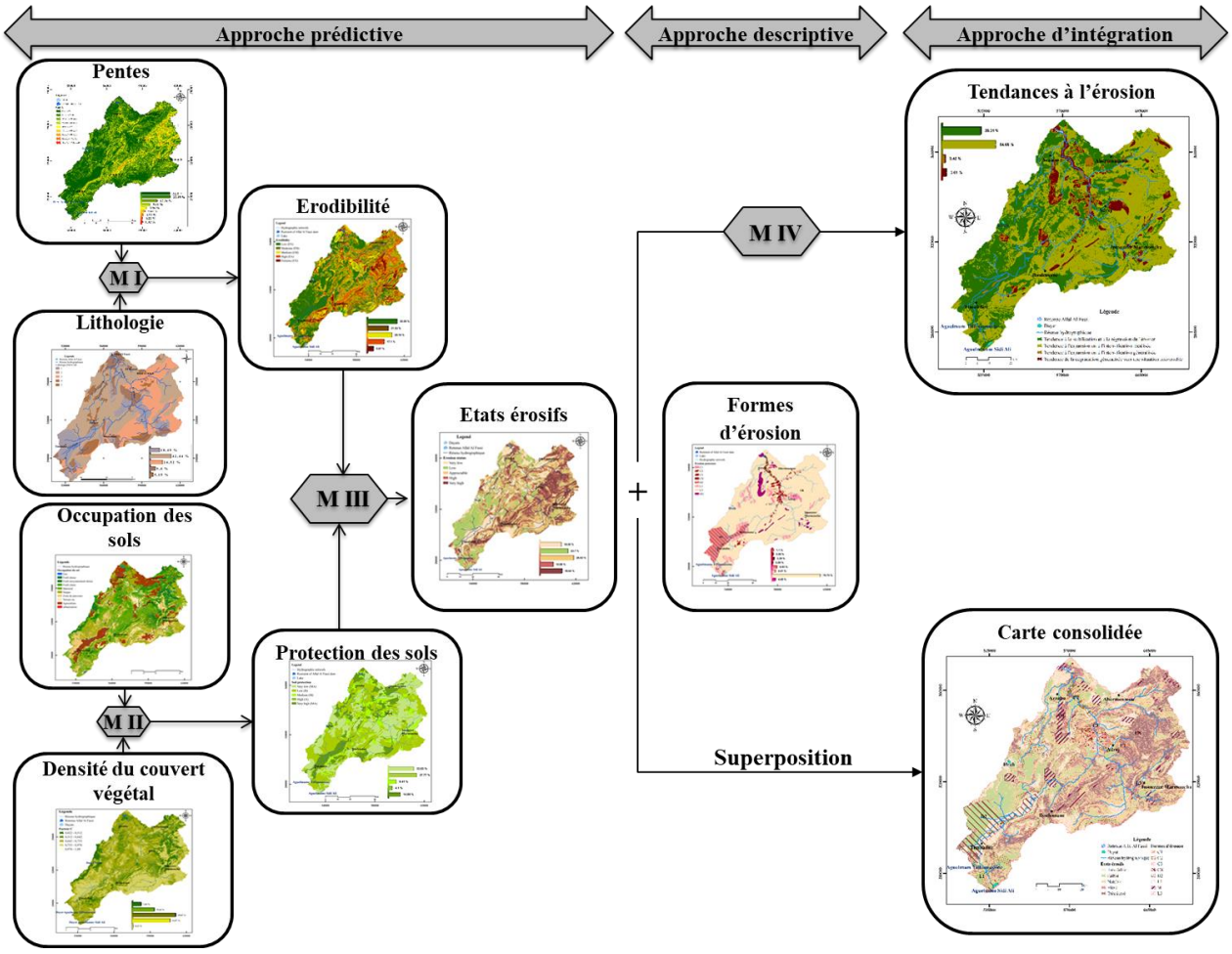


Figure 68: Organigramme méthodologique du modèle PAP/CAR

I.1. Approche prédictive

L'approche prédictive se base sur la cartographie des quatre facteurs qui conditionnent le régime érosif à savoir les pentes, les lithofaciès, l'occupation des sols et la densité du couvert végétal. Ces facteurs d'entrés sont classés selon leurs degrés de risque en suivant les directives PAP/CAR (Tableau 43).

Tableau 43: Classification des paramètres d'entrée de la méthode PAP/CAR

Classes	**États**	**Types**
Pente	**Inclinaison**	**Pourcentage**
1	Nulle à faible	0-3%
2	Modérée	3%-12%
3	Abrupte	12%-20%
4	Très abrupte	20%-35%
5	Extrême	>35%
Lithofaciès	**Résistance**	**Type de roches**
1	Très forte	Compactes non altérées
2	Forte	Fracturées modérément altérées
3	Moyenne	Sédimentaires faiblement ou modérément compactées
4	Faible	Roches et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés
5	Très faible	Sédiment meuble, non cohésif et matériel détritique
Occupation des sols	**Protection**	**Type de couverture**
1	Très faible	Culture en sec ou terrain nu
2	Faible	Arboriculture et reboisement
3	Moyenne	Culture intensive de proximité d'habitation
4	Forte	Forêt naturelle
5	Très forte	Matorral à couvert clair
6	Extrême	Matorral à couvert dense
Densité du couvert végétal	**Protection**	**% densité**
1	Faible	Inférieure à 25%
2	Moyenne	25%-50%
3	Forte	50%-75%
4	Extrême	Supérieure à 75%

La superposition des facteurs d'entrée consiste à les mettre en relation selon des matrices croisées définies par PAP/CAR (Tableau 44) :

- matrice I génère la carte de l'érodibilité en combinant la carte des pentes et la carte de lithofaciès ;
- matrice II génère la carte de protection des sols en croisant la carte d'occupation des sols avec la carte du degré du couvert végétal ;
- matrice III qui génère la carte des états érosifs en combinant les résultats des deux matrices I et II, respectivement carte d'érodibilité et carte de protection des sols.

Tableau 44: Matrices croisées de l'approche prédictive de la méthode PAP/CAR

Matrice I

Classes des pentes	Classes des lithofaciès				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	3	3
3	2	2	3	4	4
4	3	3	4	5	5
5	4	4	5	5	5

Matrice II

Occupation des sols	Couvert végétal			
	1	**2**	**3**	**4**
1	5	5	4	4
2	5	5	4	3
3	3	2	1	1
4	4	3	2	1
5	5	4	3	2
6	5	4	3	2

Matrice III

Protection des sols	Degré 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

Ces matrices ont été obtenues à travers des études des ateliers et des expériences au niveau de toute la rocade méditerranéenne afin de tirer les différentes corrélations entre les facteurs mis en jeu *(PAP/CAR, 1992 ; 1996 ; 1998 ; 1998a ; 2000 ; PAM/PNUE, 2000 ; Aboulabbes, 2005 ; Rafla et al., 2005)*.

Les facteurs de sortie à savoir l'érodibilité, la protection des sols et les états érosifs sont répartis selon cinq classes allant de l'état faible présentant le minimum de susceptibilité au risque à l'état extrême qui traduit la susceptibilité au risque élevée (Tableau 45).

Tableau 45: Classification des paramètres de sortie de l'approche prédictive de la méthode PAP/CAR

Érodibilité	
Classe	**État**
1	Faible
2	Modéré
3	Moyen
4	Fort
5	Extrême

Degré de protection des sols	
Classe	**État**
1	Très élevé
2	Élevé
3	Moyen
4	Faible
5	Très faible

Degré des états érosifs	
Classe	**État**
1	Très faible
2	Faible
3	Notable
4	Élevé
5	Très élevé

I.1.1. Carte d'érodibilité

L'érodibilité d'un terrain exprime son potentiel à produire des sédiments. La carte d'érodibilité est le résultat de l'intersection de la carte des pentes et de la carte de lithofaciès selon la matrice I. Elle hiérarchise le bassin versant en cinq classes allant du degré faible au degré extrême. Les classes sont définies en fonction de la raideur des pentes et la friabilité du substrat, plus la pente est forte et le terrain est friable, plus le degré d'érodibilité est fort.

La carte montre que la classe dominante est celle du degré d'érodibilité faible avec environ 30% de la superficie du bassin versant, suivie de celle du degré d'érodibilité modéré sur 25% de sa superficie totale. Les terrains fortement érodés représentent environ 17% de la superficie totale (Figure 69).

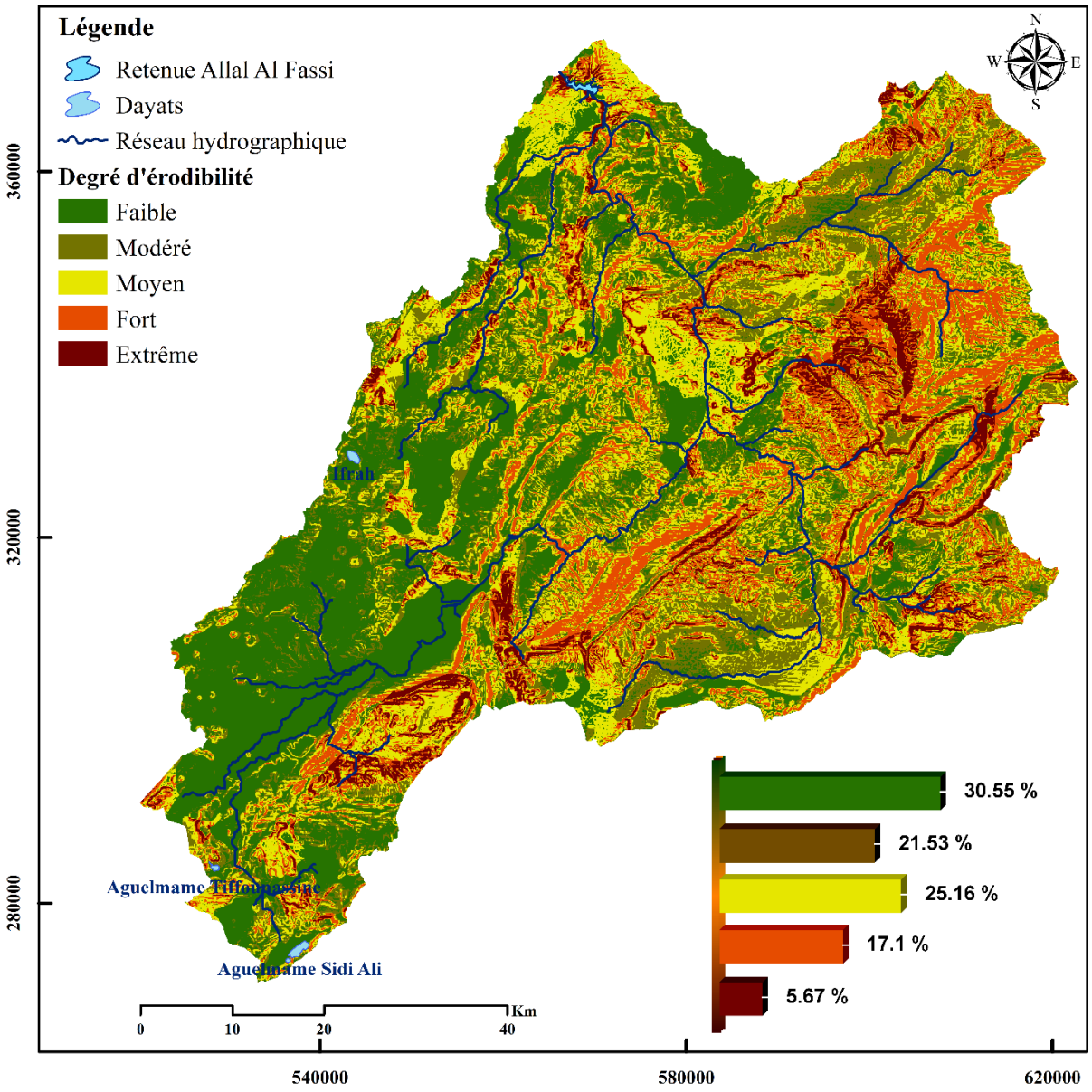


Figure 69: Carte de l'érodibilité du bassin versant Allal Al Fassi

L'analyse de la carte montre que l'érodibilité est forte à extrême sur les terrains à faible résistance et forte pente notamment dans la partie est du bassin versant, contrairement à la partie ouest du bassin versant où les terrains sont plus résistants avec faible degré de pente (inférieur à 12%) et donc une érodibilité moins inquiétante avec un degré faible à modéré. On en déduit aussi que les pentes rectilignes accentuent le degré d'érodibilité *(Roose et Sarrailh, 1990)*.

Paradoxalement dans la partie centrale où existent des terrains friables et un degré de pente faible à modéré, le degré d'érodibilité est moyen à modéré. On en décompte que les faibles pentes atténuent le degré d'érodibilité.

En général, le bassin versant Allal Al Fassi peut être subdivisé en deux grands ensembles de classes d'érodibilité, le premier renferme les classes faible, modérée et moyenne et le deuxième renferme les classes moyenne, forte et extrême. Cette subdivision coïncide avec la subdivision structurale du Moyen Atlas, séparant le Causse moyen atlasique tabulaire et le Moyen Atlas plissé. *(Charrière, 1990 ; Martin, 1977)*.

I.1.2. Carte de protection des sols

La protection des sols met en jeu la nature et la densité du couvert végétal. Sa carte résultante est l'intersection de la carte d'occupation des sols et la carte de densité du couvert végétal selon la matrice II (Tableau 44). Elle hiérarchise le bassin versant en cinq classes allant de très élevée à très faible. L'analyse de la carte montre que le bassin versant Allal Al Fassi est très mal protégé. La classe dominante est celle du degré de protection faible qui couvre environ 38% de la superficie totale, suivie de celle du degré de protection très faible sur environ 34% de la superficie du bassin versant. Ces deux dernières protections, faible et très faible, existent sur l'ensemble du bassin versant, mais dominent dans sa partie sud-est (Figure 70). Les zones à degré de protection des sols élevé à très élevé sont éparses sur environ 19% de la superficie totale du bassin versant. Elles coïncident avec les zones présentant un faible à très faible degré de pente.

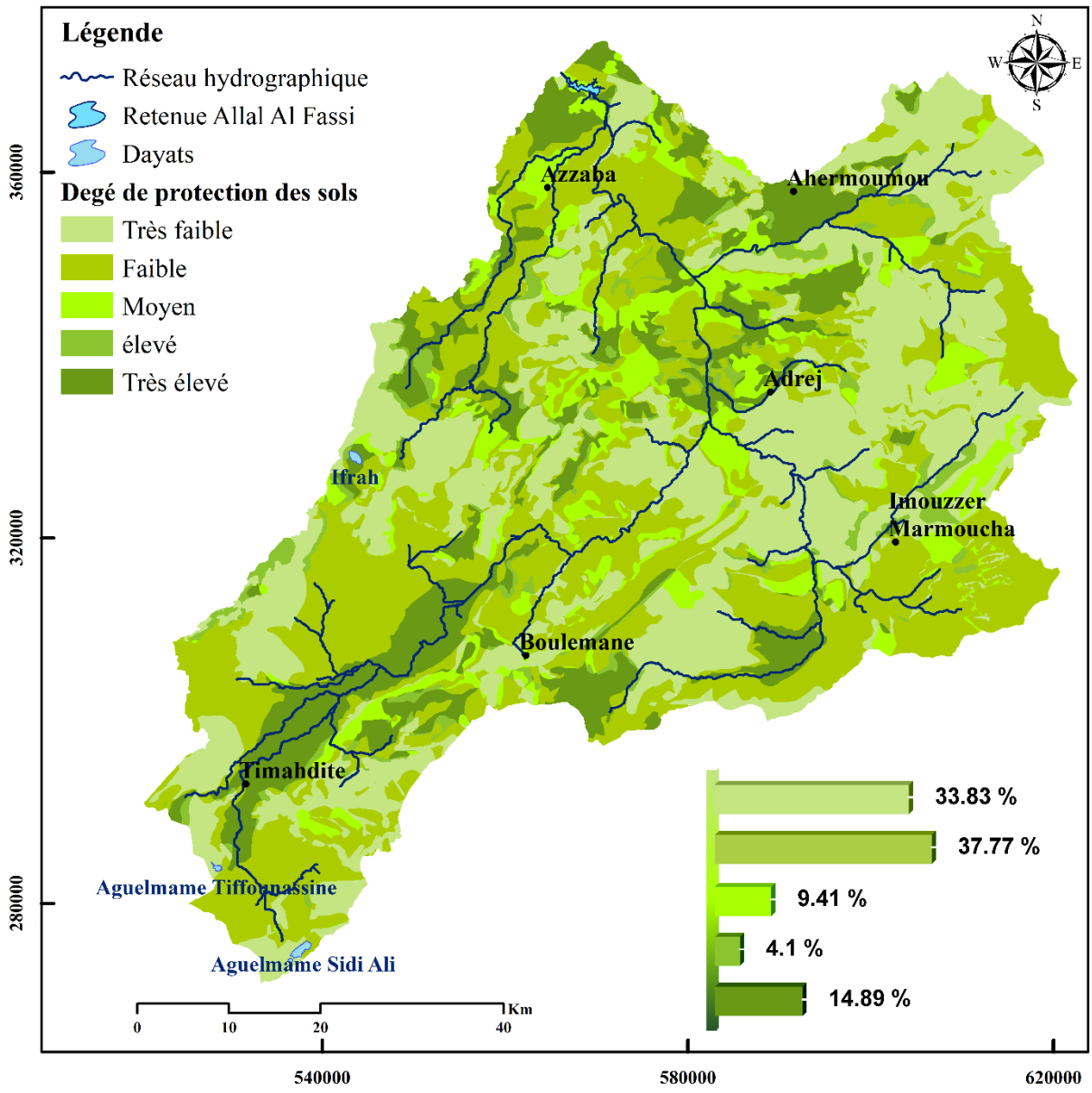


Figure 70: Carte de protection des sols du bassin versant Allal Al Fassi

I.1.3. Carte des états érosifs

La réalisation de la carte des états érosifs constitue l'étape finale de l'approche prédictive. Elle est hiérarchisée en cinq états d'érosion par l'intersection de la carte d'érodibilité et la carte de protection des sols selon la matrice III (Tableau 44).

Le traitement de la base de données montre que la classe la plus représentative est celle du degré d'érosion notable ; elle représente 28,63% de la superficie totale du bassin versant (Figure 71). La classe de l'état érosif très élevé représente environ 19% et celle de l'état érosif élevé représente environ 11%. On en déduit que plus de la moitié de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi est vulnérable à l'érosion.

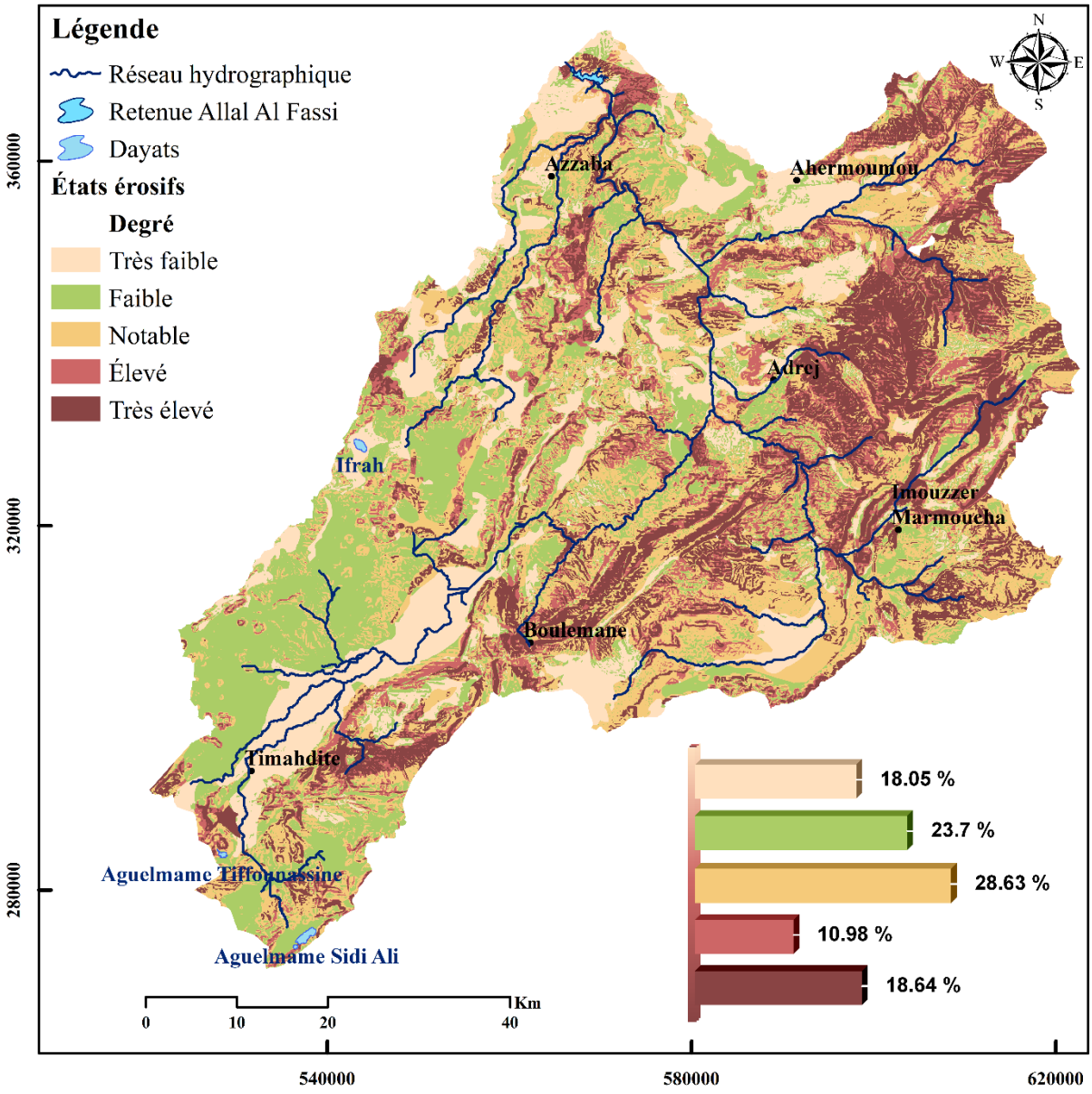


Figure 71: Carte des états érosifs du bassin versant Allal Al Fassi

I.2. Approche descriptive

L'approche descriptive considérée comme complémentaire à l'approche prédictive, consiste à élaborer une carte de l'érosion réelle décrivant qualitativement les processus et les formes d'érosion par observation directe sur le terrain. Pour ce faire, on s'est basé sur la carte réalisée par la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification de Fès-Boulemane (DREFLCD-FB) et la carte des formes de l'érosion des deux bassins de Beni Alaham et Al Azhar *(Faleh et Maktite, 2014)*, rectifiées au moyen d'un navigateur satellitaire et des observations directes sur le terrain (Figure 72). La carte des formes d'érosion est réalisée conformément aux directives de la méthode PAP/CAR en attribuant un code sous

forme de lettre (L, D, C…) pour chaque forme d'érosion suivie d'un chiffre pour l'agressivité du processus (1, 2, 3, X) (Tableau 46).

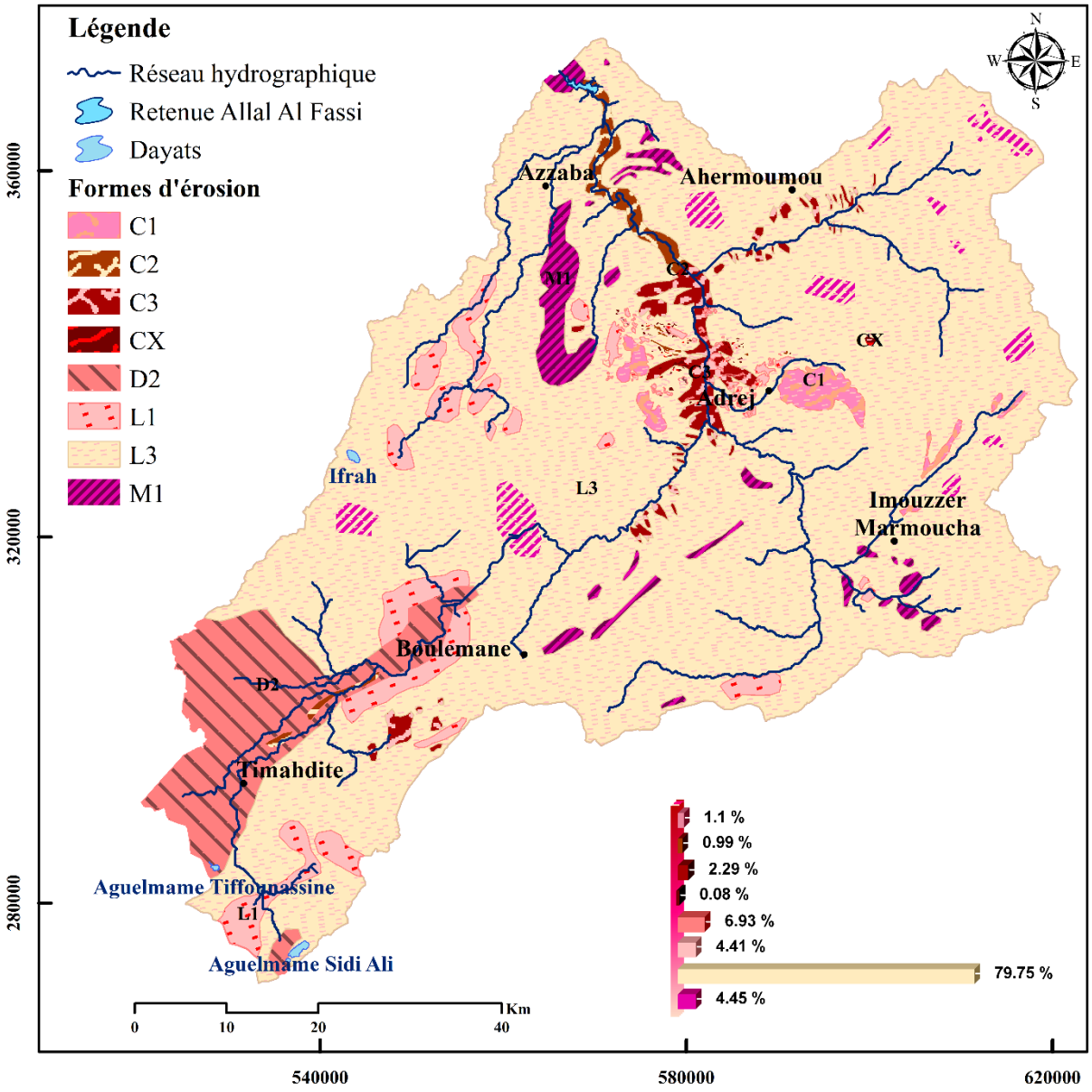
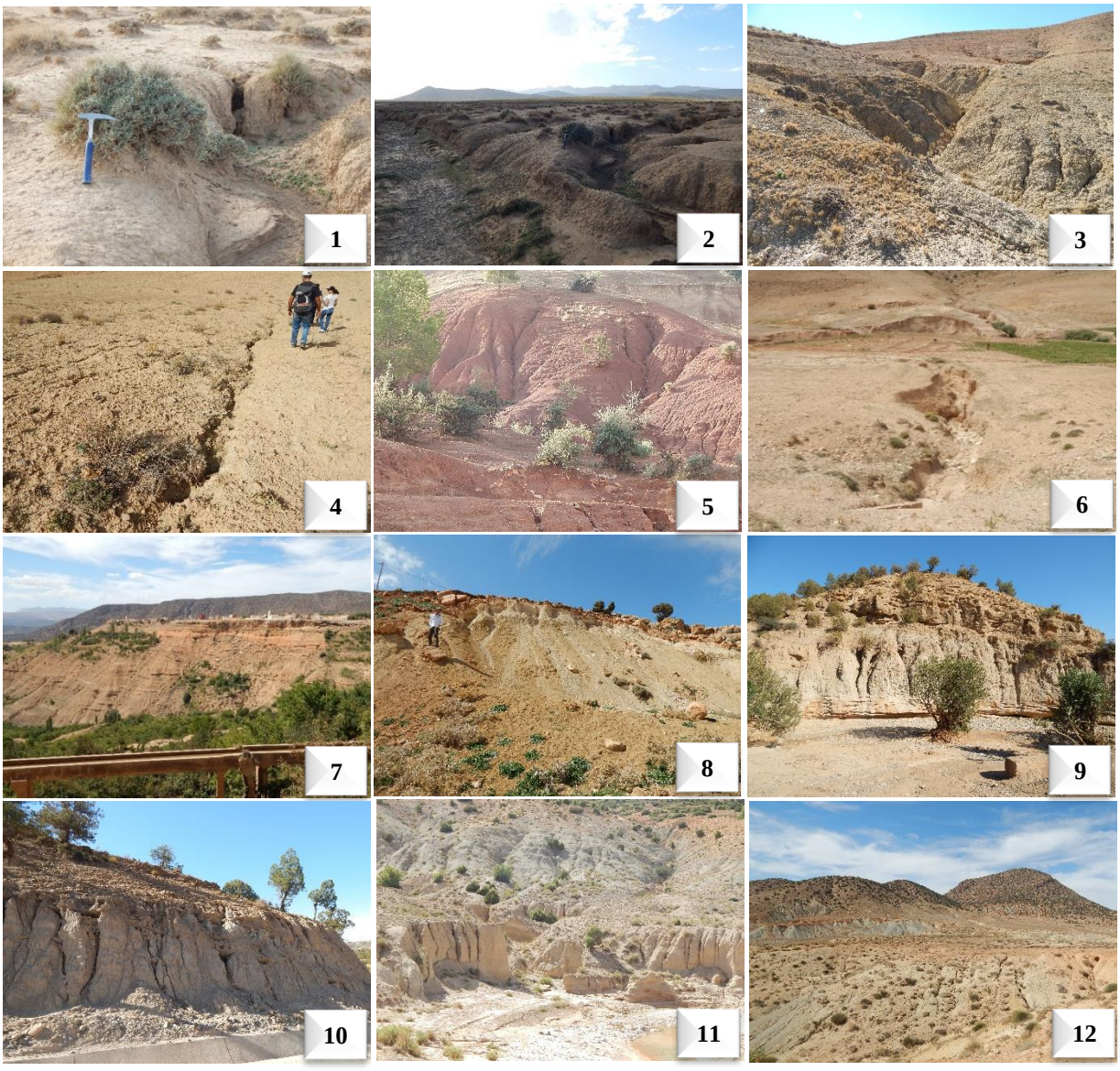


Figure 72: Carte des formes d'érosion du bassin versant Allal Al Fassi

Tableau 46: Classification des formes d'érosion de la méthode PAP/CAR

Symboles	Formes d'érosion
C1	Ravinement
C2	Ravins moyennement profonds
C3	Ravins profonds
CX	Zone à bad-lands et ravinements généralisés
D2	Rigoles et ravinement superficiel
L1	Érosion en nappe et diffuse
L3	Décapage superficiel et ruissellement diffus
M1	Glissement de terrain et solifluxion

Dans le bassin versant Allal Al Fassi, le décapage superficiel et le ruissellement diffus (L3) se développent partout. Cette forme d'érosion menace directement la productivité des sols et plus particulièrement les sols cultivés. Elle représente environ 80 % de la superficie totale du bassin versant. Les rigoles et ravins superficiels (D2) arrivent en deuxième position, après le décapage, sur environ 7% de la superficie du bassin versant. Ils apparaissent en automne dans les sols labourés après chaque averse importante et sont effacés avec les labours et évoluent généralement en formes plus importantes sur les terrains non exploitables. Les autres formes d'érosion (C1, C2, C3, Cx, L1, M1) sont plus rares et éparses sur différents faciès lithologiques du bassin versant (Figures 72 et 73).



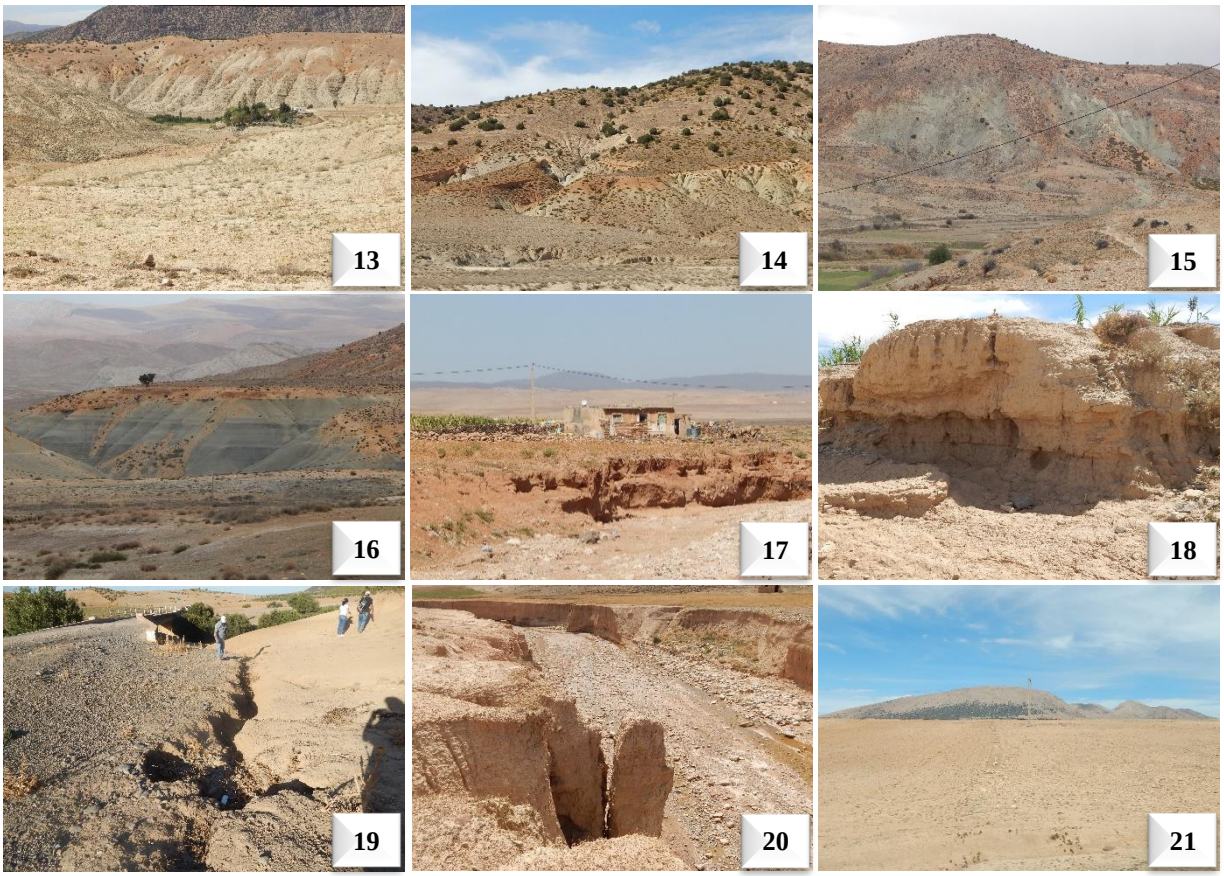


Figure 73: Exemples de formes d'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi

1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 : ravinements ; 8 : ravinements + éboulements ; 9 et 10 : ravinements sub-verticaux ; 11 : ravinements + sapements de berges ; 12, 13 et 14 : ravinements + badlands ; 15et 16 : badlands ; 17, 18 et 19 : sapements de berges ; 20 : sapements de berges + effondrements ; 21 : érosion diffuse.

I.3. Approche d'intégration

L'approche d'intégration consiste à combiner les résultats des deux approches précédentes, prédictive et descriptive. Cette approche consiste à réaliser deux cartes, consolidée et des tendances de l'érosion.

I.3.1. Carte consolidée

La carte consolidée est le résultat de la superposition de la carte des états érosifs et la carte des formes d'érosion (Figures 71, 72 et 74). C'est une carte qualitative qui présente des informations complètes sur les différents aspects du phénomène d'érosion. Il faut noter que la carte des états érosifs a été utilisée comme canevas cartographique de référence (Figure 74).

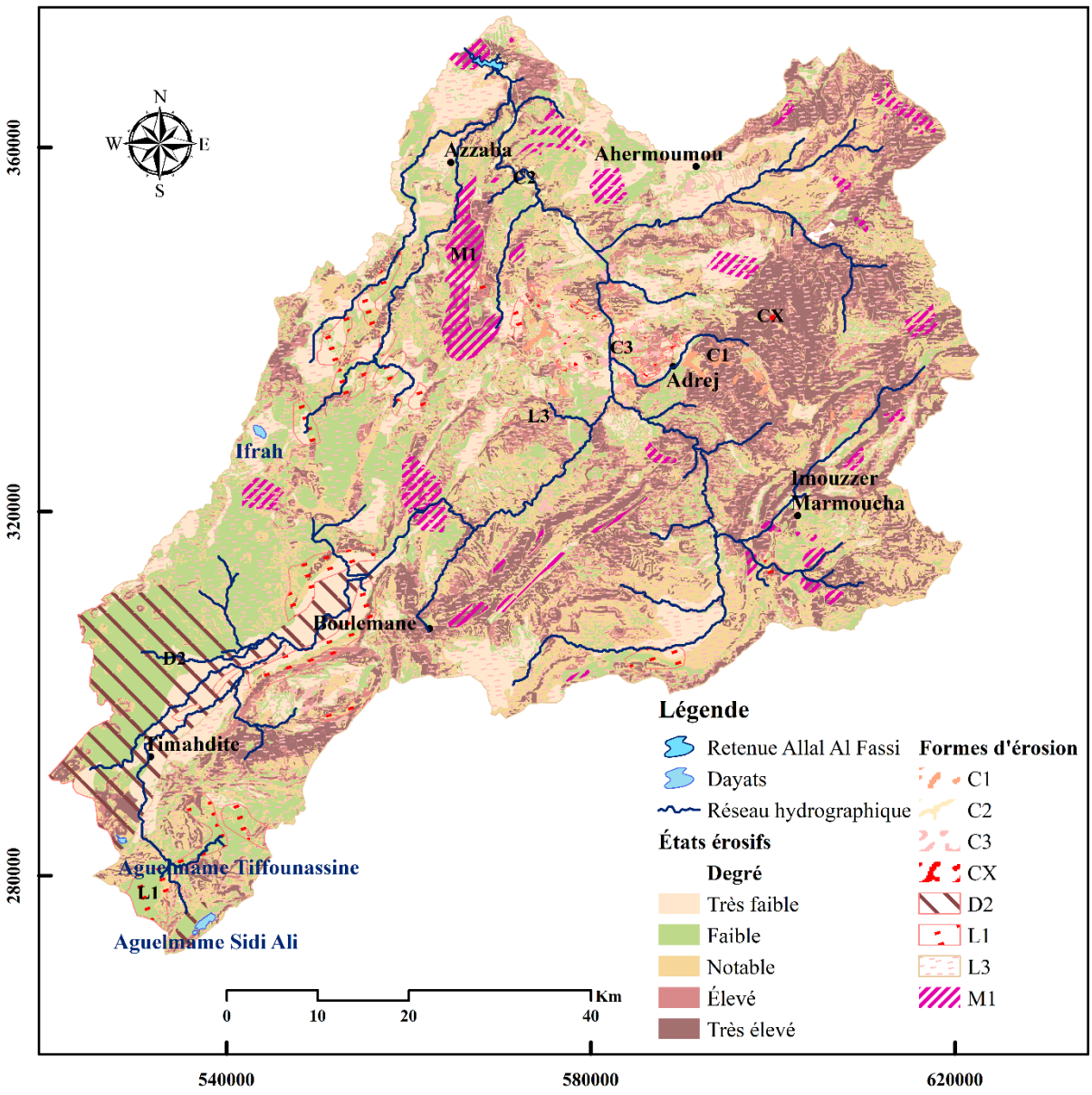


Figure 74: Carte consolidée du bassin versant Allal Al Fassi

La carte consolidée montre que les principales formes d'érosion avoisinent le réseau hydrographique principal et se localisent dans toutes les zones de différents degrés d'érodibilité. Les ravins moyennement profonds coïncident avec des zones où l'état érosif est faible à notable, notamment dans la partie nord du bassin versant. La présence de ces formes peut être liée à la forte pente et à l'agressivité des pluies ; malgré ces conditions, il y a des zones qui n'atteignent pas un degré extrême d'érosion, cela peut être expliqué par la forte densité du couvert végétal. Les ravinements profonds et les glissements de terrain sont liés surtout à des terrains à forte pente et faible densité de couvert végétal, en présentant un degré d'état érosif élevé à très élevé. La partie avale du bassin versant est marquée par la forme d'érosion en nappe, caractérisée par de faibles pentes et faible couvert végétal et par un état érosif notable à élevé (Figure 74).

I.3.2. Carte des tendances

La carte des tendances de l'érosion permet de hiérarchiser le bassin versant en quatre classes en tenant compte de la résistance du milieu et les processus d'érosion. Les tendances de l'érosion sont exprimées par un indice de 1 à 4 (Tableau 47). Cette carte est le résultat de l'intersection de la carte des états érosifs et la carte des formes d'érosion selon la matrice IV (Tableau 48).

Tableau 47: Classification des tendances de l'érosion de la méthode PAP/CAR

Classe	Tendance de l'érosion
1	Tendance à la stabilisation et à la régression de l'érosion
2	Tendance à l'expansion ou à l'intensification localisée
3	Tendance à l'expansion ou à l'intensification généralisée
4	Tendance de la dégradation généralisée vers une situation irréversible

Tableau 48: Matrice IV de l'approche d'intégration de la méthode PAP/CAR

Matrice IV	**Formes d'érosion**	
États érosifs	**Formes mineures d'érosion SP, L et D**	**Formes majeures d'érosion C1…Cx**
Érosion très faible	1	3
Érosion faible	1	3
Érosion notable	2	4
Érosion élevée	2	4
Érosion très élevée	2	4

L'analyse de la carte des tendances de l'érosion (Figure 75) montre que les tendances de la dégradation généralisée vers une situation irréversible qui représentent 3.61% de la superficie totale du bassin versant et les tendances à l'expansion ou à l'intensification généralisée (2.42% de la superficie totale), coïncident avec les processus d'érosion C1, C2, C3, Cx et M1 (Tableau 46) et avec les états érosifs élevés à très élevés (Figure 71). Le substrat de faible résistance, les fortes pentes et la faible couverture végétale peuvent être à l'origine de cette situation. Environ 55% de la superficie du bassin versant présente des tendances à l'expansion ou à l'intensification localisée, notamment à l'Est du bassin versant, coïncidant surtout avec les processus d'érosion L1 et L3 et les états érosifs élevés à très élevés. Les fortes pentes, la faible couverture végétale, l'agressivité du climat et l'action anthropique peuvent être la cause de ces tendances. La classe des tendances à la stabilisation et à la régression de l'érosion présente

environ 40% de la superficie totale du bassin versant et coïncide avec les états érosifs faibles à très faibles.

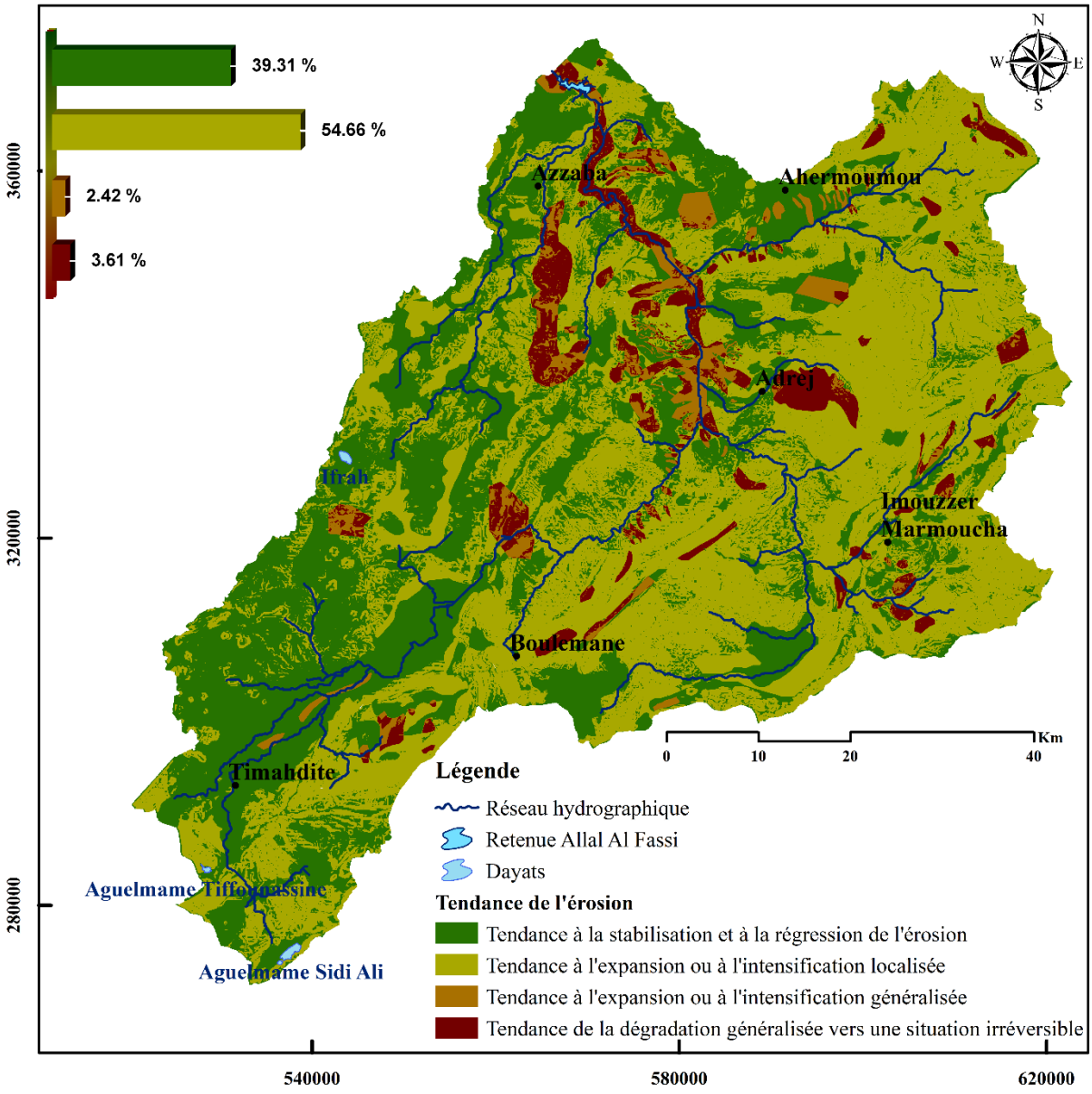


Figure 75: Carte des tendances de l'érosion du bassin versant Allal Al Fassi

II. Relations entre les facteurs causaux et l'érosion hydrique

Afin de définir les facteurs qui contrôlent le risque de l'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi, les résultats sont soumis à une analyse statistique multivariée. L'ensemble des tests statistiques est réalisé à l'aide du programme StatGraphics Centurion 18. Il comprend l'analyse de l'indice de corrélation de Pearson r, la régression linéaire R^2 et l'analyse en composantes principales ACP. En utilisant des matrices de corrélation et des relations linéaires simples, à l'aide de l'indice de corrélation de Pearson, les relations entre les états érosifs, les

tendances de l'érosion et les facteurs causaux sont établies. Ainsi l'analyse en composantes principales en appliquant la méthode du carré le plus proche, le carré euclidien, est utilisée pour réduire le nombre de facteurs et regrouper les variables précédemment normalisées.

II.1.Coefficient de corrélation de Pearson (r)

Dans le but de définir les facteurs causaux qui contrôlent le risque d'érosion, le coefficient de corrélation linéaire simple, dit de Bravais-Pearson a été choisi. Il s'agit d'une normalisation de la covariance par le produit des écarts-type des variables. Le coefficient de corrélation mesure la force de la relation linéaire entre les variables, dans ce cas entre les états érosifs, les tendances de l'érosion et l'ensemble des facteurs causaux qui contrôlent le régime érosif.

La matrice de corrélation montre que les états érosifs présentent des corrélations positives presque parfaites avec l'érodibilité (r=0.76) et la pente (r=0.65) et une corrélation presque parfaite mais négative avec le couvert végétal (r=-0.41). La corrélation avec l'occupation des sols est négative mais reste non significative (r=-0.02). La protection des sols montre une corrélation négative presque parfaite avec le couvert végétal (-0.66) et une corrélation négative non significative avec le type d'occupation des sols (r=-0.08) (Figure 76).

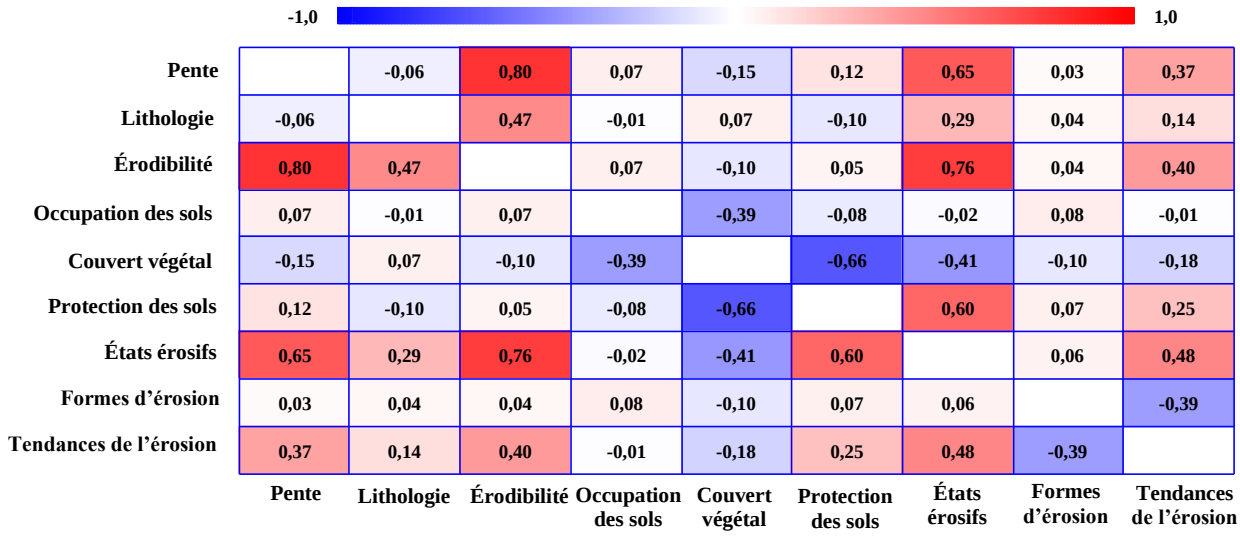


Figure 76: Matrice de corrélation des états érosifs et des facteurs causaux

Les tendances de l'érosion présentent des corrélations presque parfaites positives avec les états érosifs (r=0.48), l'érodibilité (r=0.40) et la pente (r=0.37), et négatives avec les formes d'érosion (r=-0.39). Elles présentent aussi des corrélations peu significatives avec la protection des sols (r=0.25), le couvert végétal (r=-0.18) et la lithologie (r=0.14) mais pas significative avec le type d'occupation des sols (r=-0.01). La corrélation des états érosifs avec la densité du

couvert végétal est nécessairement inverse avec une intensité plus faible pour l'érodibilité et la pente qui ont des corrélations positives importantes.

Ces corrélations montrent que la pente est le facteur qui agit le plus sur l'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi.

II.2.Régression linéaire R^2

Le modèle de régression linéaire multiple qui relie les états érosifs aux facteurs causaux de l'érosion (pente, lithologie, occupation des sols et couvert végétal) est ajusté ainsi:

$$\textbf{Etats érosifs} = \mathbf{1,41 + 0,71 * Pente + 0,42 * lithologie - 0,14 * Occupation\ des\ sols - 0,47 * Couvert\ végétal} \quad (30)$$

Selon l'équation 30, le rapport entre les valeurs observées et les valeurs prédites du modèle de régression est établi. La régression linéraire R^2 montre que le modèle explique 68,34% de la variabilité des états érosifs. Comme la P-valeur est inférieure à 0,05, ce terme est statistiquement significatif au niveau de confiance de 95,0%.

Afin de décrire la relation entre les états érosifs et les facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi, les résultats de l'ajustement des modèles sont vérifiés. Les états érosifs avec la pente enregistre le pourcentage le plus élevé avec 42,42% suivi de 17,04% avec le couvert végétal. Les autres facteurs ne dépassent pas 10%.

L'équation du modèle ajusté pour décrire la relation entre les états érosifs et la pente (états érosifs=0,79+0,73*pente) montre une régression linéaire indiquant que le modèle explique 42,42% de la variabilité des états érosifs. Celle qui décrit la relation entre les états érosifs et le couvert végétal (états érosifs=3,95-0,43*couvert végétal) montre une régression linéaire indiquant que le modèle explique 17,04% de la variabilité des états érosifs. Les deux facteurs présentent des coeffcients de corrélation témoignant d'une relation relativement forte avec les états érosifs, positive pour la pente (r=0,65) et négative pour le couvert végétal (r=-0.41) (Figure 77).

L'équation du modèle ajusté pour décrire la relation entre les états érosifs et la lithologie (états érosifs=2,02+0,32*lithologie) a une régression linéaire indiquant que le modèle explique 8,31% de la variabilité des états érosifs et celle qui décrit la relation entre les états érosifs et l'occupation des sols (états érosifs=2,92+0,01*occupation des sols) montre une régression linéaire indiquant que le modèle n'explique que 0,02% de la variabilité des états érosifs. Les

deux facteurs présentent des coeffcients de corrélation témoignant de relations faibles avec les états érosifs, positive avec la lithologie (r=0,28) et négative pour l'occupation des sols (r=-0,02) (Figure 77).

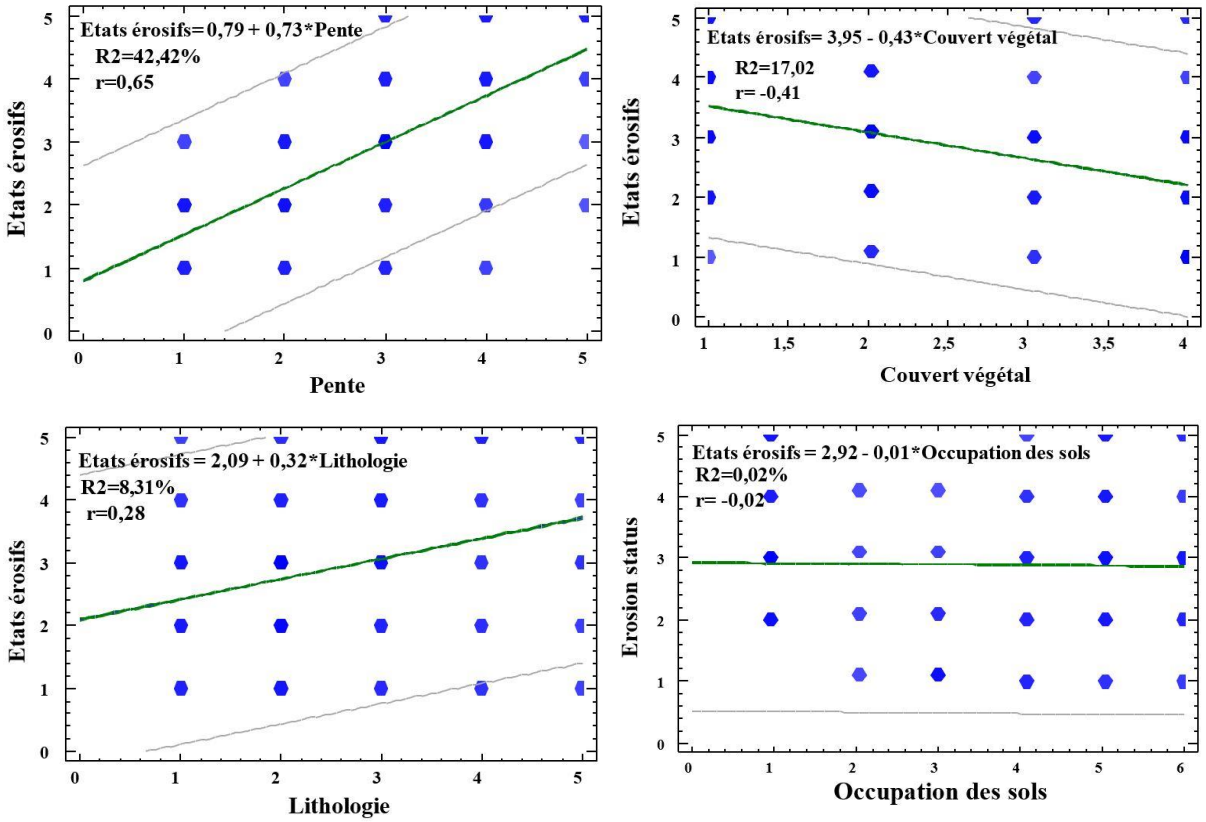


Figure 77: Courbes de régression des états érosifs et des facteurs causaux

II.3.Analyse en composantes principales (ACP)

L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) a pour but de chercher un petit nombre de combinaisons linéaires des six variables qui expliquent la plus grande partie de la variabilité des données. Dans ce cas, les quatre composantes qui ont des valeurs propres supérieures ou égales à 1 ont été extraites (Tableau 49). Elles représentent 80,57% de la variabilité des données d'origine. Le tableau 49 montre le détail des équations des principales composantes, où les valeurs des variables sont normalisées en soustrayant leurs moyennes et en les divisant par leur écarts types, en citant la première composante principale comme suite :

$$0,43 * \text{Pente} + 0,16 * \text{Lithologie} + 0,47 * \text{Erodibilité} + 0,06 * \text{Occupation des sols} - 0,28 * \text{Couvert végétal} + 0,30 * \text{Protection des sols} + 0,53 * \text{Etats érosifs} - 0,01 * \text{Formes d'érosion} + 0,35 * \text{Tendances de l'érosion} \quad (31)$$

Tableau 49: Tableaux des poids des composants

	Composante			
	1	**2**	**3**	**4**
Pente	0,43	0,17	0,08	-0,14
Lithologie	0,16	0,37	0,27	0,15
Erodibilité	0,47	0,35	0,22	-0,05
Occupation des sols	0,06	-0,24	0,36	-0,78
Couvert végétal	-0,28	0,58	-0,04	0,14
Protection des sols	0,30	-0,52	-0,20	0,37
Etats érosifs	0,53	-0,01	0,02	0,20
Forme d'érosion	-0,01	-0,18	0,70	0,36
Tendances de l'érosion	0,35	0,13	-0,46	-0,18

Nombre de composantes	**Valeur propre**	**Pourcentage de variance**	**Pourcentage cumulé**
1	3,16	35,06	35,06
2	1,69	18,74	53,80
3	1,32	14,66	68,46
4	**1,09**	**12,12**	**80,57**
5	0,99	11,01	91,58
6	0,42	4,68	96,26
7	0,23	2,51	98,77
8	0,08	0,85	99,62
9	0,03	0,38	100,00

L'analyse des associations linéaires entre les états érosifs et les facteurs causaux a permis de les représenter dans un espace factoriel et d'interpréter leurs relations en dérivant une série de composantes qui regroupent les variables expliquant le mieux la variance, y compris les pertes en sols. Quatre composantes principales ont été extraites, avec une valeur propre supérieure ou égale à 1, ce qui explique 80,57% de la variabilité des données normalisées (Figure 78). La première composante explique 35,06% de la variation. Les variables les plus pondérées sont les états érosifs, l'érodibilité et la pente, alors que les corrélations sont négatives pour le couvert végétal et les formes d'érosion (Tableau 49).

L'analyse en composantes principales, en résumant les variables corrélées du premier ordre sous forme de composantes indépendantes et finies, permet de regrouper des individus dans un espace bidimensionnel ou tridimensionnel. Les neuf variables sont toutes représentées en trois dimensions par un vecteur (Figure 78) dont la direction et la longueur indiquent comment chaque variable contribue aux trois composantes principales du graphique. Les trois composantes tracées expliquent respectivement 35,06%, 18,74% et 14,66% de la variance totale, avec une variance cumulée de 68,46%.

Dans le diagramme tridimensionnel, basé sur les données dérivées de l'analyse en composantes principales, l'effet des traits sur le groupement des différents vecteurs et la localisation de chaque facteur sont également indiqués en fonction de la composante sélectionnée (Figure 78).

La longueur de chaque vecteur représente son poids dans la création de groupes distincts, liée à la valeur de la composante pour le trait correspondant. Les facteurs peuvent être comparés en traçant une ligne perpendiculaire au vecteur. En fait, plus la distance de la ligne

d'origine avec la source est grande, plus la fonction du facteur présente une déviation plus grande que la performance moyenne du rique d'érosion.

L'angle entre les vecteurs dans les diagrammes illustre leur corrélation approximative, la relation entre les vecteurs associés à l'érodibilité et la pente dans le diagramme, catégorise les états érosifs de manière logique et directionnelle pour la composante ACP1.

La première composante principale, sur l'axe horizontal, présente des coefficients positifs pour sept variables. C'est pourquoi les sept vecteurs (lithologie, occupation des sols, érodibilité, pente, états érosifs, protection des sols et les tendences à l'érosion) sont dirigés vers la moitié droite du graphe. Deux variables (formes d'érosion et couvert végétal) présentent des coefficients négatifs, des vecteurs dirigés vers la moitié gauche du graphe. Les coefficients les plus importants de la première composante principale sont ceux des états érosifs, de l'érodibilité et de la pente. Cela rèvèle qu'ils contribuent de manière significative à la variation expliquée par la composante principale 1 (ACP1) (Figure 78).

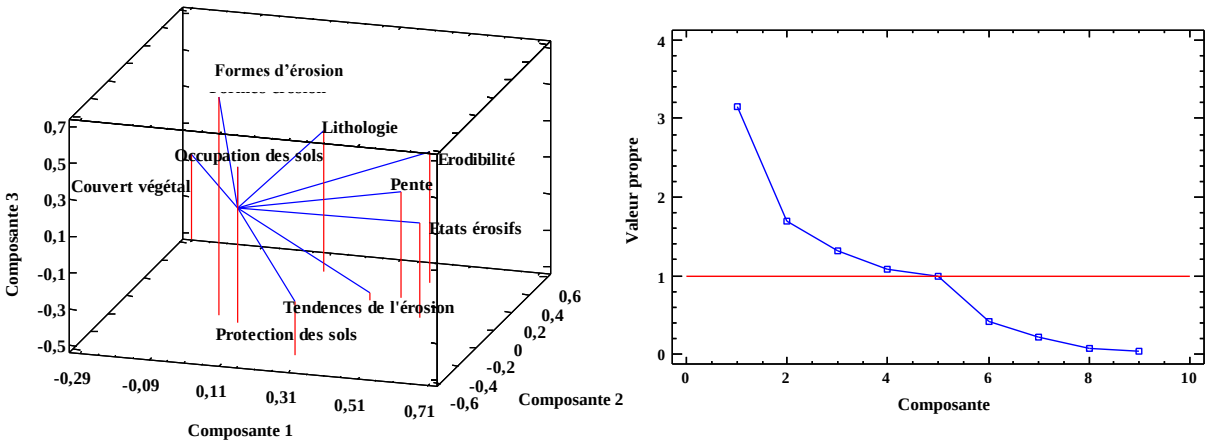


Figure 78: Diagramme des composantes principales et des poids des variables

La troisième composante principale, sur l'axe vertical, a des coefficients positifs pour les variables, formes d'érosion, occupation des sols, lithologie, érodibilité, pente et états érosifs, et des coefficients négatifs pour les trois variables restantes. Il ressort clairement que les vecteurs appartenant d'une part aux tendances de l'érosion et aux formes d'éorion et d'autre part à l'occupation des sols vont dans une direction opposée, ce qui indique l'importance relative de ces variabes par rapport à l'ACP3 (Figure 78). Les coefficients les plus importants de la troisième composante principale sont ceux des formes d'érosion, des tendences de l'érosion et de l'occupation des sols.

Les tests ont été réalisés avec une probabilité de 0.05 et au niveau de confiance de 95.0 %.

III. Evaluation du risque de l'érosion hydrique

L'évaluation du risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi, fait intervenir des notions plus complexes que la seule appréciation de la susceptibilité. C'est le résultat de l'interaction entre un aléa et la vulnérabilité des éléments exposés à son égard. L'aléa constitue un phénomène susceptible d'occasionner une dégradation de l'environnement *(Morin et Bouchard, 2009)*. La vulnérabilité représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages, faisant ainsi référence aux situations et aux caractéristiques intrinsèques d'un milieu ou d'éléments de celui-ci, conduisant à anticiper des conséquences néfastes pouvant résulter de la manifestation d'un aléa. Elle exprime l'inaptitude d'un milieu et de ses composantes à résister à un aléa ou à répondre à sa manifestation *(Morin et Bouchard, 2009)* (Figure 79).

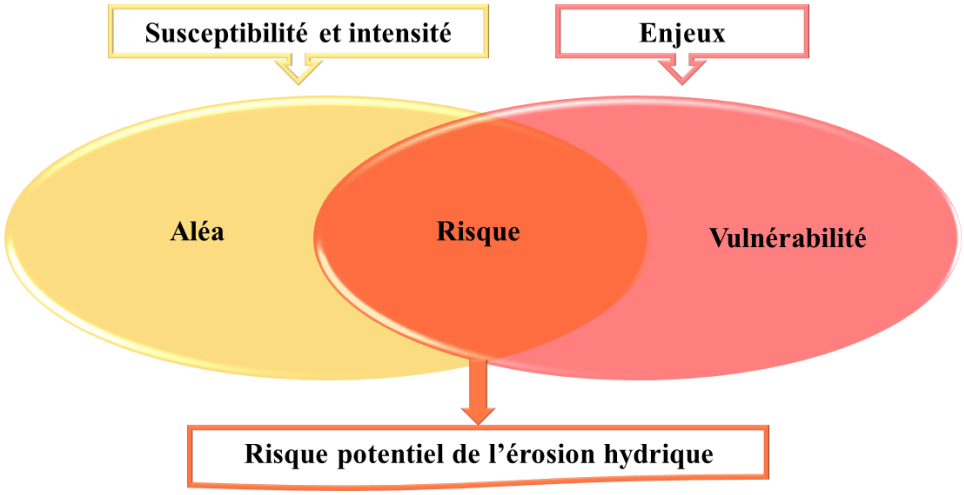


Figure 79: Organigramme de l'évaluation du risque potentiel

Le risque de l'érosion potentiel est défini par l'équation suivante : risque = aléa × vulnérabilité. Les critères composant la vulnérabilité représentent la capacité du bassin versant Allal Al Fassi de résister à l'aléa érosion hydrique. En effet, le degré de vulnérabilité obtenu est combiné au degré de l'aléa de manière à établir un niveau de risque.

La carte du risque potentiel de l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi est le résultat de la superposition des deux composantes du risque, impliquant la susceptibilité

de l'aléa (érosion hydrique) et la vulnérabilité des enjeux exposés (Figure 80), à l'aide des outils SIG.

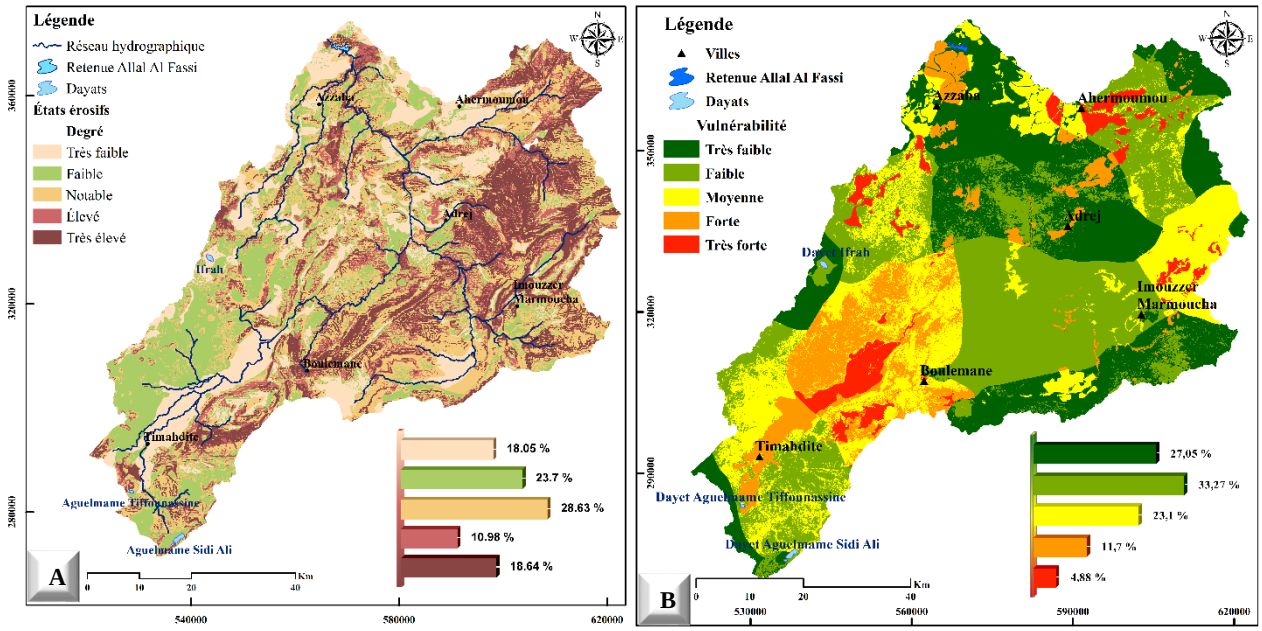


Figure 80: Composantes du risque potentiel de l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi

A - carte de susceptibilité de l'érosion ; B - carte de vulnérabilité

La carte du risque potentiel montre que les degrés du risque très faible et faible représentent, respectivement, 38,9% et 26,88% de la superficie totale. Ils correspondent à une susceptibilité très faible à notable et une vulnérabilité très faible à faible. Le degré du risque moyen représente 22,97% de la superficie totale et concorde avec la superposition d'une susceptibilité très faible à faible et une vulnérabilité forte à très forte, et la superposition d'une susceptibilité forte à très forte et une vulnérabilité très faible à faible. Les degrés du risque fort à très fort ne représente que 11,24% de la superficie totale et correspondent à une susceptibilité forte à très forte et une vulnérabilité forte à très forte. Ils sont localisés principalement au niveau des communes Guigou et Talzemt (Figure 81).

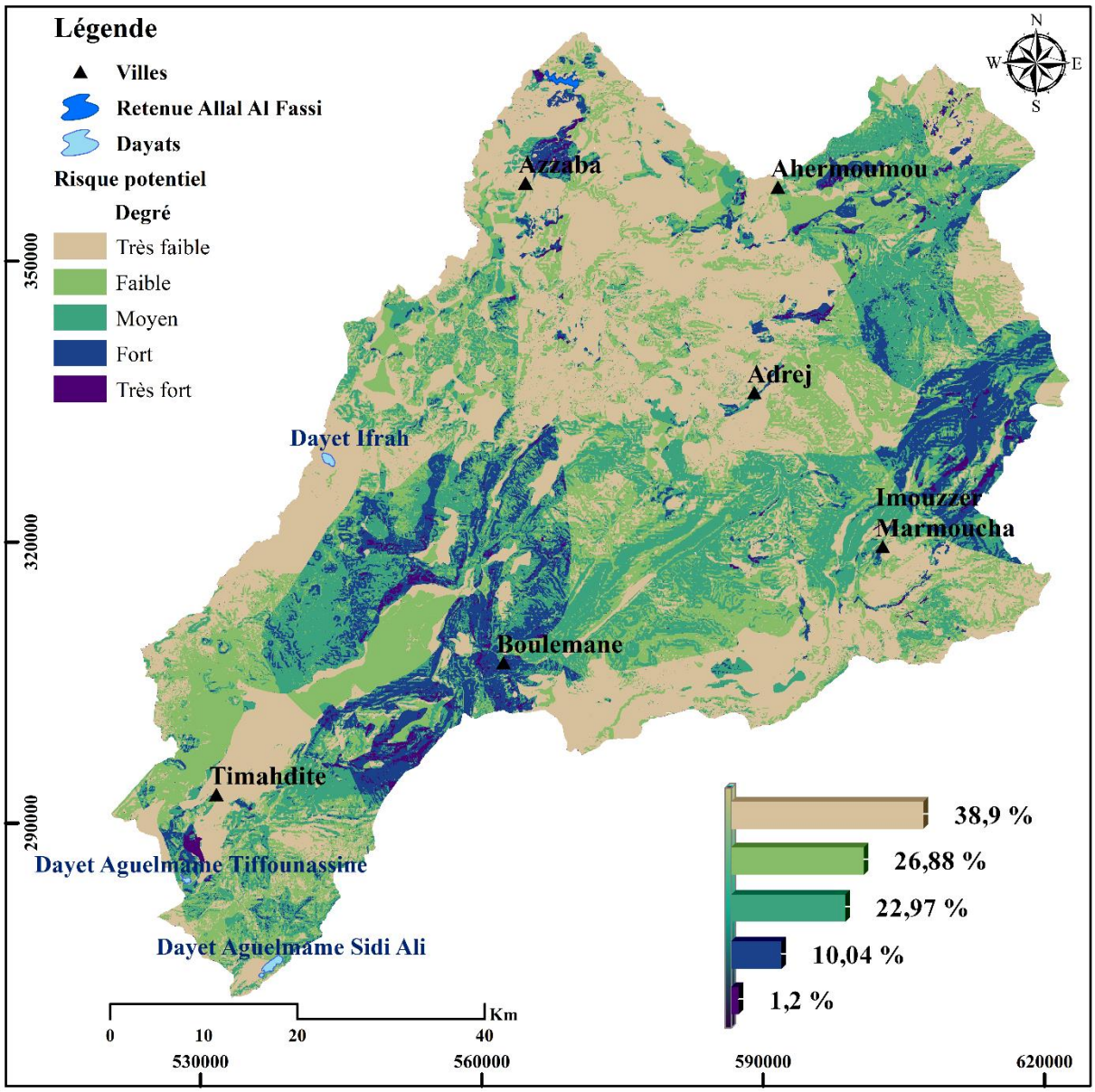


Figure 81: Carte du risque potentiel de l'érosion hydrique du bassin versant Allal Al Fassi

IV. Conclusion

Le bassin versant Allal Al Fassi qui appartient au bassin versant de l'Oued Sebou, dans le pourtour méditerranéen, à vocation agricole, est soumis certainement à l'érosion des sols. Vus la diversité des facteurs causaux et les changements climatiques, la méthode PAP/CAR a permis de définir les tendances de l'érosion selon des matrices croisées, basées sur les degrés d'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique, à savoir la pente, la lithologie, l'occupation des sols et le degré du recouvrement végétal.

La carte des états érosifs du bassin versant Allal Al Fassi montre cinq états érosifs, environ 24% de la superficie totale présente une faible prédisposition à l'érosion hydrique et

environ 30% présente un degré d'érosion élevé à très élevé. En analysant la base de données de cette approche, il s'est avéré que l'état érosif très faible correspond à une pente faible, un matériel résistant (faible érodibilité) et un degré de protection très élevé notamment dans la partie sud-ouest ; contrairement à la partie est du bassin versant qui montre un état érosif élevé à très élevé, une érodibilité extrême et un degré de protection faible à très faible. Au centre, l'état érosif est faible malgré un degré d'érodibilité moyen à fort mais un degré de protection des sols très élevé. La pente entretient une relation positive avec le degré d'érodibilité, plus la pente est forte plus le degré d'érodibilité est extrême, contrairement à la relation avec la lithologie du terrain qui est forcément négative, plus le terrain est résistant plus l'érodibilité est faible.

Cette méthode par son approche descriptive a permis de définir les différents processus de l'érosion hydrique, notamment le décapage superficiel qui affecte environ 80% de la surface totale du bassin versant et s'avère le plus dangereux. Elle a aussi pu montrer les différents aspects du phénomène d'érosion hydrique par la combinaison des résultats des approches prédictive et descriptive. Cette approche d'intégration a montré qu'environ 55% du bassin versant présente des tendances à l'expansion ou à l'intensification localisées.

Dans le bassin versant Allal Al Fassi, la présente étude a permis de cartographier le risque d'érosion hydrique et de montrer la répartition et l'interaction des différents facteurs causaux et par conséquence montrer que la pente est le facteur prépondérant dans le risque de l'érosion hydrique qui nécessite une intervention préventive et/ou corrective.

Les résultats de l'analyse statistique ont confirmé la cohérence des résultats de l'approche prédictive. Les états érosifs s'aggravent avec l'augmentation de la raideur des pentes et la diminution de la protection des sols. Avec un coefficient de corrélation de 0.65, la pente est le facteur qui agit le plus sur l'érosion dans le bassin versant Allal Al Fassi.

A l'état actuel et devant ces tendances menaçantes de la dégradation des ressources naturelles, de l'infrastructure et par conséquent de la qualité de vie socio-économique des populations, il s'avère nécessaire d'intervenir pour la lutte contre le risque d'érosion en agissant efficacement sur le(s) facteur(s) prépondérant(s), principalement le facteur topographique qui nécessite une action en concevant les structures antiérosives qui diminuent l'effet de la pente.

CHAPITRE II

Quantification des pertes en sols et statistiques multivariées dans le bassin versant ***Allal Al Fassi***

Chapitre II : Quantification des pertes en sols et statistiques multivariées dans le bassin versant Allal Al Fassi

Dans l'optique de la préservation des ressources en eau et de la conservation des terres agricoles et de la biodiversité, une évaluation précise des pertes en sols est nécessaire. La compréhension et la définition des relations entre l'érosion hydrique et les facteurs aggravant sa dynamique dans le bassin versant Allal Al Fassi, au moyen des statistiques multivariées, ont fait partie intégrante de ce chapitre. En effet, l'estimation précise des pertes en sols est nécessaire afin d'évaluer les enjeux socio-économiques et environnementaux de l'érosion hydrique et développer les mesures de contrôle et de prévention *(Boardman et Poesen, 2006)*.

Pour atteindre les objectifs fixés, l'équation universelle des pertes en sols révisée RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) *(Renard et al., 1997)*, a été choisie. Elle permet la prédiction des pertes en sols à moyen terme. La combinaison du modèle avec les outils de télédétection et les systèmes d'information géographique permet de spatialiser les pertes en sols avec précision sur les zones étendues *(Willward et Mersey, 1999 ; Lu et al., 2004 ; Jasrotia et Singh, 2006)*. L'équation universelle des pertes en sols révisée RUSLE intègre cinq facteurs qui sont associés au climat, au sol, à la topographie, à la végétation et à la gestion *(Renard et al., 1997)* (Figure 82).

Des sous-modèles ont été adoptés pour calculer les facteurs d'érosivité R, d'érodibilité K, de degré et longueur des pentes LS, de conservation des sols C et des pratiques antiérosives P à l'aide des données de terrain, de la télédétection et des systèmes d'information géographique SIG. L'objectif de ce chapitre n'est pas seulement de quantifier les pertes en sols mais aussi de définir les facteurs contrôlant le risque de l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi moyennant une étude statistique multivariée. L'ensemble des résultats est soumis à une analyse statistique multivariée à l'aide du programme StatGraphics Centurion 18. Elle comprend l'analyse de l'indice de corrélation de Pearson r, la régression linéaire R^2, l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse en composantes principales ACP. Les pertes en sols sont étudiées en fonction des paramètres physico-chimiques et des variables biogéographiques.

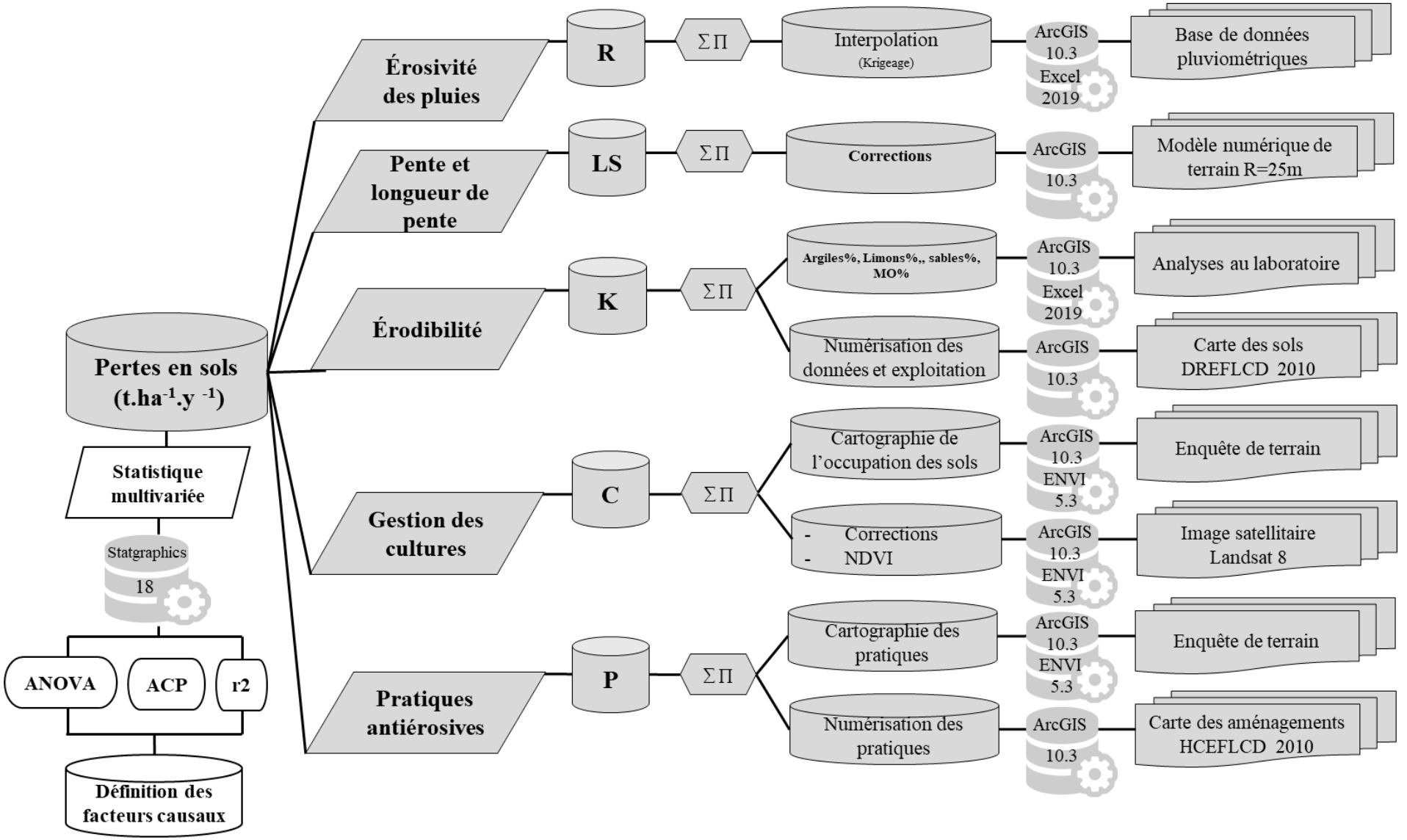


Figure 82 : Organigramme méthodologique du modèle mathématique RUSLE

I. Modèle mathématique RUSLE

L'équation universelle des pertes en sols révisée RUSLE, intègre cinq facteurs, érosivité R, érodibilité K, degré et longueur des pentes LS, conservation des sols C et pratiques antiérosives P, selon l'équation 32.

$$\boldsymbol{Y = R * K * LS * C * P} \quad (t.ha^{-1}.\ an^{-1}) \qquad (32)$$

Y est la perte moyenne du sol (t. $ha^{-1}.an^{-1}$) ; R est le facteur d'érosivité des pluies (MJ.mm.$ha^{-1}.h^{-1}.an^{-1}$) ; K est le facteur d'érodibilité du sol (t.ha.h.$ha^{-1}.Mj^{-1}.mm^{-1}$) ; LS sont des facteurs topographiques qui tiennent compte de la longueur et du degré de pente ; C est le facteur de gestion de la couverture végétale et P est le facteur des pratiques antiérosives. Les facteurs LS, C et P sont sans dimension. Le facteur R est défini par Hudson *(1981)* comme étant la capacité potentielle de la pluie dans la production de l'érosion. La majorité des auteurs qui ont utilisé le modèle RUSLE pour la quantification des pertes en sols au Maroc, ont adopté l'équation de Rango et Arnoldus *(1987)* pour calculer le facteur de l'érosivité des pluies *(Sadiki, 2005 ; Mesrar, 2017)*. Le facteur R est calculé en utilisant les précipitations moyennes annuelles *(Morschel et Dennis, 2004)* selon l'équation 33.

$$\boldsymbol{log\ R = 1,74 * log \sum (\frac{P_i^2}{P}) + 1,29} \quad (MJ.mm\ .ha^{-1}.an^{-1}) \qquad (33)$$

Où

Pi : précipitations mensuelles (mm), P : précipitations annuelles (mm). Les valeurs de R calculées dans dix-huit stations pluviométriques sont ensuite interpolées sur le reste du bassin versant au moyen de la méthode Krigeage *(Krige, 1950 ; Matheron, 1989)*, moyennant les outils d'analyse spatiale ArcGIS.

Les sols dans le bassin versant Allal Al Fassi sont classés en dix classes différentes (minéraux bruts, peu évolués, vertisols, calcimagnésiques, isohumiques, sesquioxydes de fer, complexe C_1, complexe C_2, complexe C_3 et complexe C_4 *(Baali, 1998 ; HCEFLCD, 1997)*. Après plusieurs compagnes d'échantillonnages sur l'ensemble du bassin versant, les échantillons ont été analysés afin de déterminer le taux de matière organique, de sables et de silts pour calculer le facteur d'érodibilité K (Tableau 51). L'analyseur de taille de particules par diffraction laser ANALYSETTE 22 NanoTec a été utilisé pour déterminer la taille des grains fins. Le dosage de la matière organique est réalisé à partir du dosage du carbone,

l'un de ses constituants les plus importants, par la méthode de Walkley-Black *(Walkley et Black, 1934)*.

L'érodibilité K est calculée selon l'équation 34.

$$\boldsymbol{K = \frac{2,1.10^{-4} * M^{1,14} * (12 - M_0) + 3,25\,(S_S - 2) + 2,5(P - 3)}{100}}\ (t.ha.h.ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1})\ \textbf{(34)}$$

Où M : pourcentage de silts + pourcentage de sable fin ; M0 : pourcentage de matière organique ; Ss : code de structure du sol et P : code de perméabilité du sol *(Hussein et al., 2018)* (Tableau 50), (Figure 83).

Tableau 50: Signification des codes pour la structure et la perméabilité du sol (Wischmeier et Smith, 1978)

Code	Structure du sol
1	Très fine
2	Fine
3	Moyenne ou grossière
4	Massive

Code	Perméabilité
1	Rapide
2	Moyenne à rapide
3	Moyenne
4	Lente à moyenne
5	Lente
6	Très lente

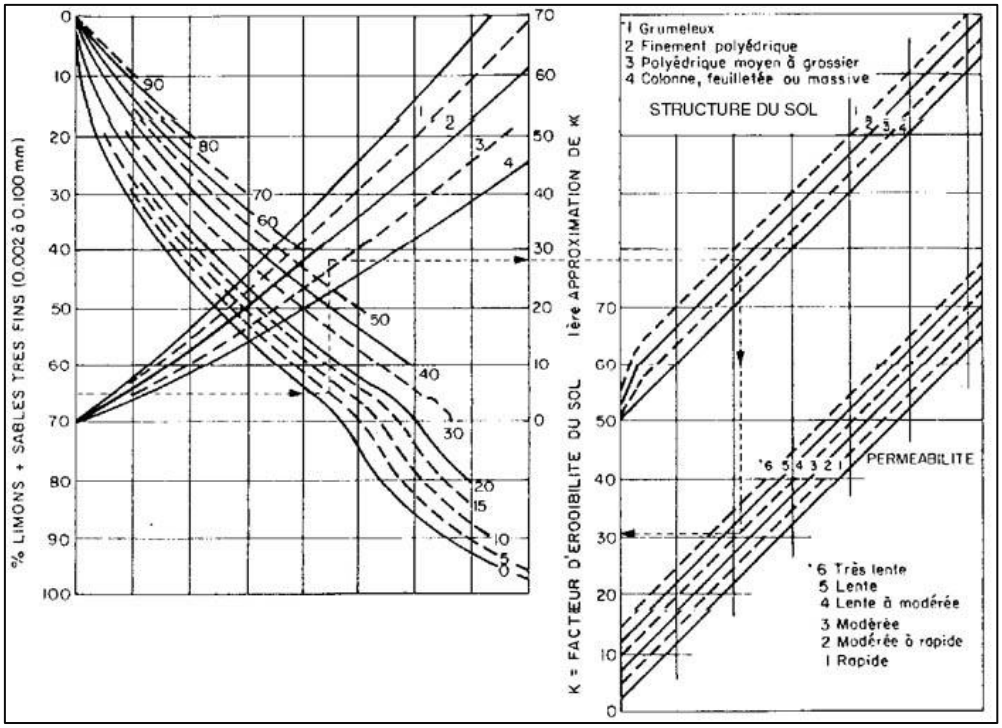


Figure 83 : Nomographe de l'érodibilité des sols (Wischmeier et Smith, 1978)

L'équation de l'érodibilité K a été ajustée par Dumas *(Dumas, 1965)* afin de remédier à certaines imperfections, notamment la réduction de l'énergie du ruissellement (Equation 35).

$$K_{ajusté} = K(0.983 - 0.0189\,X + 0.0000973\,X^2)(t.ha.h.ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}) \quad (35)$$

Où K est le facteur d'érodibilité calculé par Wischmeier et Smith *(1978)* et X est le pourcentage d'éléments grossiers de taille supérieure à 2mm.

Tableau 51: Quelques résultats d'analyses des échantillons et K ajustée calculée

Echantillon	Argiles %	Silts %	Sables %	Texture	F<2mm %	F>2mm %	M.O. %	Code P	Code Ss	K	K ajustée
TIM-E1	32,1	66,5	1,4	Silts-argileux fins	83,63	16,37	2,29	6	2	0,37	0,262
TIGH-E1	21,3	68,6	10,1	Silts fins	62,69	37,31	1,47	3	2	0,4	0,167
SEGH-E1	26,7	64,8	8,5	Silts fins	95,57	4,43	0,65	3	2	0,38	0,339
MNZ-E1	24,1	69,6	6,3	Silts fins	92,85	7,15	2,7	3	4	0,41	0,351
MDZ-E1	13	71,8	15,2	Silts fins	67,51	32,49	1,87	3	2	0,46	0,218
IMZM-E1	37,2	58,6	4,2	Silts-argileux fins	61,84	38,16	1,18	6	3	0,37	0,151
TAAR-E1	17,3	72	10,7	Silts fins	77,22	22,78	0,63	3	2	0,49	0,294
AHER-E1	30,1	66,9	3	Silts-argileux fins	88	12	2,26	6	3	0,42	0,325
R-AHER1	30,1	66,9	3	Silts-argileux fins	95,48	4,52	3,02	6	3	0,4	0,357
R-IMZ1	35,9	60,6	3,5	Silts-argileux fins	60,62	39,38	1,36	6	3	0,4	0,15
R-TAAR1	20,1	69,2	10,7	Silts fins	99,61	0,39	0,64	3	3	0,5	0,469
R-MNZ1	22,7	70,1	7,2	Silts fins	90,72	9,28	3,09	3	3	0,4	0,305
R-TIGH1	22,7	67,6	9,7	Silts fins	55,2	44,8	1,38	3	3	0,4	0,141
R-SEGH1	28,5	66,9	4,6	Silts-argileux fins	99,1	0,9	0,17	6	3	0,5	0,483
R-TIM1	32	65,9	2,1	Silts-argileux fins	83,36	16,64	2,31	6	3	0,4	0,281
R-MDZ1	12,8	69,8	17,4	Silts fins	56,59	43,41	1,82	3	3	0,5	0,168

LS est le facteur de la longueur et du degré de la pente. L'inclinaison de la pente agit sur la vitesse du ruissèlement et par conséquent l'érosion des sols et la formation des rigoles. Cette action est amplifiée par la longueur de la pente *(Morschel et Dennis, 2004)*.

Le facteur LS est calculé à partir du modèle numérique de terrain (MNT) moyennant les outils d'analyse spatiale ArcGIS par l'équation 36 de Wischmeier et Smith *(1978)*

$$LS = (L/22.15)m * (65.41 * \sin^2(S) + 4.56 * \sin(S) + 0.065) \quad (36)$$

Où L est la longueur de la pente, S est le degré de pente et m est un facteur qui dépend du degré de pente (Figure 84) : m = 0.2 pour S = 1.0%, m = 0.3 pour 1.0 ≤ S ≤ 3.0%, m = 0.4 pour 3.5 ≤ S ≤ 4.5% et m = 0.5 pour S > 5.0%.

L'amélioration de l'équation empiriques du calcul du facteur LS, en intégrant l'influence du profil de convexité/concavité à la segmentation des pentes irrégulières est faite selon l'équation 37 *(Foster et Wischmeier, 1974 ; Renard et al., 1997)*.

$$LS_{(r)} = (m+1)\left[\frac{A_{(r)}}{a_0}\right]^{m} * \left[\frac{\sin b_{(r)}}{b_0}\right]^{n} \quad (37)$$

Avec $A_{(r)}$: la surface en m^2, $b_{(r)}$: la pente en %, b_0 : la pente standard (0,0896%) et a_0 : la longueur standard (22,13m). Les valeurs de m=0,6 et n=1,3 donnent des résultats cohérents avec le facteur LS pour des longueurs de pente *(Moore et Wilson, 1992)*.

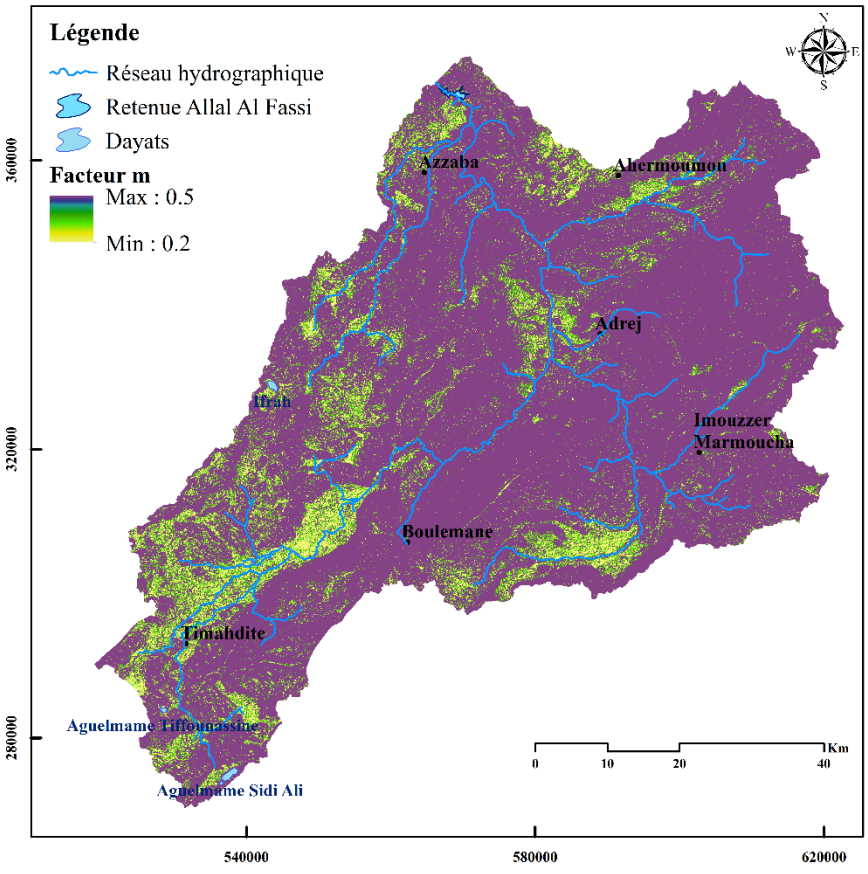


Figure 84 : Répartition du facteur m dans le bassin versant Allal Al Fassi

Le facteur de la conservation des sols noté C exprime l'influence du couvert végétal et des techniques culturales sur les pertes en sols *(Renard et al., 1997)*. Il représente le rapport

entre la perte en sols sous une couverture donnée et celle en sols nus. Il constitue le facteur le plus déterminant et le plus dynamique pour les bassins versants marocains suite aux multiples interventions climatiques et anthropiques *(Mesrar, 2016 ; El Kamel et al., 2020a)*. Le facteur C est calculé à partir de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI= le rapport entre la bande infrarouge moins la bande rouge et la bande infrarouge plus la bande rouge) à partir d'une image satellitaire Landsat-8 à l'aide du logiciel ENVI, par l'équation 38 *(Van der Knijff et al., 2000 ; Van Leeuwen, 2004)*.

$$C = e^{-\alpha * \frac{NDVI}{\beta - NDVI}} \quad (38)$$

Avec α et β des paramètres sans unité qui déterminent la forme de la courbe relative aux valeurs de NDVI et les échantillons réels en calculant la linéarité NDVI *(Farhan et al., 2013)* (Figure 85). Le calcul du facteur C est réalisé avec une classification selon l'équation 39 moyennant les outils d'analyse spatiale ArcGIS.

$$C = -0,750 \times NDVI + 0,284 \quad (39)$$

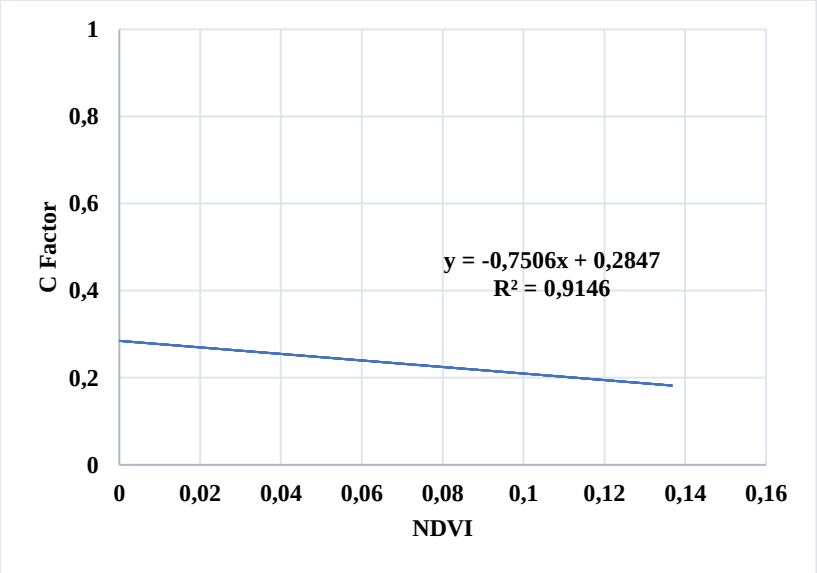


Figure 85 : Corrélation entre les valeurs du facteur C et les valeurs NDVI

Le facteur des pratiques de conservation P exprime l'efficacité des aménagements antiérosifs agissant à la fois sur le schéma d'écoulement et sur la topographie du terrain pour la réduction du flux et de la vitesse du ruissellement.

Le bassin versant Allal Al Fassi est déjà soumis à plusieurs aménagements antiérosifs dans le cadre du plan d'aménagement des bassins versants par le Haut-Commissariat aux Eaux

et Forêt et la Lutte Contre la Désertification, notamment dans les provinces de Sefrou et Boulemane entre 2008 et 2014. Parmi ces aménagements, des actions biologiques et mécaniques de conservation des eaux et des sols, des aménagements pour la collecte des eaux pluviales, des aménagements hydro-agricoles, production des plants, sylviculture et des aménagements fonciers *(HCEFLCD, 2010 ; El Kamel et al., 2020a)*. Ces aménagements sont spatialisés géographiquement par le service d'aménagement et de programmation de la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification (DREFLCD) de Fès-Boulemane et constituent la base de la carte des pratiques antiérosives réalisées.

Afin de réaliser la carte du facteur P pour chaque type d'aménagement, une valeur allant de 0 à 1 lui est attribuée, où la valeur 1 représente l'absence d'aménagement de conservation. Les valeurs du facteur P sont dérivées de la bibliographie (Tableau 52).

Tableau 52: Valeurs du facteur P et références bibliographiques

Type d'aménagement	Facteur P	Référence bibliographique
Aucune mesure de conservation	1	*(Wischmeier et Smith , 1978)*
Élagage et nettoiement de la forêt	0,71	*(Rasolofoson et al., 2015)*
Aménagement de la forêt	0,71	*(Rasolofoson et al., 2015)*
Reboisement	0,6	*(Chafik, 2012)*
Plantation d'olivier	0,6	*(Karydas et al., 2009)*
Périmètres des DRS forestières ou fruitières	0,5	*Projet MOR/93/010 in (Qaini, 2013)*
Reforestation (régénération)	0,41	*(Baja et al., 2014)*
Cordons en pierres sèches	0,38	*(Panagos et al., 2015)*
	0,35	*(Collinet et al. 2001)*
Aménagement sylvopastoral (ASP)	0, 4	*(Kartic Kumar et al., 2014)*
Végétalisation des berges	0,3	*(William , 2011)*
Clôture	0,25	*(Mati et al., 2000)*

I.1. Érosivité des pluies (R)

La carte de répartition du facteur R dans le bassin versant Allal Al Fassi montre que 57.96% de sa superficie totale enregistre une érosivité faible (89.98 – 99.81) à très faible (81,20 – 89,98). L'érosivité moyenne (99,81–109,55) s'étale sur 12,47% de la superficie du bassin versant. Les classes d'érosivité forte (109,55 – 131,53) et très forte (131,53 –180,20) n'occupent que 29,57% (Figure 86).

La carte montre que l'érosivité des pluies a tendance à augmenter du centre du bassin versant vers le Nord Est, le Sud-Ouest et le centre ouest, ceci ne pourrait être expliqué que par l'irrégularité des pluies pendant l'année, concentrées et agressives.

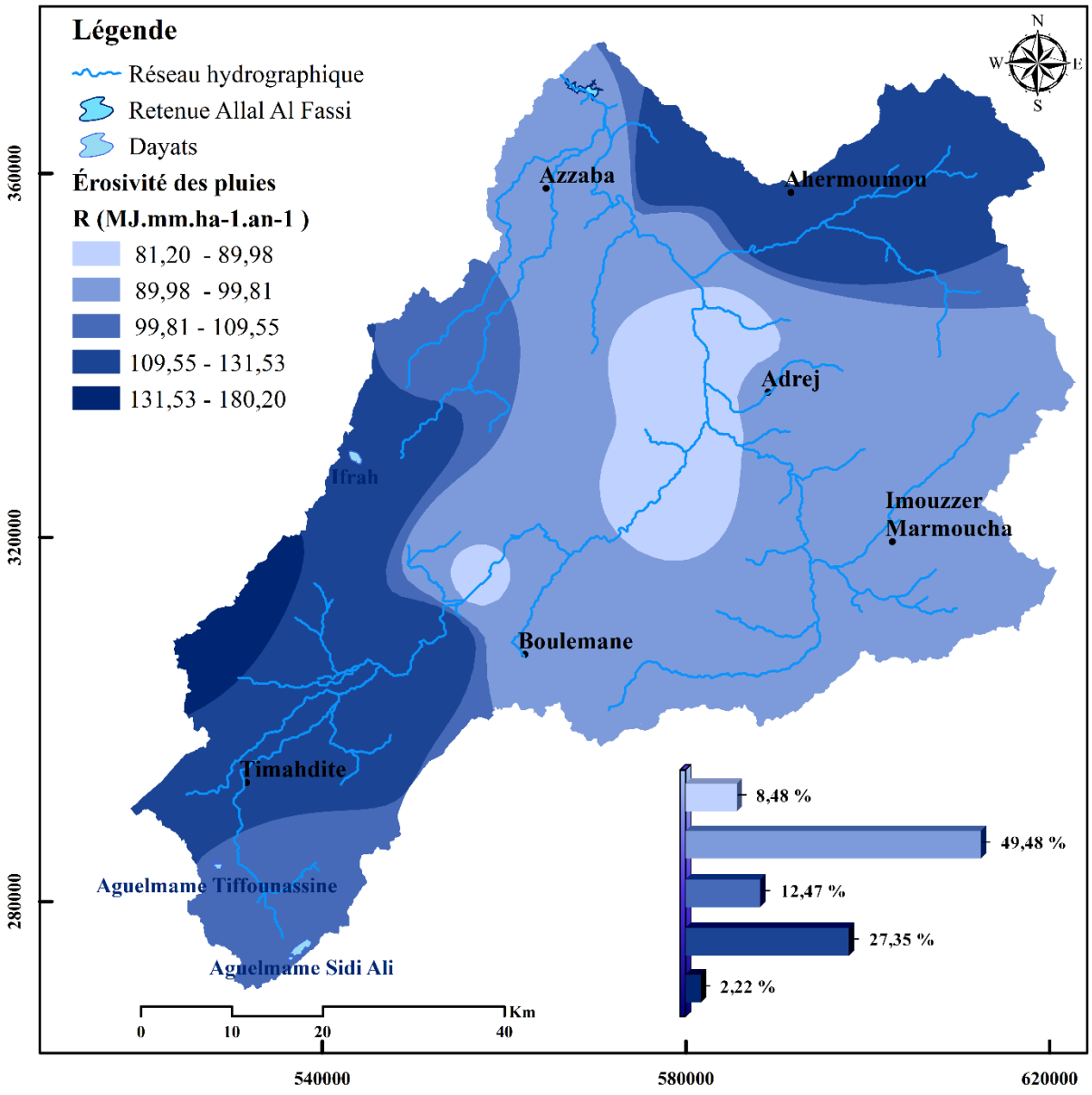


Figure 86 : Carte d'érosivité R du bassin versant Allal Al Fassi

I.2. Érodibilité (K)

Le facteur K exprime la susceptibilité du sol aux détachement et transport des particules. Dans le bassin versant Allal Al Fassi, il varie entre 0,00 et 0,38, où 0 correspond aux sols les moins susceptibles à l'érosion et la valeur de 0,38 réfère aux sols très sensibles à l'érosion hydrique.

La répartition de l'érodibilité dans le bassin versant Allal Al Fassi montre que 22,33% de la superficie totale du bassin versant enregistre une érodibilité faible (0,051-0,185), 42,17% enregistre une érodibilité moyenne (0,185 - 0,278). 34,42% de la totalité du bassin versant présente une érodibilité forte (0,278 - 0,316) à très forte (0,316 - 0,380) (Figure 87). L'érodibilité est faible pour les sols les plus structurés et plus évolués, notamment les vertisols, les sesquioxydes et les calcimagnésiques, alors que l'érodibilité la plus forte est enregistrée pour les sols les moins développés et les non structurés à savoir les sols à minéraux bruts, les sols peu évolués et les complexes C2 et C3.

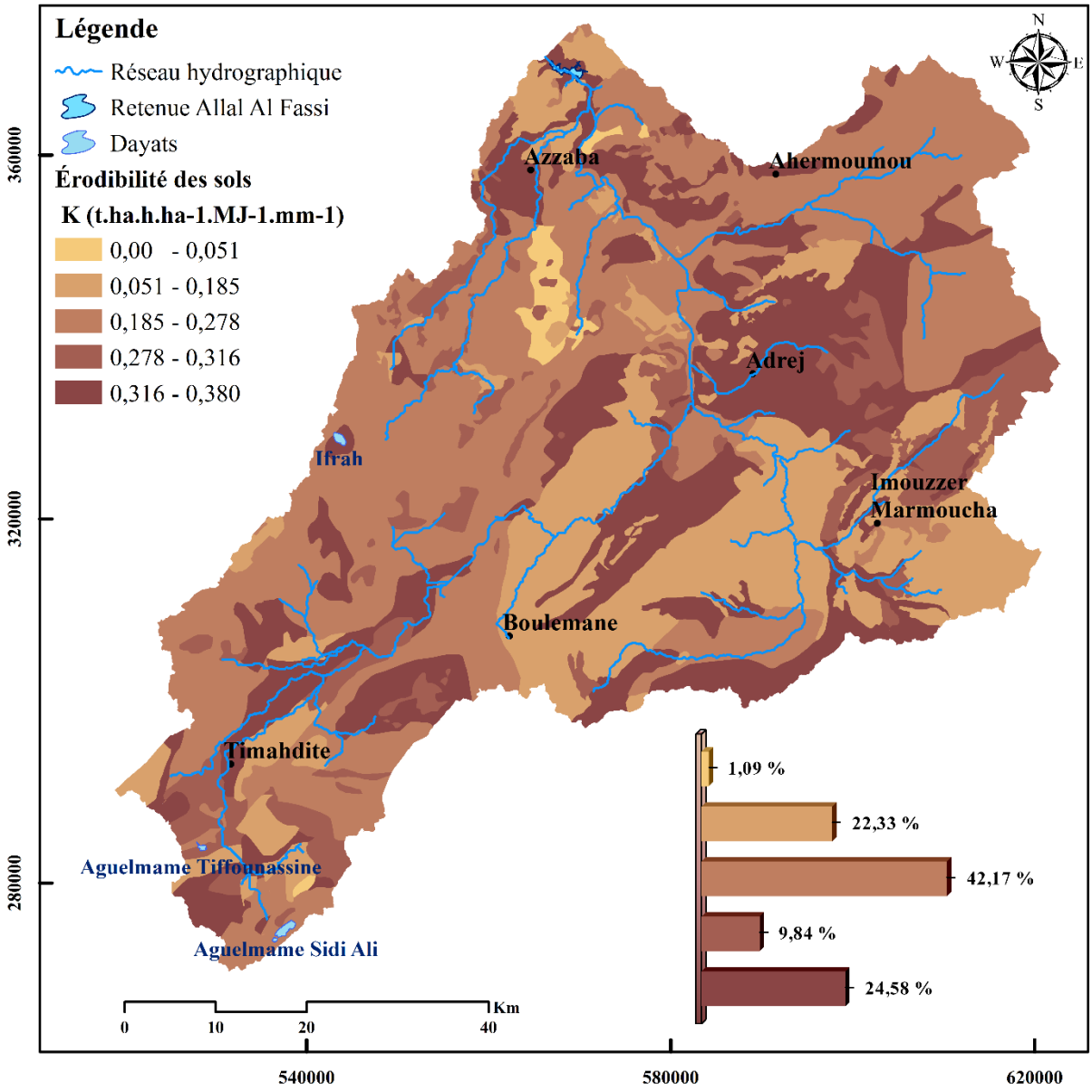


Figure 87 : Carte de l'érodibilité K du bassin versant Allal Al Fassi

I.3. Longueur et degré de pente (LS)

Le facteur LS dans le bassin versant Allal Al Fassi varie entre 0,023 et 237,959. Sa répartition montre que 49,24% de la superficie totale du bassin versant représente la classe très faible (0,023 – 3,770) e 31.4% représente la classe faible (3,770 – 9,391). Les classes moyenne (9,391 – 16,885), forte (16,885 – 70,280) et très forte (70,280 – 237,959) représentent 19,36% de la superficie totale du bassin versant (Figure 88).

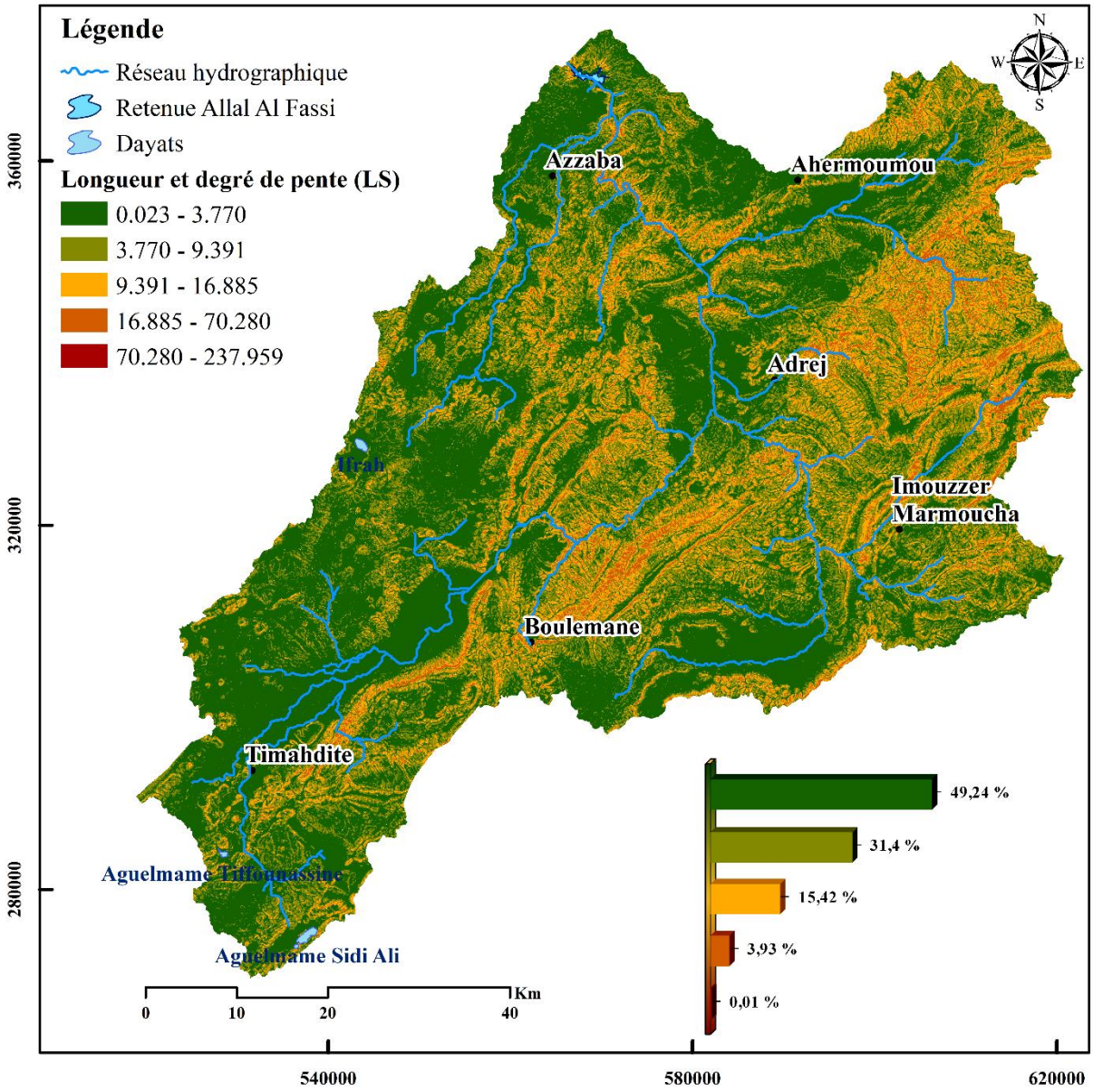


Figure 88: Carte de longueur et degré de pente LS du bassin versant Allal Al Fassi

Les 80,64% de la superficie du bassin versant enregistrent un facteur LS faible à très faible, localisés principalement dans le Causse moyen atlasique et correspondent aux dépressions et cuvettes inter-rides du Moyen Atlas plissé, contre 19,36% de sa superficie ayant un facteur LS

modéré à très fort localisés essentiellement dans le Moyen Atlas plissé et correspondent aux rides.

I.4. Conservation des sols (C)

Le facteur C est un rapport entre l'érosion d'un sol nu et l'érosion d'un sol sous un système de production *(Roose, 1994)*. Il est négligeable pour un sol bien couvert toute l'année même avec une forte pente et d'intenses précipitations, et d'une valeur de 1 pour un sol nu. Etant donné que l'énergie cinétique des gouttes de pluie peut être à l'origine de l'érosion des sols, la couverture végétale peut réduire les risques de l'érosion et du ruissellement en protégeant la surface du sol. La carte de répartition du facteur C dans le bassin versant Allal Al Fassi montre que la classe médiane (0.642 – 0.733) est la classe dominante avec 39.02% de la superficie totale du bassin versant et correspond aux zones occupées par des matorrals et steppes, suivie par la classe forte (0.733 – 0.976) avec 33.97% qui concorde avec des terrains agricoles et sols nus. Les classes faible (0.512 – 0.642) et très faible (0.022 – 0.512) représentent 26.9 % de la superficie totale du bassin versant et correspondent aux terres occupées par les forêts denses, moyennement denses et claires (Figure 89).

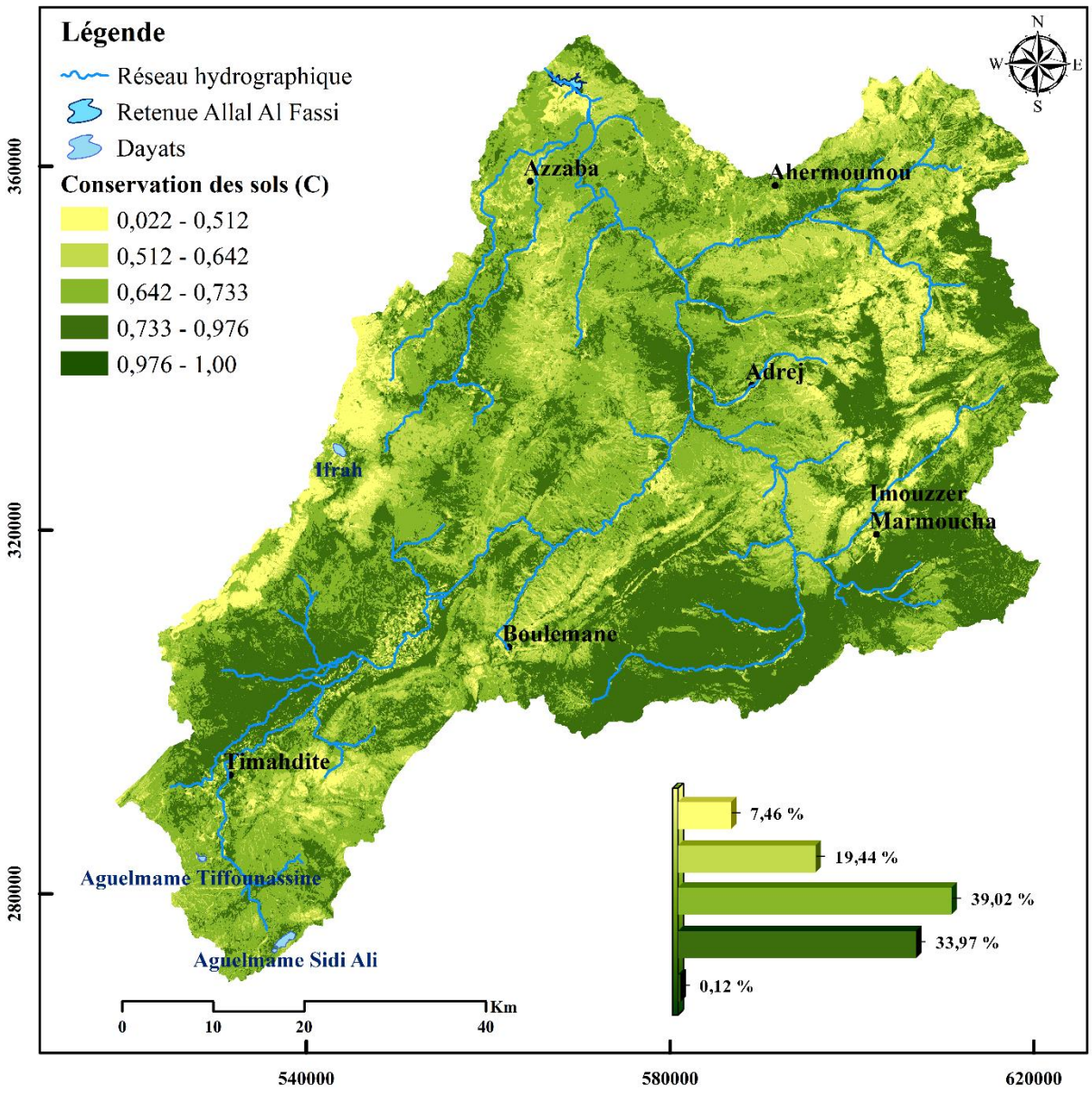


Figure 89 : Carte de conservation des sols C du bassin versant Allal Al Fassi

I.5. Pratiques antiérosives (P)

La répartition du facteur des pratiques antiérosives P dans le bassin versant Allal Al Fassi montre que la classe dominante est la classe très forte (0,71 – 1,00) qui représente l'absence d'aménagement et/ou des pratiques non durables et couvre 63,99% de la superficie totale suivie de la classe forte qui représente 32,56% (Figure 90). La classe qui est attribuée aux aménagements de conservation les plus efficaces (0.1 – 0.2) ne représente que 0.16% de la superficie du bassin versant.

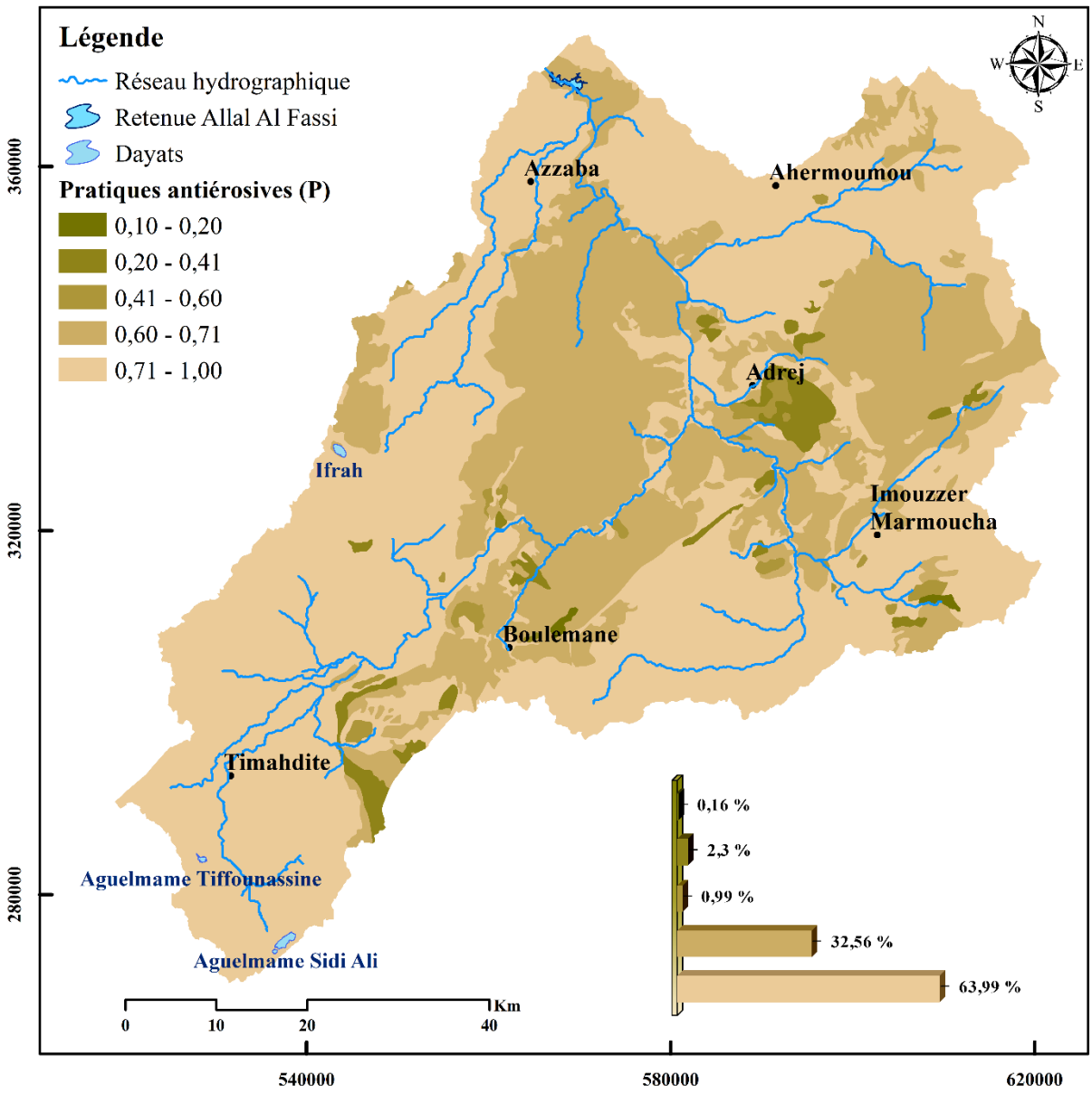


Figure 90 : Carte des pratiques antiérosives P du bassin versant Allal Al Fassi

I.6. Pertes en sols (Y)

La carte des pertes en sols est le résultat de la multiplication des cinq facteurs, érosivité des pluies (R), érodibilité (K), longueur et degré de pente (LS), conservation des sols (C) et pratiques antiérosives (P). Elle est réalisée selon l'équation 32 *(Renard et al., 1997 ; El Kamel et al., 2020a)* moyennant les outils d'analyse spatiale ArcGIS.

La quantification des pertes en sols Y dans le bassin versant Allal Al Fassi par le modèle RUSLE montre qu'elles varient entre 3,57 et 3521,07 t. $ha^{-1}.an^{-1}$. La carte des pertes en sols montre que la classe des pertes très faible est dominante avec 35,89% de la superficie totale du bassin versant et correspond aux zones à facteurs d'érosivité, de longueur et degré de pente et

d’érodibilité faibles à très faibles, de pratiques antiérosives faibles et de conservation des sol forte, suivie de la classe des fortes pertes représentant 32,07% de la superficie totale du bassin versant. Les classes des pertes en sols forte et très forte, représentent 14,69% de la superficie totale du bassin versant ; elles correspondent aux zones où les sols sont à forte érodibilité, faible conservation, forts degré et longueur de pente et absence des pratiques antiérosives (Figure 91).

Les pertes en sols sont plus importantes en amont, principalement dans la partie est du bassin versant, là où les pentes sont fortes et longues ; les sols sont fortement érodibles avec peu ou pas d’aménagements et malgré une conservation très variable et une érosivité très faible à faible.

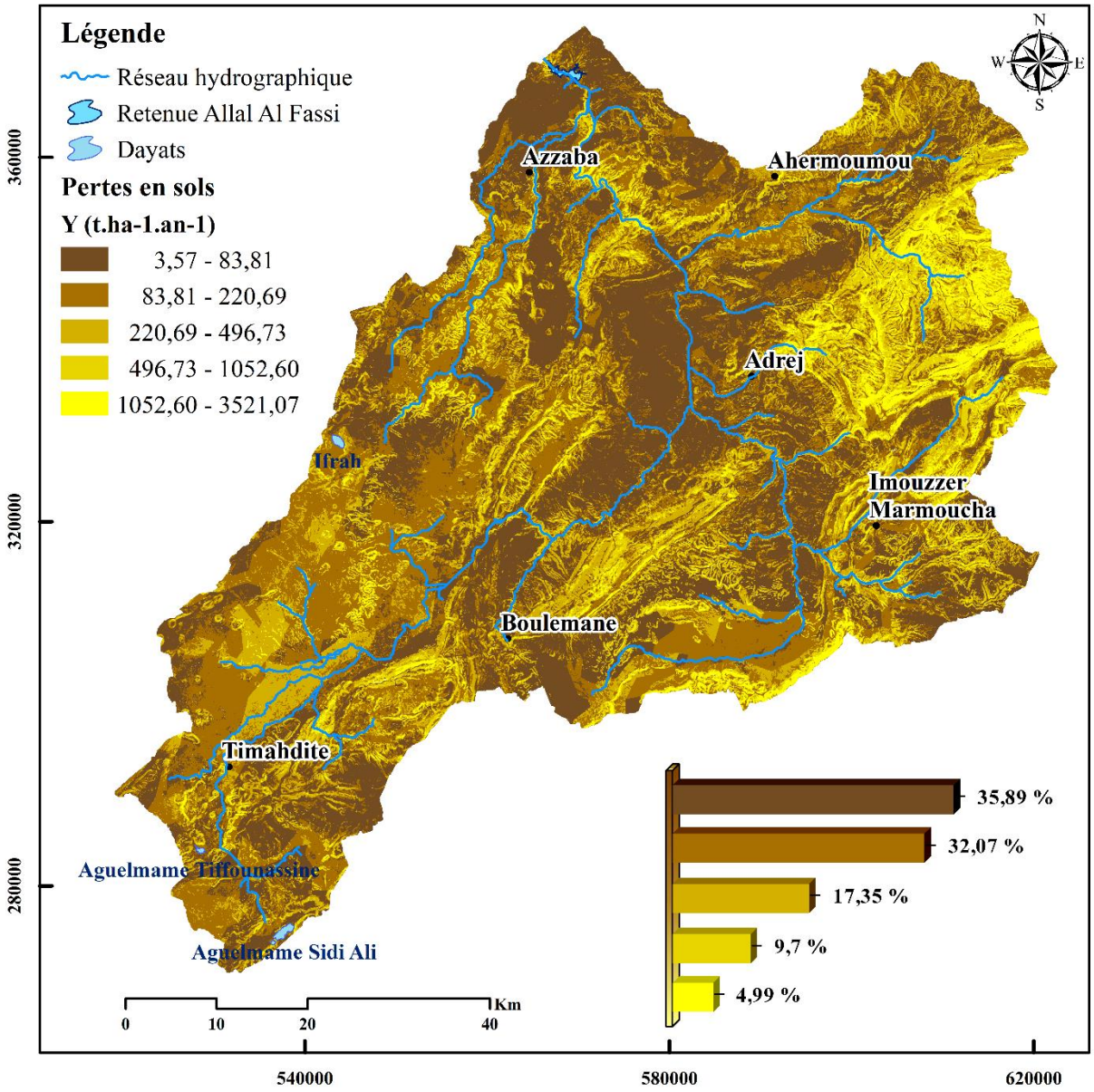


Figure 91 : Carte des pertes en sols Y du bassin versant Allal Al Fassi

L’analyse de la distribution des fréquences des pertes en sols montre que le bassin versant Allal Al Fassi perd en moyenne 624,07 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (Figure 92). La moyenne étant la moyenne arithmétique d'une série, elle est calculée en additionnant toutes les valeurs et en divisant la somme par le nombre total de valeurs, n’excluant pas les valeurs aberrantes. La médiane à l’instar de la moyenne représente la position de la distribution dans l’espace des nombres réels, elle sépare la série en deux moitiés.

La médiane des pertes en sols est égale à 335,48 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, ce qui veut dire que la moitié des pertes en sols est inférieure à 335,48 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, en négligeant les valeurs aberrantes qui peuvent fausser l’interprétation.

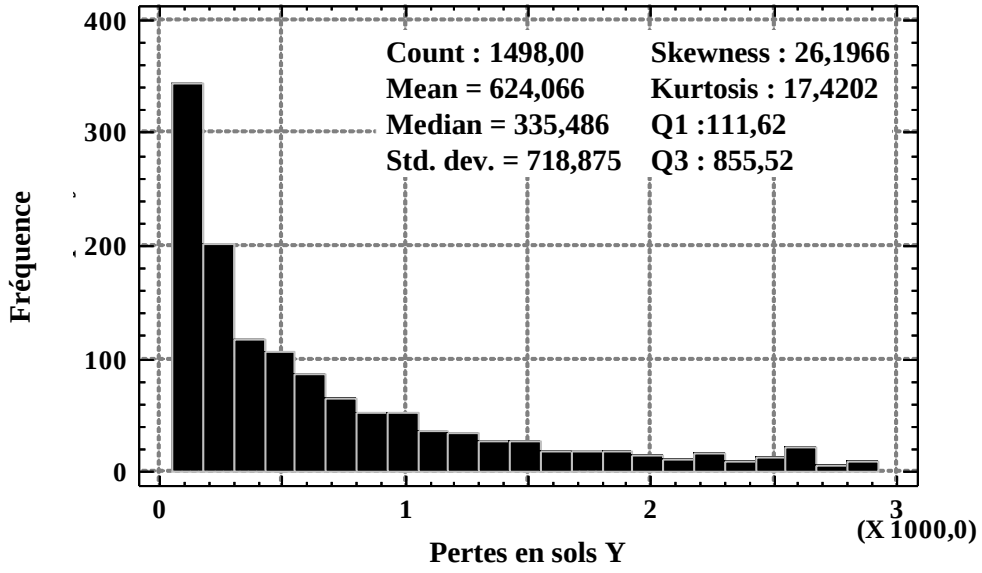


Figure 92: Diagramme de distribution de fréquence des pertes en sols dans le bassin versant Allal Al Fassi

II. Statistiques multivariées

Les résultats obtenus par la quantification des pertes en sols dans le bassin versant Allal Al Fassi par le modèle RUSLE ont été combinés aux données de terrain et aux analyses physico-chimiques réalisées au laboratoire et traitées à l’aide de Microsoft Office Excel 2016. Les analyses statistiques de la base de données ont été réalisées à l’aide du programme StatGraphics Centurion 18. Elles comprennent l’analyse de la variance ANOVA, l’indice de corrélation de Pearson r, la régression R^2 et l’analyse en composantes principales ACP.

En utilisant des matrices de corrélation et des relations linéaires simples, à l’aide de l’indice de corrélation de Pearson et de l’analyse de la variance, les relations entre les pertes en sols, les facteurs causaux (érosivité des pluies R, érodibilité K, degré et longueur de pente LS,

conservation des sols C, pratiques antiérosives P), les variables biogéographiques (occupation des sols, type de sols et lithologie) et les paramètres physico-chimiques des sols (densité, taux de matière organique, pourcentage de la fraction fine, des sables, des silts et des argiles) sont établies. Ainsi l'analyse en composantes principales en utilisant la méthode du carré le plus proche, le carré euclidien, est utilisée pour réduire le nombre de facteurs et regrouper les variables précédemment normalisées.

Enfin des modèles de régression simple et multiple ont été appliqués pour modéliser la relation entre les pertes en sols et les facteurs causaux, les paramètres physicochimiques et les variables biogéographiques. La régression simple qui ajuste des modèles linéaires et non linéaires pour une variable prédictrice et la régression multiple ajuste des modèles linéaires pour deux variables prédictrices ou plus.

II.1. Pertes en sols en fonction des facteurs causaux

Les statistiques sommaires des facteurs causaux avec les pertes en sols sont représentées dans le tableau 53. Les pertes en sols Y moyennes sont de 624,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$ avec un très vaste intervalle de variation (3,58 - 3521,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$). L'érodibilité K varie entre 0,03 et 0,33 $t.ha.h.ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$ avec une moyenne de 0,22. Le facteur LS présente une moyenne de 79,28. Le facteur C varie entre 0,31 et 0,95 avec une moyenne de 0,65. L'érosivité R moyenne est de 90,37 $MJ\ mm\ .ha^{-1}.an^{-1}$ avec un large intervalle de variation (40,60 - 134,74). Le facteur des pratiques antiérosives P varie entre 0,25 et 0,86 avec une moyenne de 0,63.

Tableau 53: Statistiques sommaires des pertes en sols et facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi

	Pertes en sols et facteurs causaux					
	Y	**K**	**LS**	**C**	**R**	**P**
Nombre	1498,00	1498,00	1498,00	1498,00	1498,00	1498,00
Moyenne	624,07	0,22	79,28	0,65	90,37	0,63
Standard déviation	718,88	0,10	62,85	0,22	29,89	0,21
Coeff. de variation	1,15	0,43	0,79	0,34	0,33	0,34
Minimum	3,58	0,03	9,61	0,31	40,60	0,25
Maximum	3521,07	0,33	197,33	0,95	134,74	0,86

II.1.1. Coefficient de corrélation de Pearson r

L'examen des relations entre les pertes en sols Y et les facteurs causaux, réalisé par le coefficient de corrélation de Pearson r montre principalement des corrélations linéaires

positives presque parfaites avec la longueur et degré de pente (r = 0,59) et relativement faible dans l'ordre avec l'érodibilité (r = 0,33) et les pratiques antiérosives (r = 0,30) (Figure 93). Ces corrélations montrent que les facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi sont la topographie LS, l'érodibilité K et les pratiques antiérosives P.

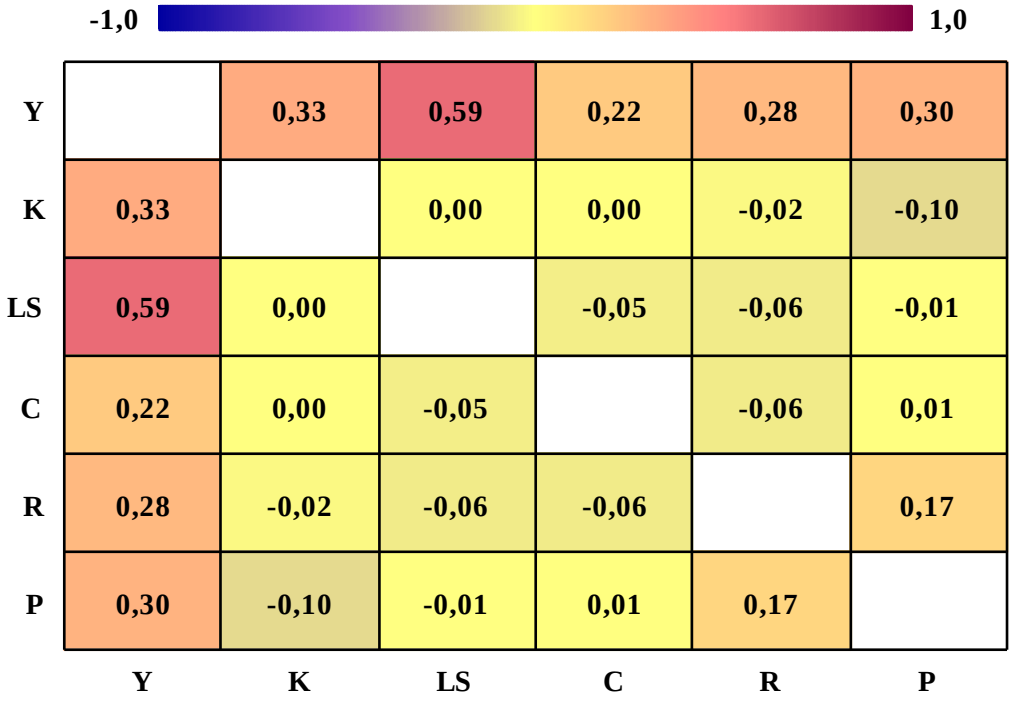


Figure 93: Matrice de corrélation des pertes en sols et facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi

II.1.2. Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de la variance ANOVA témoigne que la classe la plus influente de l'érodibilité K est la classe très forte (0,31 – 0,38) avec une moyenne de 862,14 $t.ha^{-1}.an^{-1}$, celle de l'érosivité R est la classe très forte (131,53 – 180,20) avec une moyenne de 998,34 $t.\ ha^{-1}.an^{-1}$ et celle des pratiques antiérosives P est la classe (0,71 – 1,0) avec une moyenne de 873,53 $t.\ ha^{-1}.an^{-1}$. La classe la plus influente de la longueur et degré de pente est la classe forte (87,15 – 159,78) qui enregistre la moyenne la plus élevée avec 1156,16 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (Figure 94).

Les tests ont été réalisés avec une probabilité de 0.05 et au niveau de confiance de 95.0 %.

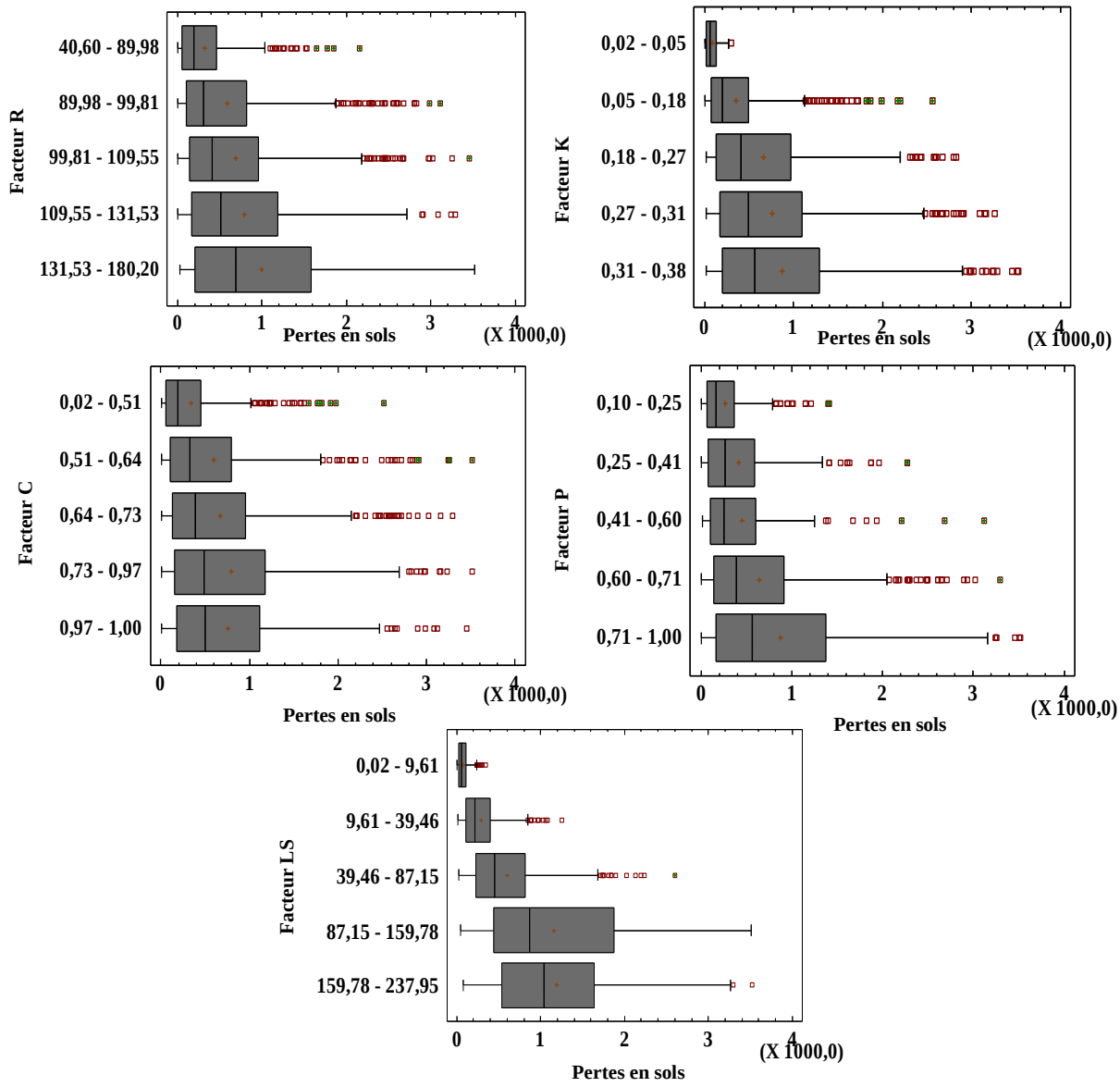


Figure 94: Résultats de l'analyse de la variance ANOVA des pertes en sols et facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi

Le tableau 12 vise à déterminer les moyennes significativement différentes les unes des autres et l'homogénéité des groupes de classes influençant les pertes en sols, en utilisant la colonne des « X ». Dans chaque colonne, les niveaux contenant la même forme de X, forment un groupe de moyennes dans lequel il n'y pas de différences statistiquement significatives. Les tests ont été réalisés avec une probabilité de 0,05 et au niveau de confiance de 95,0%.

Pour les cinq facteurs (l'érosivité R, l'érodibilité des sols K, la longueur et degré de pente LS, la conservation des sols C et les pratiques antiérosives P) quatre groupes homogènes sont identifiés.

Tableau 54: Analyse des moyennes de la variance et de l'homogénéité des groupes

Facteur K	Nombre	Moyenne	Groupes homogènes
0,026 - 0,051	84	82,8867	X
0,051 - 0,185	426	355,095	X
0,185 - 0,271	195	656,919	X
0,271 - 0,316	354	762,813	X
0,316 - 0,380	**439**	**862,149**	X
Facteur R			
40,600 - 89,980	339	324,196	X
89,980 - 99,810	454	586,762	X
99,810 - 109,550	335	694,532	X
109,550 - 131,530	213	794,134	X
131,530 - 180,200	**157**	**998,342**	X
Facteur P			
0,100 - 0,250	199	262,36	X
0,250 - 0,410	208	409,661	X
0,410 - 0,600	125	445,255	X
0,600 - 0,710	423	632,262	X
0,710 - 1,000	**543**	**873,533**	X
Facteur C			
0,022 - 0,512	332	342,91	X
0,512 - 0,642	309	591,501	X
0,642 - 0,733	305	675,944	XX
0,976 - 1,000	251	761,758	XX
0,733 - 0,976	**301**	**800,223**	X
Facteur LS			
0,023 - 9,610	335	79,958	X
9,610 - 39,465	318	291,91	X
34,734 - 87,153	304	599,742	X
87,153 - 159,783	325	1156,16	X
159,783 - 237,959	**216**	**1190,58**	X

II.1.3. Régression linéaire R^2

Le modèle de régression linéaire multiple qui relie les pertes en sols aux cinq facteurs indépendants (érosivité des pluies, érodibilité, degré et longueur de pente, conservation des sols et pratiques antiérosives) est ajusté à l'équation 40, selon laquelle le rapport entre les valeurs observées et les valeurs prédites du modèle de régression, est établi (Figure 95).

La figura 95 présente le graphique des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites du modèle de régression selon l'équation 40.

$$\boldsymbol{Y = -2366,75 + 2761,27 * K + 6,87 * R + 999,99 * P + 861,03 * C + 7,08 * LS} \quad (40)$$

La régression linéaire R^2 montre que le modèle explique 71,36% de la variabilité des pertes en sols Y. Comme la P-valeur est inférieure à 0,05, ce terme est statistiquement significatif au niveau de confiance de 95,0%.

La régression des pertes en sols avec la longueur et degré de pente LS enregistre le pourcentage le plus élevé avec 35% suivi de 11,17% de l'érodibilité K par rapport aux autres facteurs pour qui le pourcentage ne dépasse pas 10%.

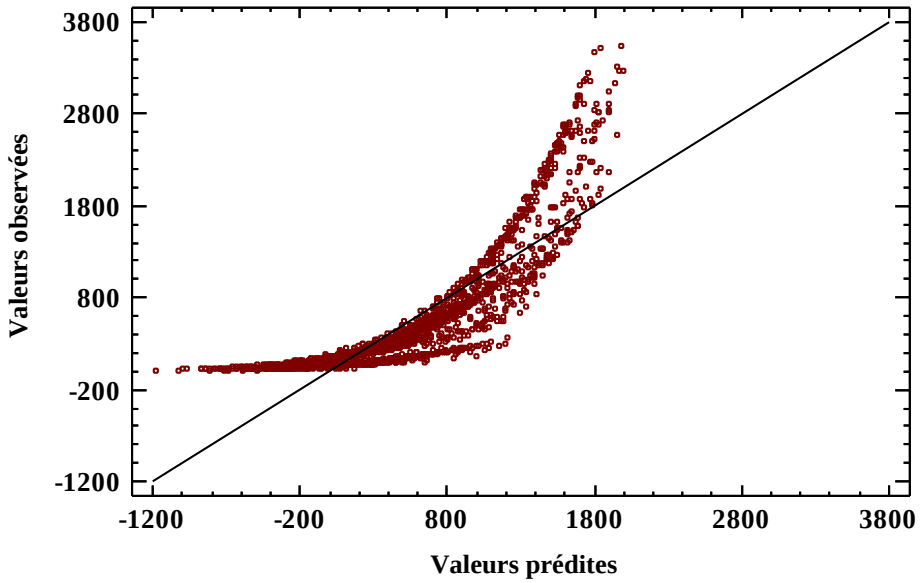


Figure 95: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sols et des facteurs causaux du bassin versant Allal Al Fassi

Afin de décrire la relation entre les pertes en sols Y et les cinq facteurs causaux (R, K, LS, C, P), les résultats de l'ajustement du modèle sont vérifiés (Figure 96).

Les équations des modèles ajustés pour décrire les relations entre les pertes en sols et l'érosivité R (**Y = 25,22 + 6,62 R**), avec une régression linéaire R^2 indiquant que le modèle explique 7,58% de la variabilité des pertes en sols Y, celles avec l'érodibilité K (**Y = 61,14 + 2503,46 K**) avec une valeur de R^2 montrant que le modèle représente 11,17% de la variabilité de Y et celles avec les pratiques antiérosives (**Y = -24.32 + 1028.15 P**), avec un R^2 indiquant que le modèle explique 9,25% de la variabilité des pertes en sols Y, présentent des coefficients de corrélation indiquant une relation relativement faible entre les variables, dans l'ordre, r=0,27, r=0,33 et r=0,30.

L'équation du modèle ajusté pour décrire la relation entre les pertes en sols et le facteur des pratiques antiérosives P est **Y = 90,89 + 6,72 LS**. La valeur de R^2 indique que le modèle explique 34,56% de la variabilité des pertes en sols Y avec un coefficient de corrélation r=0.58

indiquant une relation modérément forte entre les variables. Celle qui décrit la relation entre les pertes en sols et le facteur de conservation des sols C est **Y = 165,84 + 709,11 C**. La valeur de R^2 indique que le modèle explique 4,71% de la variabilité des pertes en sols Y et le coefficient de corrélation r=0.30 indiquant une relation faible entre les variables.

Les tendances des résultats ont des indications semblables entre l'érosivité R et les pertes en sols et la conservation des sols C et les pertes en sols et entre les pratiques antiérosives P et les pertes en sols et l'érodibilité K et les pertes en sols. Cependant les indications des pertes en sols et la longueur et degré de pente sont particulièrement uniques.

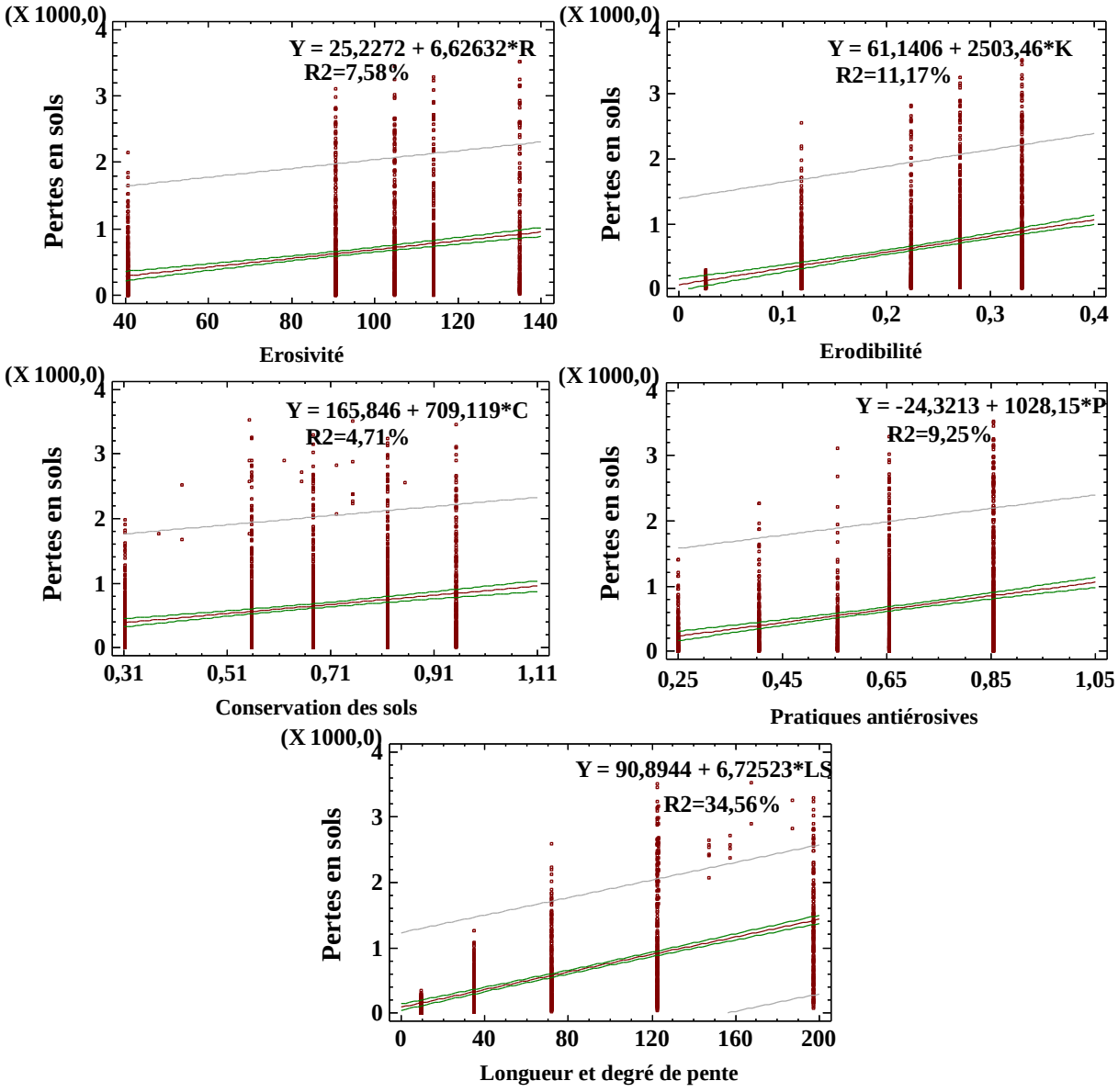


Figure 96: : Courbes de régression des pertes en sols et des facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi

Puisque la P-valeur est inférieure à 0,05, il existe une relation statistiquement significative entre les pertes en sols et les cinq facteurs causaux à un niveau de confiance de 96,0%.

II.1.4. Analyse en composantes principales ACP

L'application de l'analyse en composantes principales ACP a pour but de chercher un petit nombre de combinaisons linéaires des six variables qui expliquent la plus grande partie de la variabilité des données. Dans ce cas, les quatre composantes qui ont des valeurs propres supérieures ou égales à 1 ont été extraites. Elles représentent 84,25% de la variabilité des données d'origine (Figure 97).

Les équations des principales composantes (Tableau 55), dont la première composante principale à l'équation 41.

$$\mathbf{0,72 * Y + 0,26 * K + 0,5 * LS + 0,15 * C + 0,25 * R + 0,29 * P} \qquad (41)$$

Où les valeurs des variables sont normalisées en soustrayant leurs moyennes et en les divisant par leur écarts types.

Tableau 55: Tableaux des poids des composantes

	Composante			
	1	**2**	**3**	**4**
Y	0,72	-0,05	-0,05	0,00
K	0,26	-0,44	-0,17	0,72
LS	0,50	-0,31	0,45	-0,40
C	0,15	-0,13	-0,87	-0,33
R	0,25	0,58	0,00	0,42
P	0,29	0,60	-0,08	-0,16

Numéro de composante	Valeur propre	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
1	1,80	29,94	29,94
2	1,21	20,15	50,09
3	1,04	17,32	67,41
4	**1,01**	**16,85**	**84,25**
5	0,79	13,24	97,49
6	0,15	2,51	100,00

Le diagramme des composantes principales montre que l'intensité de la relation entre les pertes en sols et la longueur et degré de pente LS est très élevée suivie de la conservation des sols C et l'érodibilité K, contrairement à l'érosivité des pluies R et les pratiques antiérosives P qui se trouvent moins liées aux pertes en sols Y. L'érodibilité, la conservation des sols et la longueur et degré de pente s'avèrent bien liés (Figure 97).

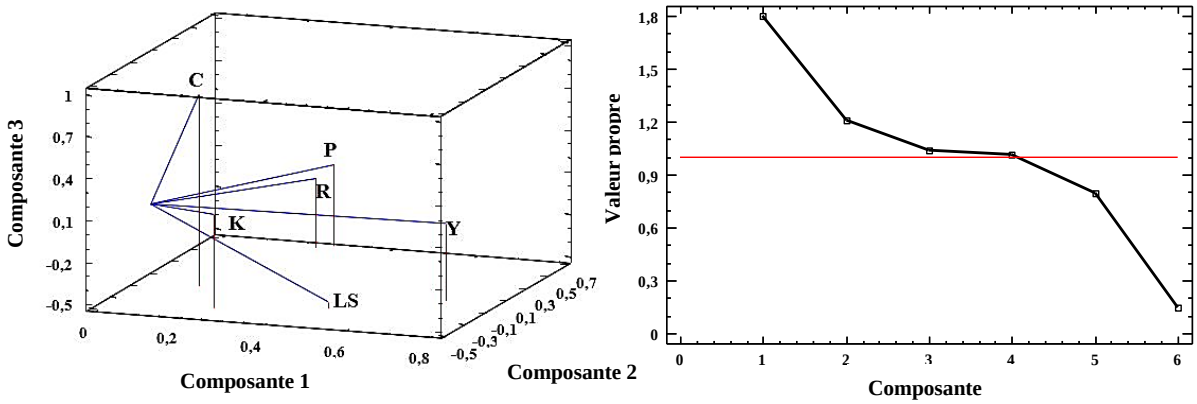


Figure 97: Diagramme des composantes principales et poids des variables

II.2.Pertes en sols en fonction des paramètres physico-chimiques

Les statistiques sommaires des propriétés physicochimiques de 134 échantillons et des pertes en sols sont représentées dans le tableau 56. La teneur moyenne de la fraction inférieure à 2mm est de 83,45%. La teneur moyenne de la fraction argileuse est de 25,94% bien qu'un large intervalle de variation soit enregistré (12,80 - 94,90%). La fraction sableuse est la plus faible avec une moyenne de 9%, tandis que la fraction silteuse est majoritaire avec une moyenne de 65,06%. Le pourcentage de la matière organique varie entre 0,02 et 5,09 avec une teneur moyenne de 1,90. La densité moyenne des sols est de 1,17 g/cm^3 avec un intervalle de variation entre 0,10 et 2,38.

Tableau 56: Statistiques sommaires des paramètres physicochimiques des sols du bassin versant Allal Al Fassi

	Y	F<2mm (%)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)	OM (%)	$CaCO_3$ (%)	Densité (g / cm^3)	pH	CE
Nombre	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00	134,00
Moy.	128,10	83,45	25,94	65,06	9,00	1,90	40,25	1,17	8,05	279,58
Déviation standard	79,11	13,93	9,93	9,75	7,40	1,07	13,16	0,42	0,50	168,72
Coeff. de variation	0,62	0,17	0,38	0,15	0,82	0,56	0,33	0,36	0,06	0,60
Minimum	12,93	35,33	12,80	3,00	0,10	0,02	14,81	0,10	7,09	114,00
Maximum	347,59	99,87	94,90	81,20	35,80	5,09	71,07	2,38	9,32	1296,00
Range	334,66	64,54	82,10	78,20	35,70	5,07	56,26	2,28	2,23	1182,00
Stnd. skewness	3,17	-3,94	14,67	-10,99	4,45	2,29	0,50	-2,47	1,64	16,58
Stnd. Kurtosis	1,19	0,15	40,22	27,57	0,47	-0,75	-1,76	1,71	-1,48	39,30

II.2.1. Coefficient de corrélation de Pearson r

La matrice de corrélation entre les pertes en sols Y et les propriétés physicochimiques, réalisée par le coefficient de corrélation de Pearson r, montre des corrélations linéaires relativement faibles, soit positives dans un ordre décroissant avec le pH (r=0,17), le pourcentage de matière organique (r=0,16), le pourcentage des argiles (r=0,13) et le pourcentage de la fraction fine inférieure à 2mm (r=0,11), soit négatives avec la conductivité (r=-0,25) et le pourcentage de sables (r=-0,16). La matrice de corrélation montre de très faibles corrélations entre les pertes en sols et le pourcentage des silts et la densité des sols (Figure 98).

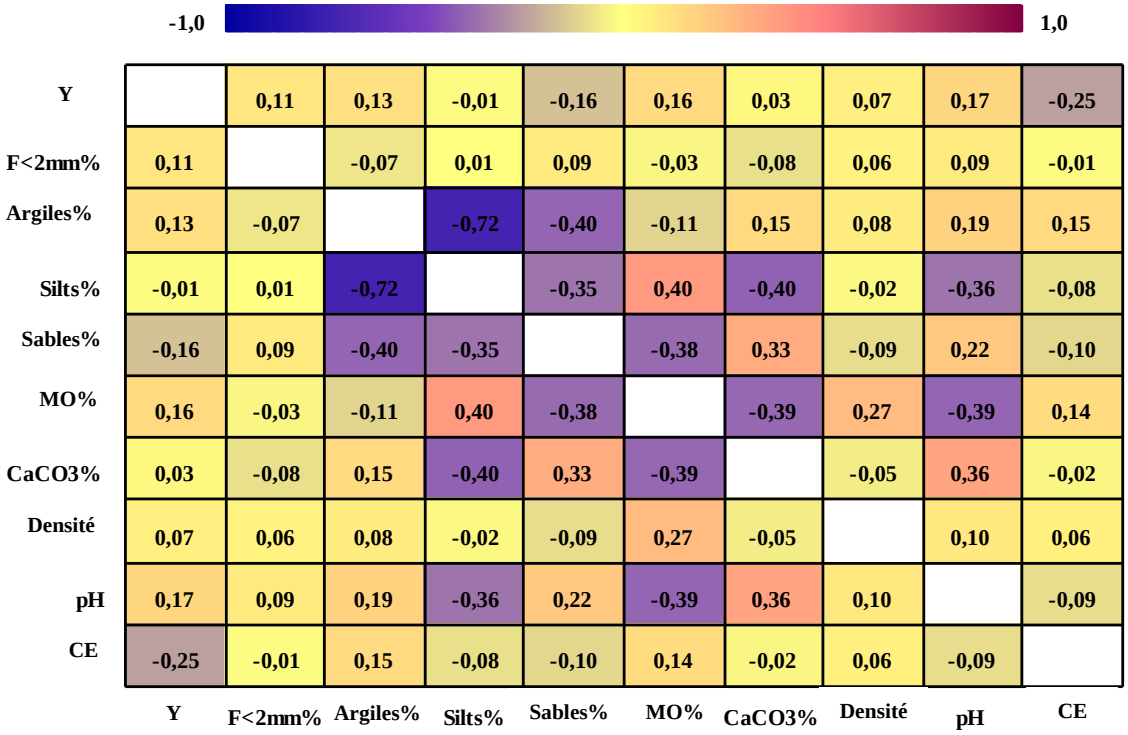


Figure 98: Matrice de corrélation des pertes en sols et paramètres physicochimiques

II.2.2. Analyse de la variance ANOVA

La figure 99 montre les résultats du test ANOVA des pertes en sols en fonction des paramètres physico-chimiques. L'analyse de la variance ANOVA montre que les pourcentages des silts et des argiles et le pH ont une incidence significative sur la variation des pertes en sols, alors que les autres paramètres (pourcentages de la fraction fine et de sables, taux de matière organique et de carbonates, densité et conductivité électrique) ne l'affectent pas significativement.

L'analyse de variance ANOVA témoigne que la classe la plus influente du pourcentage des argiles est la classe très forte (50 – 94,90) avec une moyenne de 154,72 t. $ha^{-1}.an^{-1}$. Pour le pH, il s'agit de la classe très forte (9,0 – 9,5) avec une moyenne de 192,15 t. $ha^{-1}.an^{-1}$. Celle du pourcentage des silts est la classe faible avec une moyenne de 154,42 t. $ha^{-1}.an^{-1}$. La classe la plus influente du pourcentage de la fraction fine est la classe forte (80 - 95) avec une moyenne de 144,00 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ et celle du pourcentage des sables est la classe forte (15 – 20) avec une moyenne de 129,79 t. $ha^{-1}.an^{-1}$. La classe la plus influente du taux de matière organique est la classe forte (2,4 – 3,2) qui enregistre la moyenne la plus élevée avec 159,79 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. Pour la conductivité électrique, il s'agit de la classe faible avec une moyenne de 164,85 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (Tableau 57).

Le tableau 57 montre que pour le pH, la conductivité électrique, la densité et les pourcentages de la fraction fine, des silts et des argiles, un seul groupe homogène est identifié par une colonne de X. Dans chaque colonne, les niveaux contenant X ne constituent pas des différences statistiquement significatives. Les pertes en sols les plus élevées sont enregistrées, respectivement, au niveau de la classe très forte (9,0 - 9,5) avec une moyenne de 192,15 t. $ha^{-1}.an^{-1}$(pH), la classe très faible (100 - 200) avec une moyenne de 164,85 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (CE), la classe modérée (1,1 - 1,6) avec une moyenne de 134,60 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (densité), la classe forte (80 - 95) avec une moyenne de 144,01 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (F<2mm), la classe faible (20 - 40) avec une moyenne de 175,31 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (% silts) et la classe très forte (50 - 94,90) avec une moyenne de 154,42 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ (% argiles).

Les pourcentages de la matière organique et des sables sont rassemblés en deux groupes homogènes. Les pertes en sols les plus élevées sont enregistrées pour le pourcentage de la matière organique au niveau des classes forte (2,4 – 3,2) avec une moyenne de 159,79 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. Pour le pourcentage des sables, il s'agit de la classe très faible (0 - 5) avec une moyenne de 151,27 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. Le pourcentage de $CaCO_3$ est regroupé en trois groupes homogènes. Les pertes en sols les plus élevées sont enregistrées au niveau des classes très fortes (62 - 71) avec une moyenne de 221,87 $t.ha^{-1}.an^{-1}$.

Le tableau 57 montre qu'un à trois groupes homogènes sont identifiés au niveau des paramètres physicochimiques, cela témoigne de l'hétérogénéité des pertes en sols dépendant des classes mises en jeu.

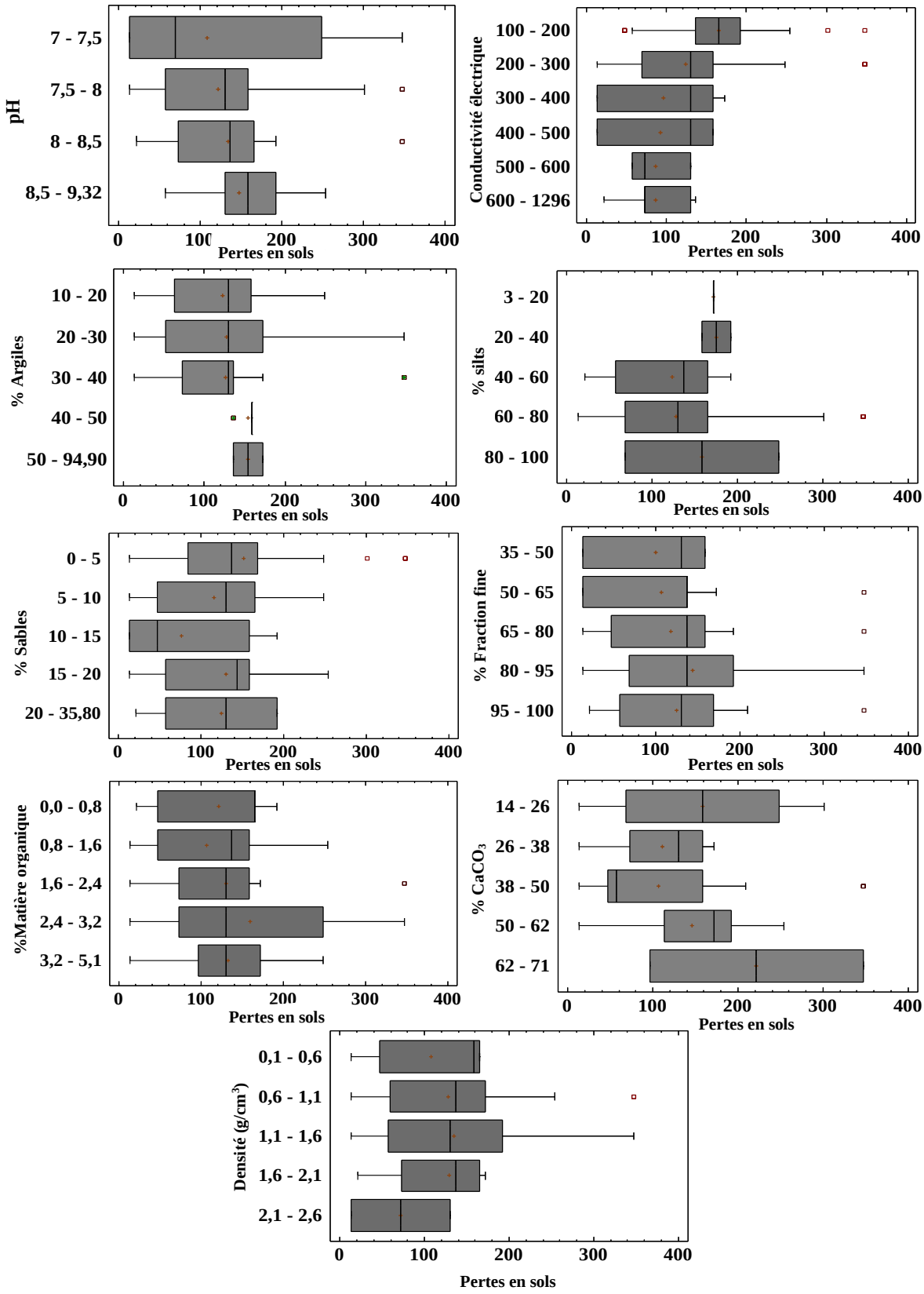


Figure 99: Résultats de l'analyse de la variance ANOVA entre les pertes en sols et les paramètres physico-chimiques

Tableau 57 : Analyse des moyennes de la variance et de l'homogénéité des groupes

F<2mm	Nombre	Moy.	Groupes homogènes
35 - 50	3	100,27	X
50 - 65	13	106,50	X
65 - 80	31	117,76	X
80 - 95	51	144,01	X
95 - 100	36	124,60	X
Agriles%			
10 - 20	32	122,75	X
30 - 40	19	125,95	X
20 -30	72	127,13	X
40 - 50	9	153,58	X
50 - 94,90	2	154,42	X
Silts%			
3 - 20	1	172,40	X
20 - 40	2	175,31	X
40 - 60	30	123,14	X
60 - 80	99	127,59	X
80 - 100	2	158,60	X
Sables%			
0 - 5	56	151,27	X
5 - 10	30	115,37	X
10 - 15	17	76,48	X
15 - 20	14	129,80	XX
20 - 35,80	17	124,48	XX
$CaCO_3$%			
14 - 26	22	158,68	X
26 - 38	36	110,65	XX
38 - 50	44	106,85	X
50 - 62	28	146,52	XX
62 - 71	4	221,88	X

MO%	Nombre	Moy.	Groupes homogènes
0,0 - 0,8	22	121,00	XX
0,8 - 1,6	41	106,49	X
1,6 - 2,4	27	130,46	XX
2,4 - 3,2	29	159,79	X
3,2 - 5,1	15	132,09	XX
pH			
7 - 7,5	21	110,73	X
7,5 - 8,0	46	120,59	X
8,0 - 8,5	37	132,06	X
8,5 - 9,0	26	139,96	X
9,0 - 9,5	4	192,15	X
CE			
100 - 200	39	164,85	X
200 - 300	61	124,32	X
300 - 400	19	95,64	X
400 - 500	7	91,94	X
500 - 1296	8	86,56	X
Densité			
0,1 - 0,6	17	107,48	X
0,6 - 1,1	32	128,55	X
1,1 - 1,6	68	134,60	X
1,6 - 2,1	15	128,63	X
2,1 - 2,6	2	71,47	X

II.2.3. Régression linéaire R^2

Le modèle de régression linéaire multiple qui relie les pertes en sols Y aux les facteurs physicochimiques (pH, EC, argiles%, silts%, sables%, OM%, $CaCO_3$% et la densité des sols) est ajusté à l'équation 42 selon laquelle le rapport entre les valeurs observées et les valeurs prédites du modèle de régression, est établi (Figure 100).

$$\boldsymbol{Y = 4986,06 + 0,53 * CaCO3\% + 22,86 * MO\% + 0,71 * F < 2mm\%}$$
$$\boldsymbol{-5,98\ Densité + 38,02 * pH - 0,13 * CE - 51,67 * Argiles\%}$$
$$\boldsymbol{- 52,53 * Silts\% - 53,91 * Sables\%} \qquad (42)$$

La régression linéaire R^2 montre que le modèle ajusté explique 20,73% de la variabilité des pertes en sols Y.

Pour savoir si le modèle peut être simplifié, on note que la P-valeur la plus élevée des variables indépendantes est 0,7128, appartenant à la densité des sols. Comme la P-valeur doit être inférieure à 0,05, ce terme n'est pas statistiquement significatif à un niveau de confiance de 95,0% ou plus. Par conséquent, la densité des sols est supprimée du modèle et l'équation de l'ajustement du modèle devient l'équation 43.

$$\boldsymbol{Y = 5095,31 + 0,53 * CaCO_3\% + 21,97 * MO\% + 0,70 * F < 2mm\% + 37 * pH \\ -0,13 * CE - 52,75 * Argiles\% - 53,58 * Silts\% - 54,98 * Sables\%} \quad \boldsymbol{(43)}$$

Comme la P-valeur est inférieure à 0,05, ce terme est statistiquement significatif au niveau de confiance de 95,0%.

L'équation 43 de l'ajustement du modèle montre que le poids le plus important est celui du pourcentage des sables suivi des pourcentages des silts et des argiles.

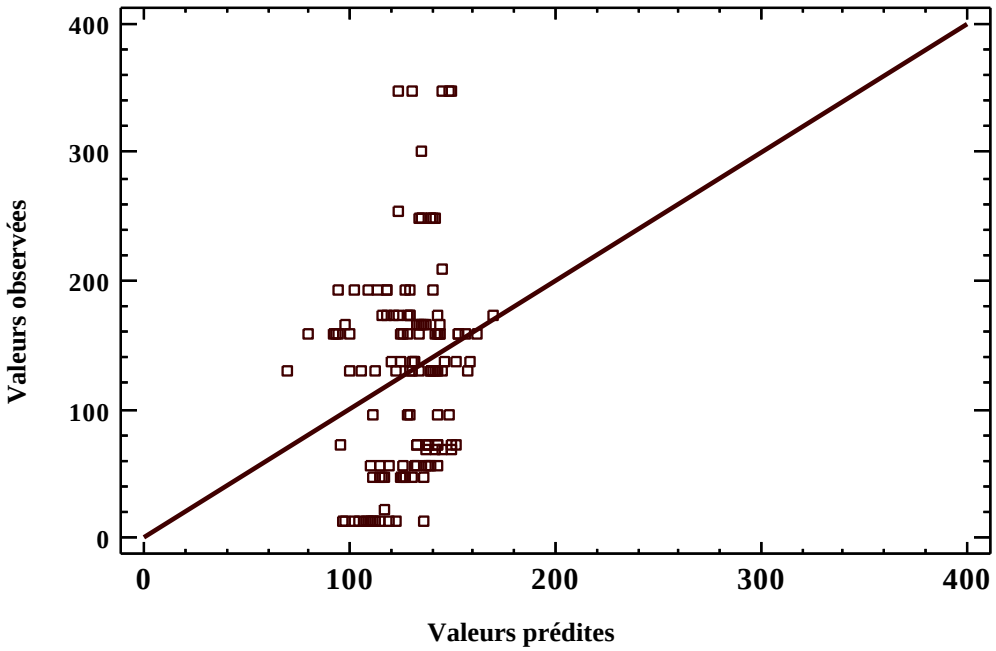


Figure 100: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sol et des paramètres physico-chimiques

L'ajustement du modèle afin de décrire la relation entre les pertes en sols et chaque facteur physicochimique (pH, CE, Argiles%, silts%, sable%, MO%, $CaCO_3$% et densité du sol) a abouti aux résultats suivant (Figure 101) :

L'équation du modèle ajusté qui décrit la relation entre les pertes en sols et la conductivité électrique EC est **Y = 160,25 – 0,11 CE** avec une régression R^2 qui indique que le modèle explique 6,01% de la variabilité des pertes en sols Y et un coefficient de corrélation indiquant une relation négative relativement faible entre les variables r=-0,25.

Les équations des modèles ajustés qui décrivent la relation entre les pertes en sols et le pH (**Y = 85,31 + 26.49 pH**), le pourcentage des argiles (**Y = 101,63 + 1,02 Argiles%**), le pourcentage des sables (**Y = 134,38 – 1,69 sables%),** le pourcentage de la fraction fine (**Y = 76,86 + 0,6 F<2mm)** et le pourcentage de la matière organique (**Y = 106,20 + 11,52 MO**), présentent un coefficient de corrélation indiquant une relation faible entre les variables, positive pour le pH (r=0.17), le pourcentage des argiles (r=0,13), le pourcentage de la fraction fine (r=0,11) et le pourcentage de la matière organique (r=0,16), et négative pour le pourcentage des sables (r=-0,16), dont les valeurs de la régression R^2 sont respectivement 2,82%, 1,64%, 1,16%, 2,41% et 2,52% de la variabilité des pertes en sols Y.

Pour le pourcentage des silts et la densité des sols, les équations des modèles ajustés pour décrire leur relation avec les pertes en sols (**Y = 133,35 + 0,08 silts%, Y = 112,05 + 13,67 densité),** présentent un coefficient de corrélation montrant une relation très faible entre les variables, négative pour le pourcentage des silts (r=-0,01) et positive pour la densité (r=0,07). Les valeurs de la régression R^2 sont respectivement 0,01% et 0,52%.

Puisque la P-valeur est inférieure à 0,05, il existe une relation statistiquement significative entre les pertes en sols et les cinq facteurs causaux à un niveau de confiance de 96,0%.

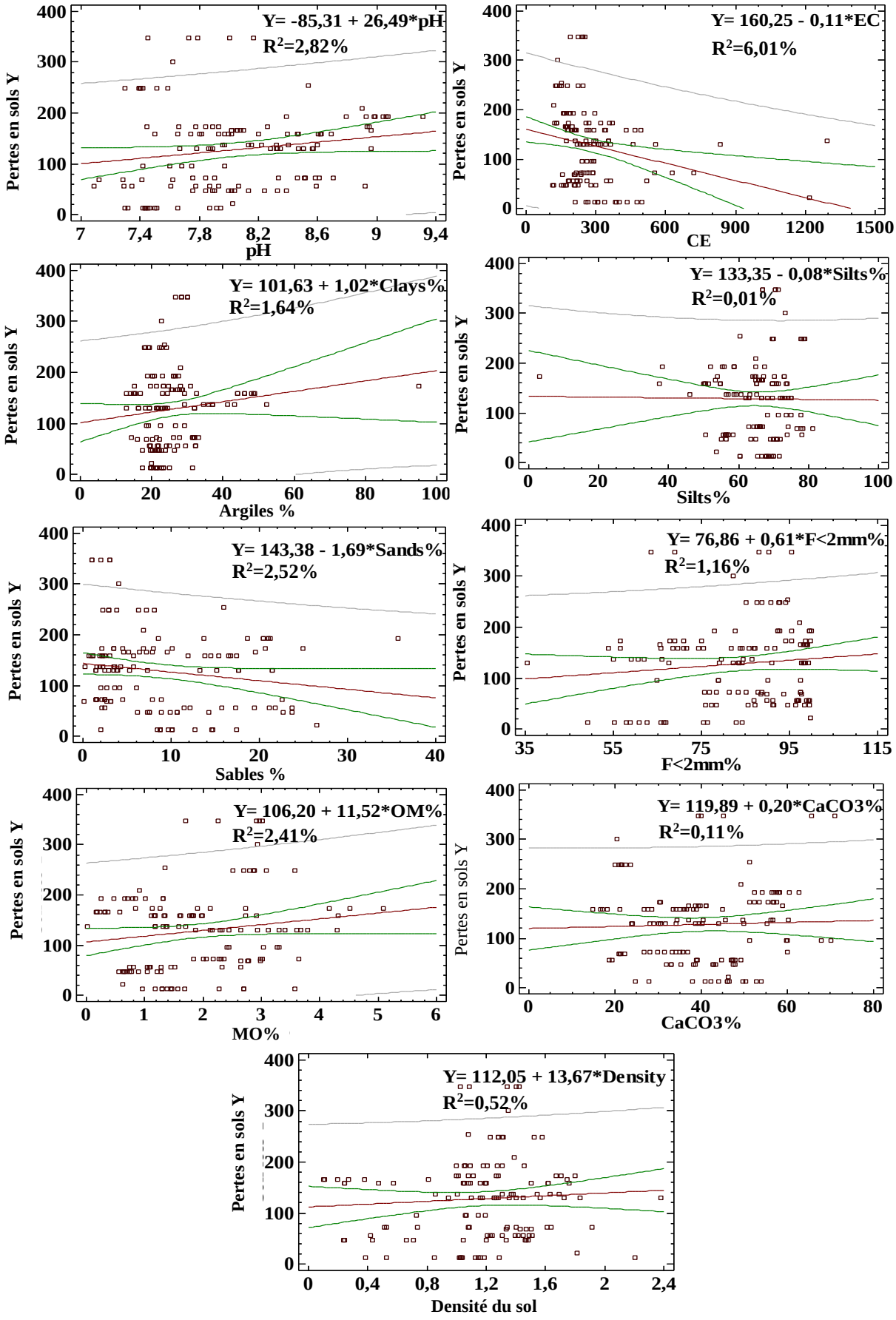


Figure 101: Courbes de régression des pertes en sols et des paramètres physico-chimiques

II.2.4. Analyse en composantes principales ACP

L'analyse des associations linéaires entre les pertes en sols et les facteurs physicochimiques a permis de les représenter dans un espace factoriel et d'interpréter leurs relations en dérivant une série de composantes regroupant les variables expliquant le mieux la variance, y compris les pertes en sols. Quatre composantes principales ont été extraites, avec une valeur propre supérieure ou égale à 1, ce qui explique 67,33% de la variabilité des données normalisées (Figure 102). La première composante explique 25,61% de la variation. Les variables les plus pondérées sont les pourcentages des silts, de la matière organique et du $CaCO_3$ et le pH (Tableau 16). Les corrélations sont négatives pour les pourcentages des silts, de la matière organique et du $CaCO_3$ (Equation 44).

$$\mathbf{0,006 * Y + 0,408 * pH - 0,040 * EC + 0,273 * Argiles\% - 0,514 * Silts\ (\%) + 0,309 * Sables\% + 0,433 * CaCO_3\% - 0,452 * MO\% + 0,010 * F < 2mm\% - 0,065 * Densité} \quad (44)$$

La deuxième composante qui explique 17,11% de la variabilité est liée aux fractions granulométriques, dans l'ordre, les pourcentages des argiles, des sables et des silts. La corrélation est négative pour le pourcentage des argiles. La troisième composante explique 13,55% de la variation et représentée par la conductivité électrique, le pourcentage de la fraction fine et le pH.

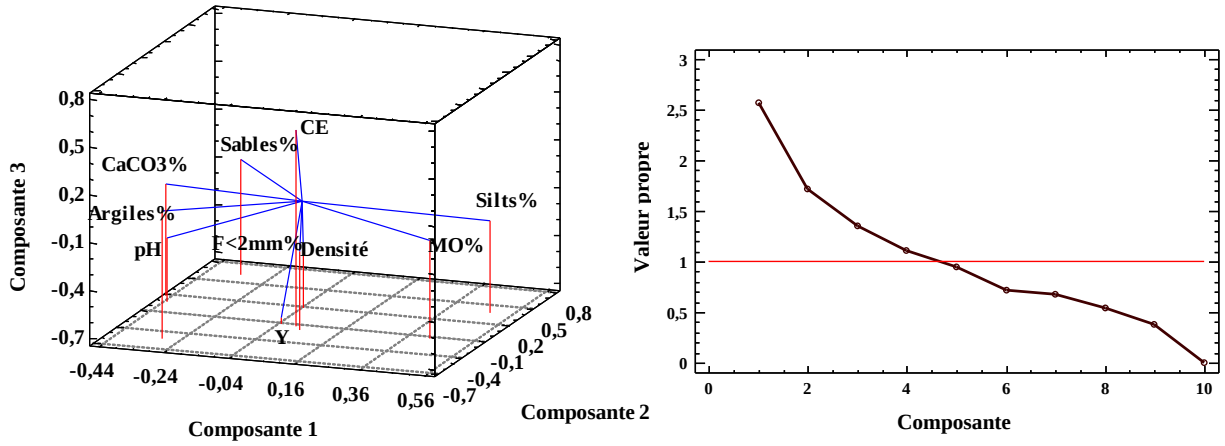


Figure 102: Diagramme des composantes principales et poids des variables

Tableau 58: Tableaux des poids des composantes

Numéro de composante	Valeur propre	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
1	2,56	25,61	25,61
2	1,71	17,11	42,72
3	1,35	13,55	56,26
4	**1,11**	**11,07**	**67,33**
5	0,95	9,47	76,80
6	0,72	7,20	84,00
7	0,68	6,78	90,78
8	0,54	5,42	96,19
9	0,38	3,81	100,00
10	0,00	0,00	100,00

	Composantes			
	1	**2**	**3**	**4**
Y	0,00	-0,22	-0,66	-0,20
pH	0,40	-0,02	-0,29	0,14
CE	-0,04	-0,23	0,53	0,41
Argiles (%)	0,27	-0,64	0,10	-0,15
Silts (%)	-0,51	0,26	-0,12	-0,05
Sables (%)	0,31	0,50	0,02	0,28
$CaCO_3$ (%)	0,43	0,07	0,00	-0,03
MO (%)	-0,45	-0,24	-0,08	0,14
F<2mm (%)	0,01	0,06	-0,33	0,53
Densité(g/cm3)	-0,06	-0,28	-0,21	0,58

II.3.Pertes en sols en fonction des variables biogéographiques

L'analyse de la variance entre les pertes en sols et l'occupation des sols montre que les pertes en sols sont importantes pour les matorrals suivis par les steppes (Figure 103). Les matorrals dans le bassin versant Allal Al Fassi occupent 24,71% de la superficie totale du bassin versant suivie par les steppes avec un pourcentage de 21,35% (Figure 104).

Les résultats du test ANOVA pour les pertes en sols et la lithologie montre que les pertes en sols sont très importantes dans les terrains à substrat dolomitique (Figure 103). Ce dernier, d'âge liasique prédomine dans le bassin versant Allal Al Fassi (Figure 105).

L'analyse de la variance des pertes en sols et les types de sols montre que les pertes en sols sont très importantes pour le Complexe C1 suivi par les minéraux bruts et les sols isohumiques (Figure 103).

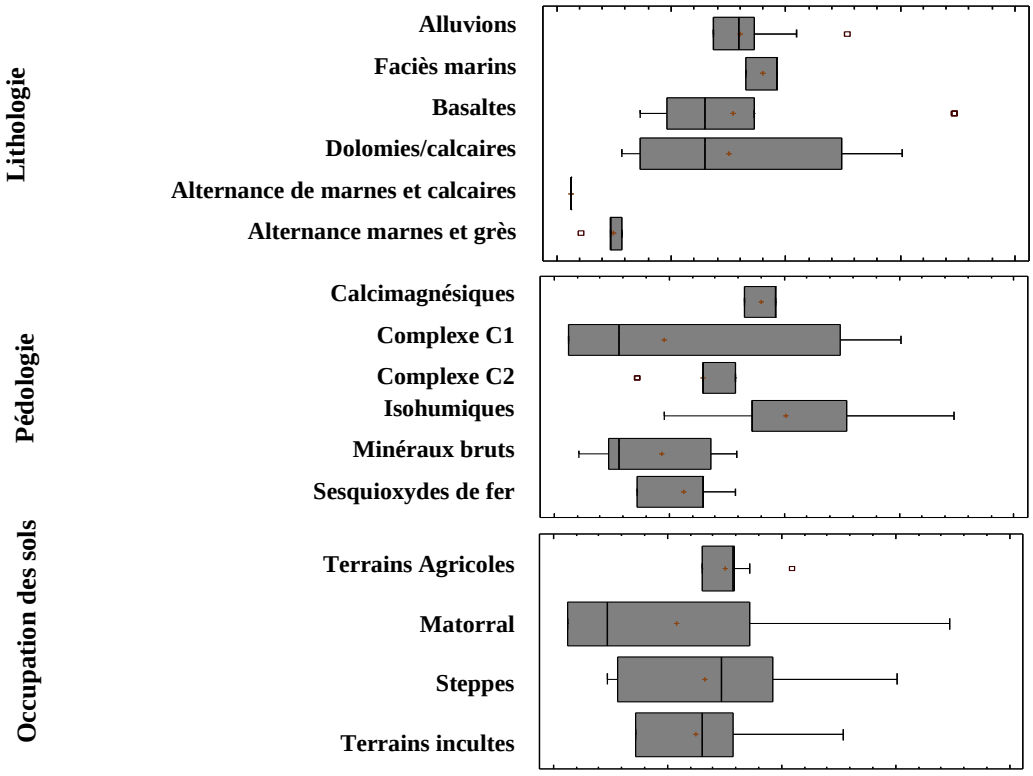


Figure 103: Résultats de l'analyse de la variance ANOVA entre les pertes et les variables biogéographiques

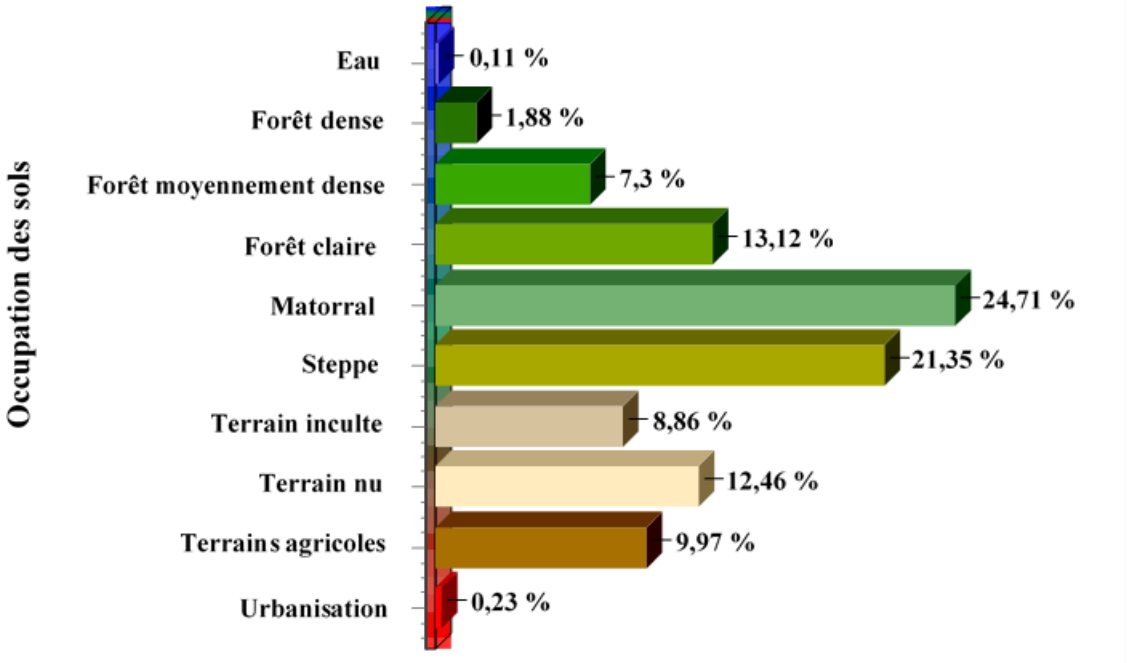


Figure 104: Répartition des occupations des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi (surface en %)

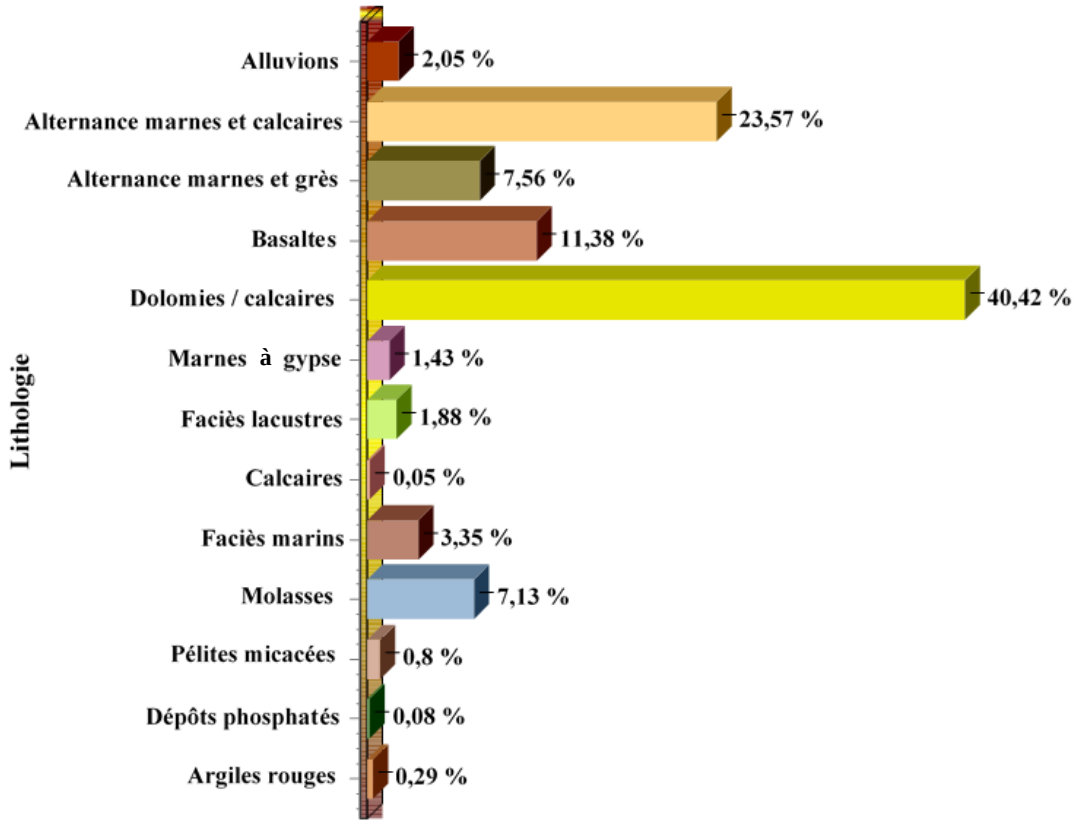


Figure 105: Répartition des formations lithologiques dans le bassin versant Allal Al Fassi (surface en %)

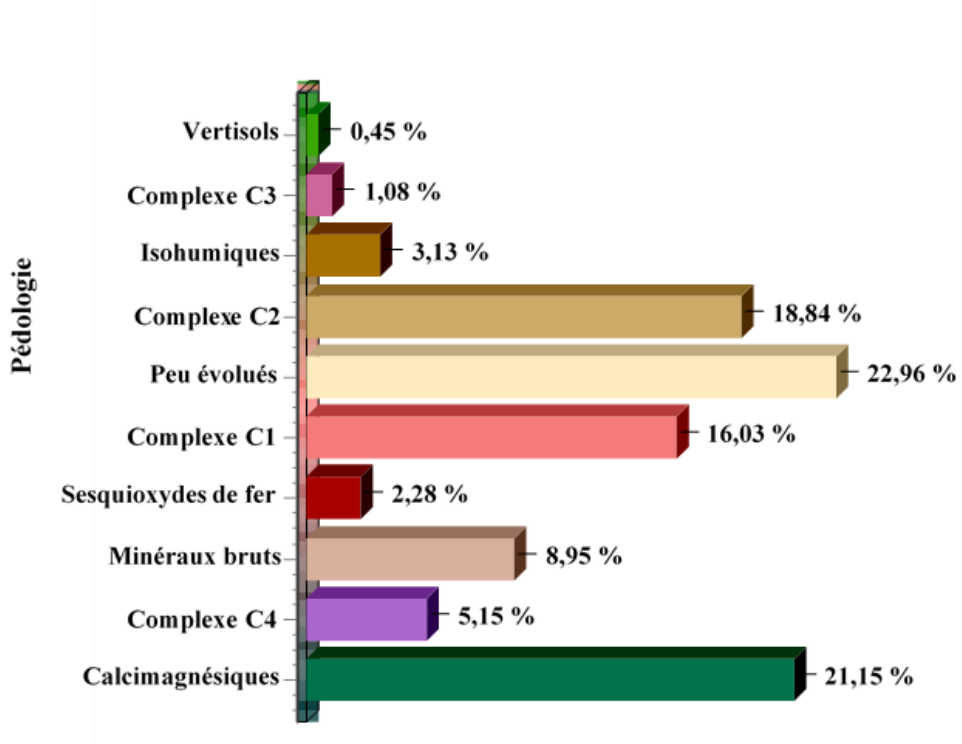


Figure 106: Pédologie en fonction de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi (surface en %)

III. Conclusion

La quantification des pertes en sols annuelles moyennes par le modèle RUSLE est estimée à 624,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$, avec un intervalle très large qui varie entre 3,57 et 3521,07 $t.\ ha^{-1}.an^{-1}$ et une médiane égale à 335,48 $t.ha^{-1}.an^{-1}$ en négligeant les valeurs aberrantes qui peuvent fausser l'interprétation. Parmi les cinq classes de pertes en sols distinguées, la classe faible est la dominante avec 35,89% de la superficie totale du bassin versant et les classes forte et très forte avec 14,69%. Les pertes en sols sont plus importantes en amont du bassin versant, principalement à l'Est où les pentes sont fortes et longues, les sols sont fortement érodibles avec peu ou pas d'aménagements même si la conservation est très variable et l'érosivité est très faible à faible. Par contre, elles sont faibles dans les zones à facteurs d'érosivité, de longueur et degré des pentes et d'érodibilité faibles à très faibles, de pratiques antiérosives faibles et de conservation des sols forte.

La combinaison des résultats des pertes en sols aux données de terrain (variables biogéographiques) et aux analyses physicochimiques, a permis de définir leurs relations. L'analyse des matrices de corrélation et des relations linéaires simples, à l'aide de l'indice de corrélation de Pearson, montre que les pertes en sols présentent des corrélations linéaires positives presque parfaites avec la longueur et degré de pente LS (r=0,59) suivis de l'érodibilité K (r=0,33) et les pratiques antiérosives (r = 0.30). Pour les paramètres physicochimiques, elles montrent des corrélations linéaires relativement faibles, positives dans un ordre décroissant avec le pourcentage de la matière organique (r=0,16), le pH (r=0,17), le pourcentage d'argiles (r=0,13) et le pourcentage de la fraction fine inférieure à 2mm (r=0,11), et négatives avec la conductivité (r=-0,25) et le pourcentage de sables (r=-0,16).

Le modèle de régression linéaire qui relie les pertes en sols à la longueur et degré de pente enregistre le pourcentage le plus élevé avec 35% suivi de celui de l'érodibilité (11,17%) par rapport aux autres facteurs dont le pourcentage ne dépasse pas 10%. En ce qui concerne les paramètres physicochimiques, la conductivité électrique EC explique 6,01% de la variabilité des pertes en sols suivie du pH avec 2,82%, des pourcentages d'argiles (R^2=1,64), de sables (R^2=1,16), de la fraction fine (R^2=2,41), de la matière organique (R^2=2,52). La densité et le pourcentage de silts enregistrent une régression inférieure à 1.

L'analyse de la variance ANOVA montre que les pourcentages de silts et d'argiles et le pH ont une incidence significative sur la variation des pertes en sols, alors que les autres paramètres (pourcentages de fraction fine et de sable, taux de matière organique et de

carbonates, densité et conductivité électrique) ne l'affectent pas significativement. L'analyse de la variance entre les pertes en sols et l'occupation des sols montre que les pertes en sols sont importantes pour les matorrals suivis par les steppes, deux occupations de sols dominantes (40,06% de la superficie totale du bassin versant), pour les terrains à substrat dolomitique, vue sa prédominance et pour les sols de type complexe C1 suivis par les minéraux bruts et les isohumiques.

L'analyse en composantes principales ACP montre que l'intensité de la relation entre les pertes en sols et la longueur et degré de pente est très élevée suivie de la conservation des sols et l'érodibilité, contrairement à l'érosivité des pluies et aux pratiques antiérosives qui se trouvent moins liées aux pertes en sols. L'érodibilité, la conservation des sols et la longueur et degré de pente s'avèrent bien liés. L'analyse en composantes principales ACP montre que l'intensité de la relation est élevée entre les pertes en sols et les pourcentages de silts, de la matière organique et de $CaCO_3$ (avec des corrélations négatives) et le pH.

Ces résultats montrent que le bassin versant Allal Al Fassi est soumis à des pertes en sols assez significatives qui pourraient causer d'énormes dégâts écologiques si aucune intervention préalable de lutte contre l'érosion hydrique n'est effectuée dans les années à venir, sachant que l'utilisation abusive des terres arables est en perpétuelle extension aux dépens des zones à couvert végétal naturel.

CHAPITRE III

Influence des paramètres physico-chimiques et des variables biogéographiques sur l'érodibilité des sols du bassin versant ***Allal Al Fassi***

Chapitre III : Influence des paramètres physico-chimiques et des variables biogéographiques sur l'érodibilité des sols du bassin versant Allal Al Fassi

Afin de comprendre la variation de l'érodibilité K, calculée par le biais de l'équation universelle des pertes en sols révisée (RUSLE) *(Renard et al., 1997)*, dans le bassin versant Allal Al Fassi, les paramètres physico-chimiques et les variables biogéographiques des sols sont intégrés. La combinaison du modèle avec les outils des systèmes d'information géographique (ArcGIS) permet de spatialiser l'érodibilité des sols avec précision *(Willward et Mersey, 1999 ; Lu et al., 2004 ; Jasrotia et Singh, 2006)*. L'ensemble des résultats est soumis à une analyse statistique multivariée pour évaluer les combinaisons et les interactions entre les différents paramètres dans le processus de l'érodibilité.

L'érodibilité K est calculée selon l'équation universelle des pertes en sols révisée RUSLE, parmi les cinq facteurs en relation avec le climat, le sol, la topographie, la végétation et la gestion (Figure 107). Le présent chapitre s'intéresse principalement au facteur érodibilité K *(Renard et al., 1997 ; El Kamel et al., 2020b)* tout en intégrant des paramètres physicochimiques et variables biogéographiques des sols afin d'étudier leurs interactions et leurs degrés d'influence.

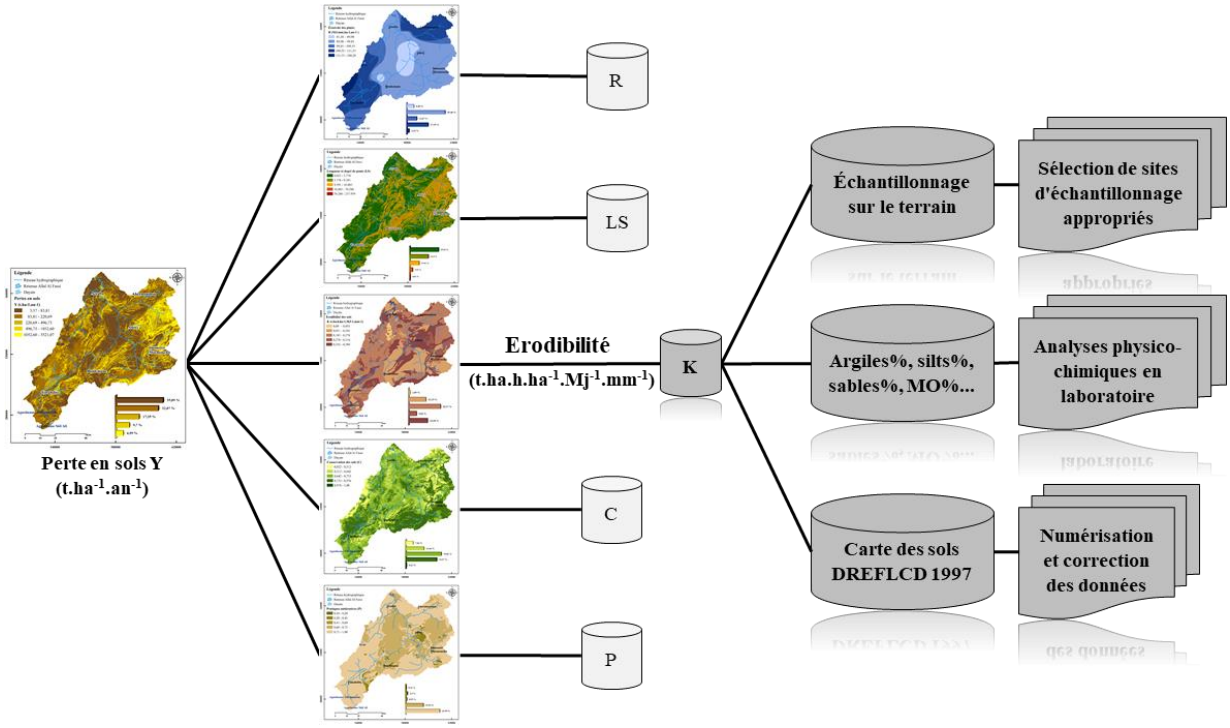


Figure 107:Organigramme du calcul de l'érodibilité K par la méthode RUSLE

I. Echantillonnage

Pour aboutir, neuf transects d'échantillonnage sont choisis de manière qu'ils soient représentatifs de tout le bassin versant (Timahdite, Ahermoumou, Immouzzer Marmoucha, Serghina, Taarart, M'Dez, Tighboula et El Menzel). Il en a résulté 150 échantillons. Sur le terrain la stratégie d'échantillonnage s'est basée sur une approche de transects où les échantillons sont espacés de 5 ou 10 mètres alignés suivant la plus grande pente et le sens de l'écoulement des eaux afin de suivre son action en surface du sol. Les échantillons sont pris à une profondeur de 15 à 30 centimètres, à l'aide d'une tarière constituée d'une poignée en T reliée par une rallonge à un cylindre en acier de sept centimètres de diamètre et 30 centimètres de hauteur. Le cylindre est enfoncé manuellement dans le sol en suivant un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. Une fois enfoncé sur toute sa longueur, si le socle rocheux n'est pas atteint, il est retiré et l'échantillon est emballé dans des contenants appropriés (sacs en plastique). Certains échantillons sont subdivisés en fonction de la profondeur en cinq sous-échantillons (Figure 108). Les échantillons sont observés et décrits sur le terrain (notamment la granulométrie, la structure et la couleur).



Figure 108:Photos montrant quelques manipulations pendant l'échantillonnage dans le bassin versant Allal Al Fassi

II. Analyses physico-chimiques

Au laboratoire, les échantillons prélevés sont d'abord séchés à l'air libre, pesés puis tamisés à l'aide d'une tamiseuse électrique et d'un tamis de maille de 2 millimètres afin de séparer la fraction fine de la fraction grossière. Pour les analyses physico-chimiques, la fraction fine récupérée est séchée dans une étude à une température de 100°C pendant 24 H, broyée à l'aide d'un broyeur électrique et homogénéisée par un homogénéisateur électrique (Figures 109 et 110).



Figure 109: Quelques étapes de préparation et d'analyses physico-chimiques des échantillons de sols

1 : calcimètre de Bernard ; 2 : analyseur de taille de particule par diffraction laser ANALYSETTE 22 NanoTec ; 3 : tamiseuse électrique pour la séparation de la fraction fine ; 4 : balances analytiques haute précision (0.001g) ; 5 : séchage des échantillons à l'air libre ; 6 : séchage des échantillons dans une étuve ; 7 : réactifs du dosage de la matière organique par la méthode Walkley-Black ; 8 et 9 : séparation des échantillons en fonction de la profondeur ; 10 : pH-mètre du multi-paramètres Consort-C562 ;

L’analyse granulométrique, le dosage de la matière organique et du taux de carbonates et la mesure du pH et de la conductivité, ont été effectués sur la fraction fine (≤ 2mm). L'analyseur de taille de particule par diffraction laser ANALYSETTE 22 NanoTec a été utilisé pour déterminer la taille des grains. Le pH et la conductivité électrique ont été mesurés à l’aide d’un multi-paramètres Consort-C562. Avant de mesurer le pH, les échantillons de sol sont mis en solution (10g d’échantillon dans 25 ml d’eau distillée) agitée à l’aide d’une baguette en verre pendant une minute afin de constituer une suspension de sol favorable à la mesure de la concentration en ions H^+ à l’état dissocié dans le liquide surnageant *(NF ISO 10390, 2005)*. Pour la mesure de la conductivité électrique, 10g de chaque échantillon sont mis en solution dans 100ml d’eau distillée puis agitée à l’aide d’un agitateur magnétique pendant 2 heures. Cela permet de mettre en suspension la totalité de l’échantillon et obtenir un équilibre entre la phase solide et la phase liquide. La solution est ensuite laissée reposer une demi-heure avant la mesure *(Mathieu et Pieltain, 2003)*. Le taux de carbonates est déterminé à l’aide de calcimètre de Bernard *(NF EN ISO 10693, 2014)*, qui permet de mesurer le volume du dioxyde de carbone (CO_2) dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur les carbonates de calcium ($CaCO_3$) contenus dans l'échantillon de sol (Figure 110).

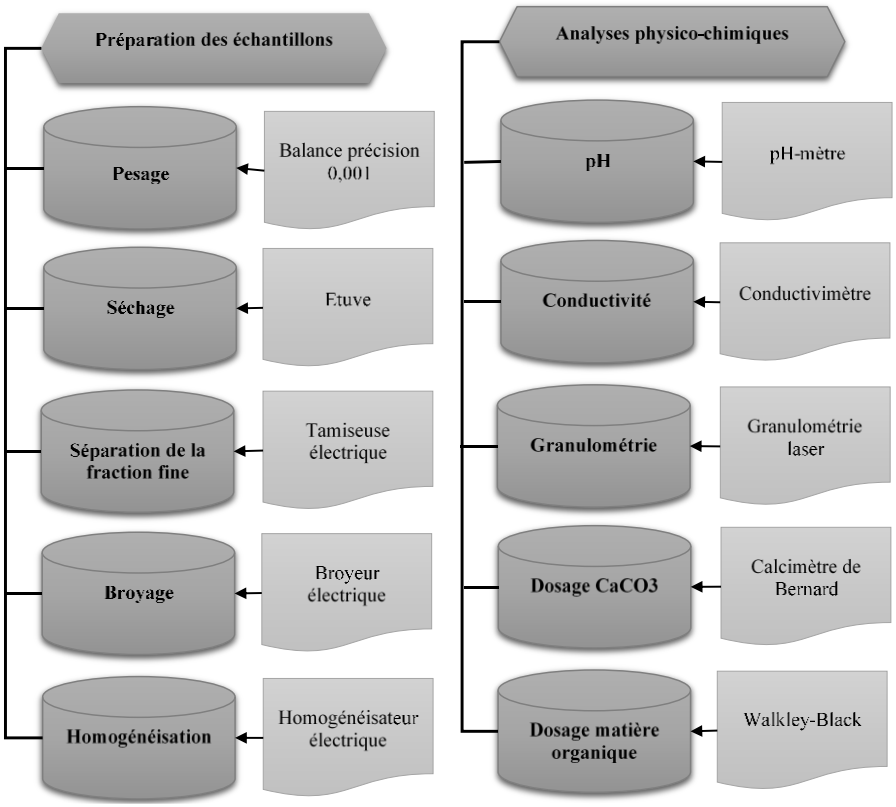


Figure 110: Matériels et méthodes de préparation et analyses physico-chimiques des échantillons de sols

Le dosage de la matière organique est réalisé à partir du dosage du carbone, l'un de ses constituants les plus importants. Le dosage de ce dernier est effectué par la méthode de Walkley-Black *(1934)* qui part du principe que le bichromate de potassium oxyde le carbone contenu dans le sol. Le bichromate de potassium change de couleur selon la quantité de produits réduits. Ce changement de couleur peut être comparé à la quantité de carbone organique présent dans le sol (Figure 110).

III. Calcul de l'érodibilité (K)

Les résultats des analyses physico-chimiques (taux de matière organique, pourcentages des sables et des silts) ont permis de calculer l'érodibilité K (Tableau 9). Elle est calculée selon l'équation de Wischmeier et Smith *(1978)* où M est le pourcentage de silts et sables fins, M_0 est le pourcentage de matière organique, Ss est le code de la structure du sol et P est le code de la perméabilité du sol *(El Kamel et al., 2020b)* (Figure 111).

L'équation de l'érodibilité K a été ajustée par Dumas *(1965)* afin de remédier à certaines imperfections, notamment la réduction de l'énergie du ruissellement. Où K est le facteur d'érodibilité calculé par Wischmeier et Smith *(1978)* et X est le pourcentage d'éléments grossiers de taille supérieure à 2mm (Figure 111).

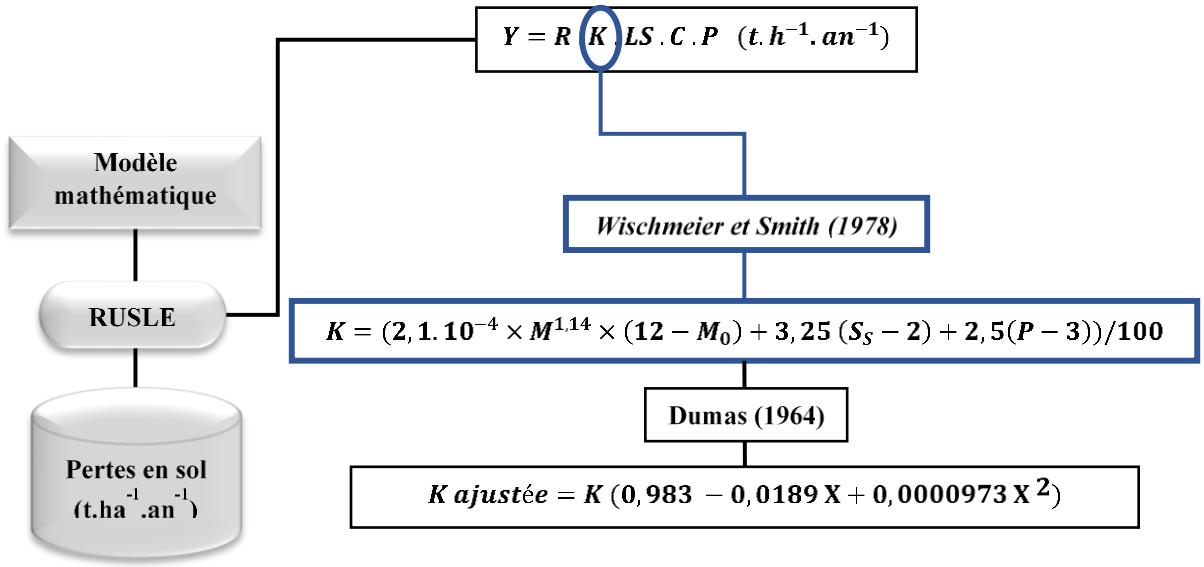


Figure 111: Equations de calcul de l'érodibilité K

IV. Résultats et discussions

Les sols dans le bassin versant Allal Al Fassi sont classés en dix classes différentes (minéraux bruts, peu évolués, vertisols, calcimagnésiques, isohumiques, sesquioxydes de fer, complexe C1, complexe C2, complexe C3 et complexe C4). La carte pédologique résultante a été numérisée à partir de la carte réalisée par le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification *(HCEFLCD, 2010)* et corrigée *(Baali, 1998 ; Baali et al., 2007)* et des données de terrain (Figure 112).

A partir du calcul de l'érodibilité des différents échantillons de sols de chaque transect, une valeur de K ajustée est atrribuée aux classes de sols du bassin versant. Elle varie entre 0,05 et 0,38 avec une valeur de 0 pour les sols les moins susceptibles à l'érosion hydrique et une valeur 0,38 pour les sols les plus susceptibles.

La répartition de l'érodibilité des sols a permis de mettre en évidence des classes d'érodibilité sur toute la superficie totale du bassin versant. 22,24% de cette dernière est occupé de sols à érodibilité faible (0,051-0,185), 19,15% est occupé de sols à érodibilité moyenne (0,185 - 0,278) et 34,61% est occupé de sols à érodibilité forte (0,278 - 0,316) à très forte (0,316 - 0,380) (Figure 87). Selon la nature et la structure des sols du bassin versant, la valeur la plus faible de l'érodibilité correspond aux sols structurés et évolués (vertisols, sesquioxydes et les calcimagnésiques) et la valeur la plus élevée correspond aux sols moins structurés et remaniés (sols à minéraux bruts, les sols peu évolués et les complexes C2 et C3).

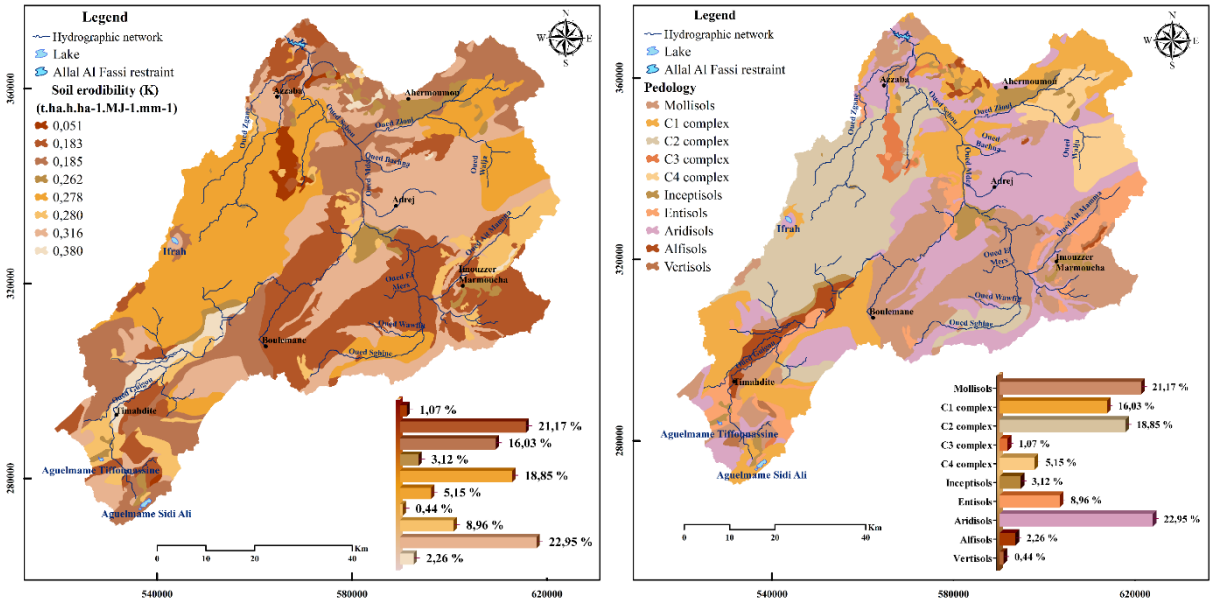


Figure 112: Cartes pédologique et de l'érodibilité K du bassin versant Allal Al Fassi

IV.1. Erodibilité des sols en fonction des paramètres physico-chimiques et variables biogéographiques

Les résultats des analyses menées aux laboratoires sont utilisés pour décortiquer leurs actions, corrélations et combinaisons par rapport à l'érodibilité des sols dans le bassin versant Allal Al Fassi.

L'analyse granulométrique a permis de déterminer la proportion de la fraction fine (≤2mm) qui varie entre 35,33 et 99,87% avec une moyenne de 83,45% et la calcimétrie a indiqué une teneur en $CaCO_3$ qui varie entre 14,81 et 71,07%. La majorité des échantillons de sols (70,86%) présentent une texture silteuse-fine avec une proportion moyenne de silts de 65,06%. 20,47% des échantillons ont une texture silto-argileuse-fine, 7,08% ont une texture argilo-sableuse. Les teneurs en matière organique sont faibles et varient entre 0,02 et 5,09%. Les sols sont généralement neutres à tendances basiques avec une capacité d'échange cationique importante (Tableau 59).

Tableau 59: Statistiques sommaires des paramètres physico-chimiques et de l'érodibilité des sols du bassin versant Allal Al Fassi

	Pente %	pH	CE	Argiles %	Silts %	Sables %	$CaCO_3$ %	OM %	F<2mm %	Densité g /cm3	K ajustée
Moyenne	9,92	8,05	279,58	25,94	65,06	9,00	40,25	1,90	83,45	1,17	0,28
Std. déviation	5,32	0,50	168,72	9,93	9,75	7,40	13,16	1,07	13,93	0,42	0,09
Coeff. de variation%	53,67	6,2	60,35	38,3	15	82,2	3,27	5,6	16,69	35,71	3,37
Minimum	0	7,09	114	12,8	3	0,1	14,81	0,02	35,33	0,10	0,05
Maximum	21,34	9,32	1296	94,90	81,20	35,80	71,07	5,09	99,87	2,38	0,48

L'érodibilité des sols dans le bassin versant montre une corrélation parfaite, mais opposée, positive avec la fraction fine (r=0,83) et négative avec la fraction grossière (r=-0,38). Il faut noter que peu de paramètres physico-chimiques des sols présentent une corrélation significative avec l'érodibilité K. Celle-ci est positivement corrélée avec le pourcentage des silts (r=0,36), si le taux des silts augmente l'érodibilité augmente. Si on associe l'effet des argiles (r=-0,46), de la matière organique (r=-0,12) et de $CaCO_3$(r=-0,16), l'érodibilité est corrélée négativement et si leurs taux augmentent, l'érodibilité diminue, ce qui évoque en premier lieu l'effet du complexe organo-minéral dans la structure et le maintien de l'équilibre intrinsèque des sols et la résistance aux effets de l'érosion hydrique (Figure 113).

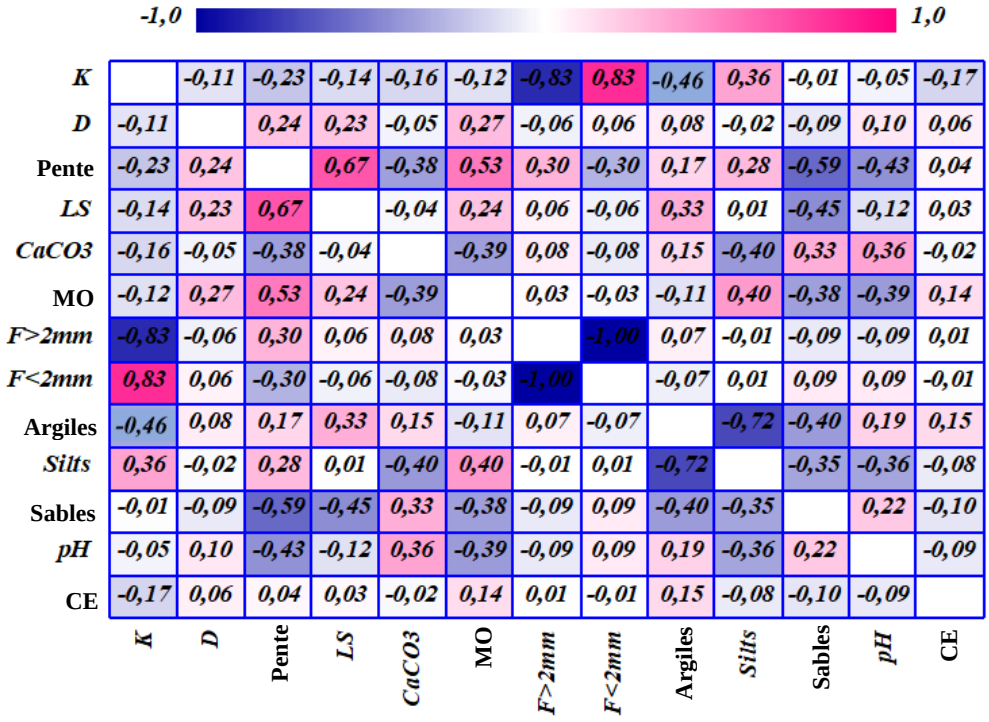


Figure 113: Matrice de corrélation de l'érodibilité K avec les paramètres physico-chimiques du bassin versant Allal Al Fassi

La texture des sols montre des variances significatives avec l'érodibilité K. La fraction fine pèse significativement sur l'érodibilité, plus la fraction fine est abondante plus l'érodibilité est importante. Le pourcentage des argiles montre aussi des variances significatives avec l'érodibilité, plus le taux des argiles est élevé plus l'érodibilité est faible. Ce qui évoque le rôle de ciment que jouent les argiles dans les microagrégats, constituants de la structure des sols et responsables de leur stabilité, de par leur grande capacité d'échange cationique qui conditionne la réactivité avec les substances humiques *(Stengel et al., 1984 ; El Kamel et al., 2020b)*. Les sols silteux sont les plus sensibles à l'érodibilité, particulièrement ceux qui sont pauvres en argiles et en matière organique *(Le Bissonnais et al., 2005)* (Figure 114).

La variance de l'érodibilité K et de la teneur en matière organique des sols montre qu'elles sont négativement corrélées. L'érodibilité est plus importante pour les faibles teneurs en matière organique, ce qui explique l'effet de cette dernière dans la formation des complexes organo-minéraux *(Bonneau et al., 1979)* qui stabilisent les sols et s'opposent à l'érosion hydrique *(Chaney et Swift, 1984 ; Haynes et Swift, 1990 ; Bartolia et al., 1992 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997)*

La densité apparente des sols affecte significativement l'érodibilité qui augmente pour les sols les moins denses. Sachant qu'au fur et à mesure de leurs genèse et évolution, les sols

deviennent structurés et présentent moins de vides et donc plus denses et résistants à l'érosion hydrique *(Terzaghi et al., 1996)* (Figure 114).

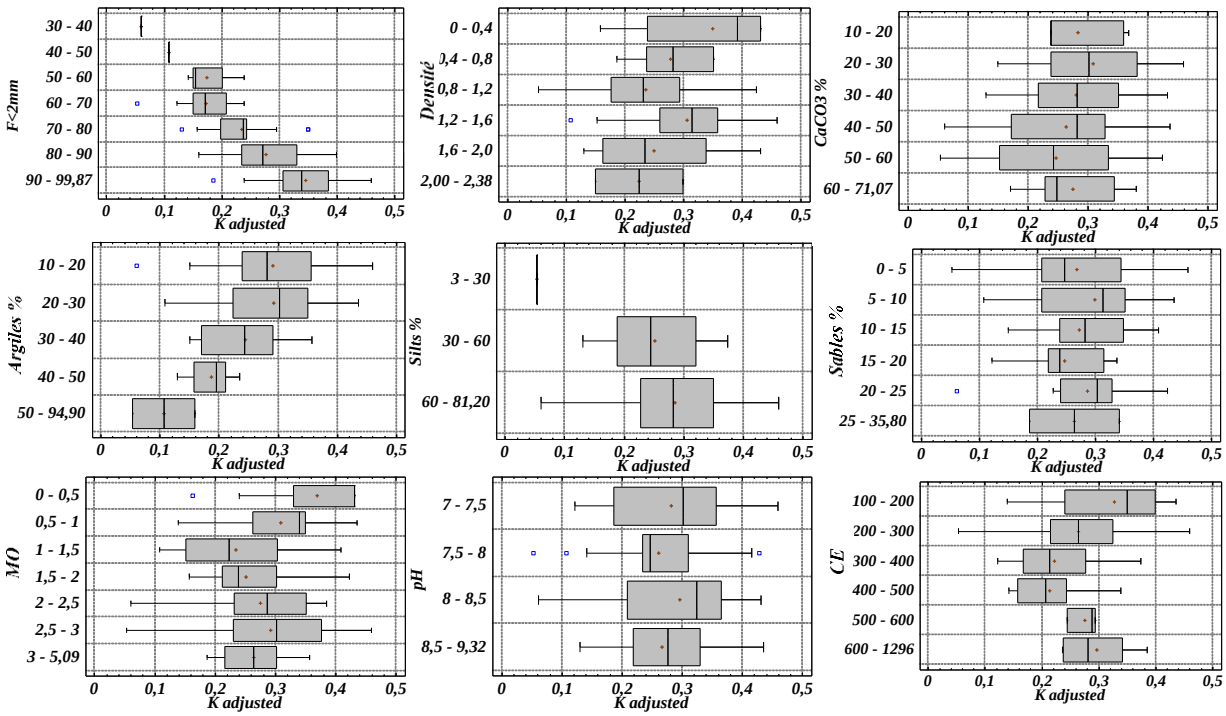


Figure 114: Variance de l'érodibilité K en fonction des paramètres physico-chimiques des sols du bassin versant Allal Al Fassi

Les résultats de l'ANOVA montrent des différences significatives de l'érodibilité pour les trois propriétés, texture, occupation des sols et lithologie. Elle est ainsi modeste sur les sols sous matorral et agricoles alors qu'elle est importante sur les sols sous steppe et non cultivés.

L'érodibilité devient plus importante dans les cas des sols à texture silteuse-fine, des sols occupés par des steppes ou des sols agricoles et des sols à substrats formés d'alternance de marnes et grès (Figure 115). Les sols deviennent moins érodibles lorsque la fraction silteuse y diminue, par rapport aux différentes proportions des fractions sableuse et argileuse, qui théoriquement la plus vulnérable à l'érosion hydrique *(Lelong et al., 1993)*. Sachant que cette vulnérabilité commence depuis le rejaillissement des particules sous l'action des pluies « effet splash » *(Bollinne, 1975 ; Poesen, 1985)*, ensuite par la fermeture de la porosité structurale *(Boiffin, 1987)* et enfin par la redistribution des particules fines par ruissellement et sédimentation en pellicules battantes. Les teneurs en fraction fine et en argiles présentent des effets totalement opposés vis-à-vis de l'érodibilité sachant que la deuxième est incluse dans la première. La teneur en argiles fait diminuer l'érodibilité, la teneur en silts fait augmenter l'érodibilité et la teneur en sables reste en situation intermédiaire *(El Kamel et al., 2020b)*.

L'érodibilité des sols est abaissée sous l'effet des teneurs de la matière organique et de $CaCO_3$. Ce dernier issu principalement de la précipitation des carbonates en solution au moment des infiltrations répétées des eaux de pluies à travers les sols, participe à la cohésion des particules entre elles. La densité des sols qui théoriquement est la résultante de l'agencement et de cohésion des argiles, des silts, des sables, de la matière organique et de $CaCO_3$, fait diminuer l'érodibilité lorsque sa valeur est élevée. Cependant, il faut noter l'indifférence des paramètres pH et EC sur l'érodibilité. Dans le cas de types d'occupation des sols, l'érodibilité diminue sur les sols agricoles et les sols sous matorrals. Les sols sur substrat calcaire et/ou marnes jaunes ou sur alluvions sont les plus protégés dans le bassin versant Allal Al Fassi (Figure 115).

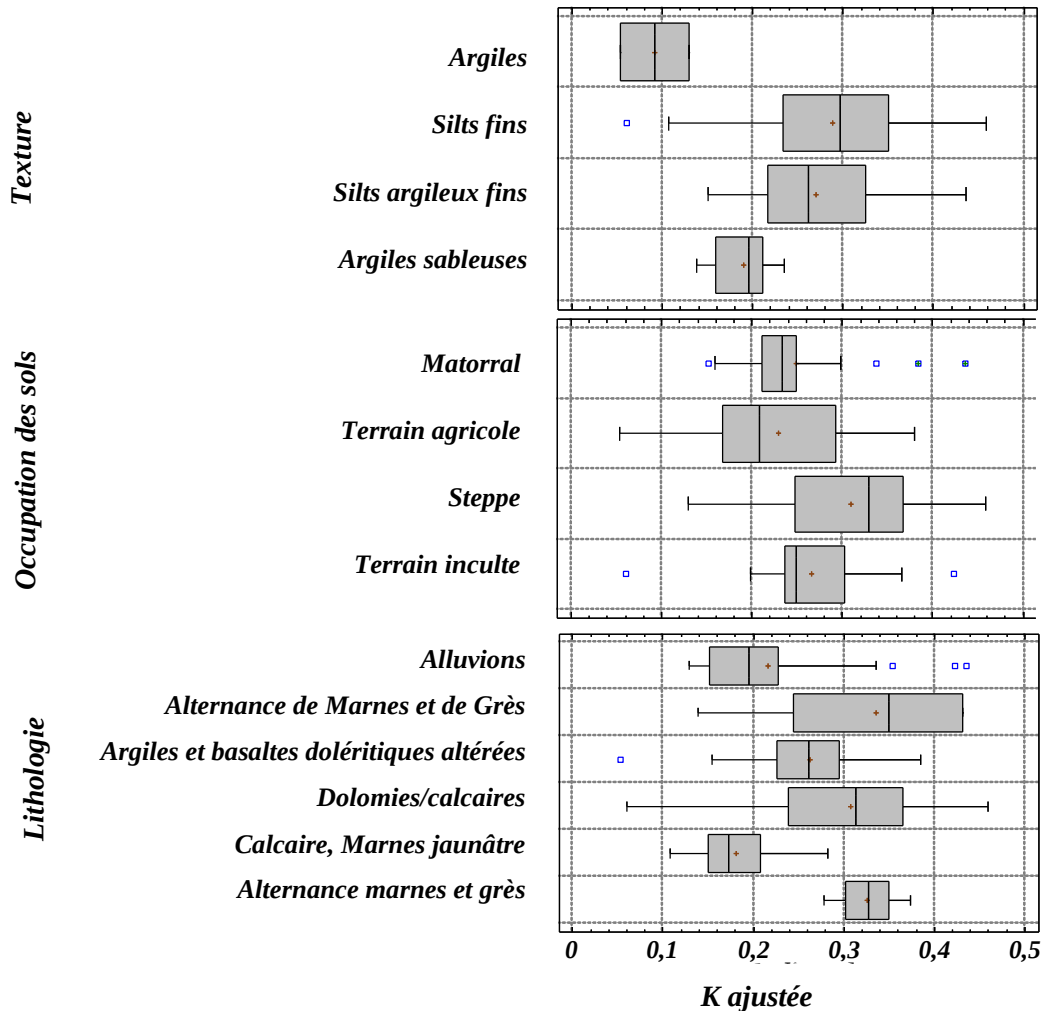


Figure 115: Variance de l'érodibilité K en fonction de la texture, l'occupation des sols et la lithologie dans le bassin versant Allal Al Fassi

IV.2. Variations des paramètres physico-chimiques et de l'érodibilité des sols en fonction des occupations des sols

Trois types d'occupation de sols sont retenus pour analyser les variations des paramètres physicochimiques et de l'érodibilité des sols (Figure 116). Parmi ces occupations, celle des sols sous matorrals où l'érodibilité est relativement faible par rapport à celles sur sols agricoles ou non cultivés. Ce qui est logique du fait que les végétaux protègent les sols contre l'effet mécanique des pluies et fournissent de la litière qui protège en surface et humifie en profondeur les sols. Alors que sur les sols cultivés ou non cultivés dépourvus de végétation subissent l'effet des pluies et la matière organique s'y accumule en faible quantité. Les sols cultivés sont aussi caractérisés par des labours successifs qui homogénéisent le profil pédologique. Le pH qui sous la dépendance des effets antagonistes du taux de $CaCO_3$ dans cet environnement généralement calcaire et du taux de la matière organique, est relativement neutre pour les sols sous matorrals qui tendrait à être basique pour les sols cultivés. A cet effet s'ajoute celui des complexes organominéraux responsables des échanges cationiques bien manifestés dans les sols sous matorrals *(Duchaufour, 1977 ; El Kamel et al., 2020b)*.

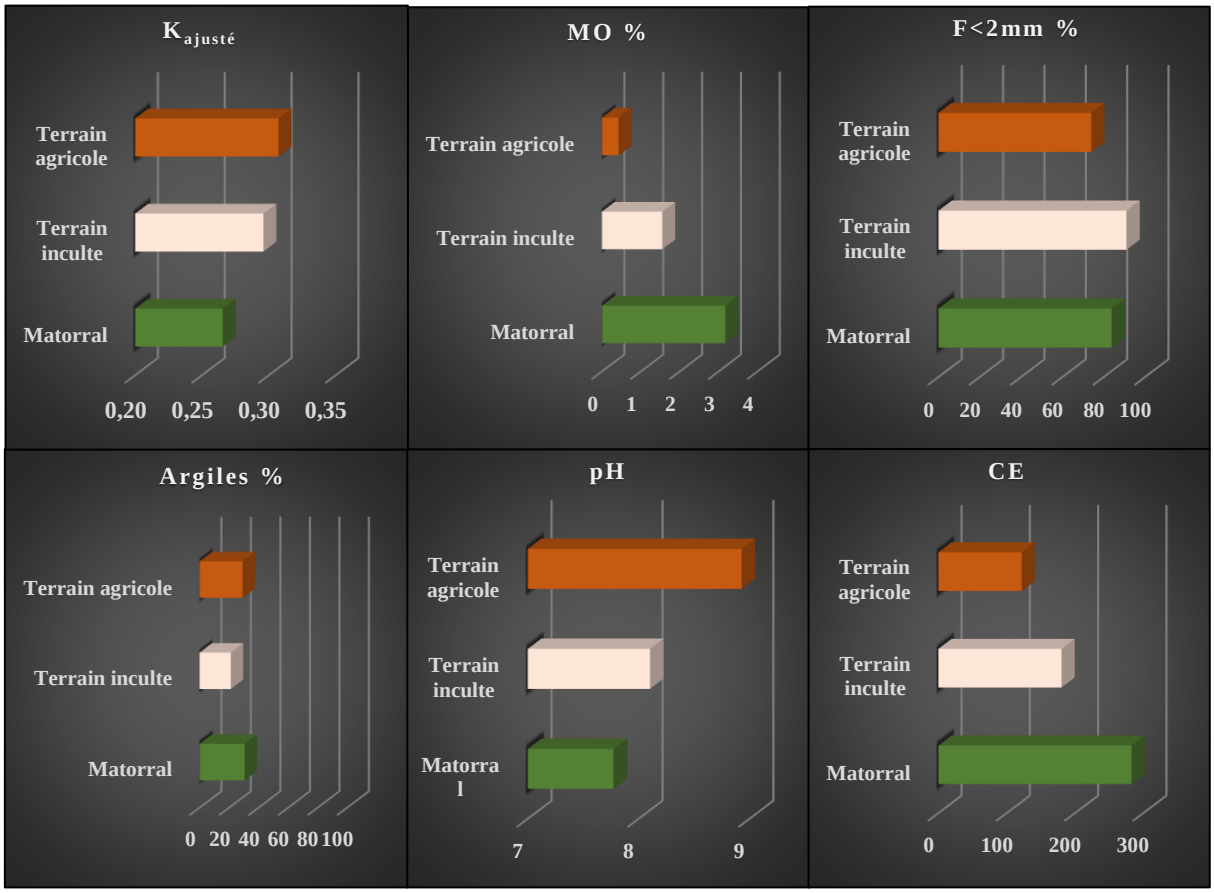


Figure 116: Variations de l'érodibilité K et de quelques paramètres des sols sous trois occupations des sols

Le taux de la fraction fine et le taux des argiles dans les trois cas d'occupations des sols ne présentent pas de différences plus significatives. Cependant, il est à noter que les légères baisse et augmentation respectivement du taux de la fraction fine et du taux d'argiles sont conséquentes des labours successifs qui exposent les différents constituants des sols à l'érosion et principalement la fraction silteuse.

IV.3. Variations des principaux paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur des sols de certaines occupations des sols

Dans ce cas, il a été choisi comme paramètres la teneur en fraction fine, la teneur en argiles, la teneur en matière organique et le pH et comme occupations des sols, les sols agricoles, les sols non cultivés et les sols sous steppe. Dans les sols cultivés caractérisés par des labours au cours de l'année qui détruisent la structure et remanient les différents horizons, la teneur en fraction fine reste constante en fonction de la profondeur. Contrairement aux sols non cultivés où la fraction fine est plus importante en surface, dans les horizons supérieurs (de 0 à 10 cm), qui pourrait être due soit à la compaction en surface par le pastoralisme, soit au remaniement suivi de sédimentation en pellicule battante au moment de l'érosion hydrique. Dans le cas des sols sous steppe à l'abri des actions anthropiques, la distribution de la fraction fine le long du profil n'est pas constante mais moyenne. Là où elle est élevée, elle pourrait indiquer un horizon d'accumulation. La teneur en matière organique est légèrement plus importante pour les sols sous steppe que pour ceux non cultivés, due principalement à la présence de la végétation, contrairement aux sols cultivés qui sont pauvres. Dans la partie sommitale qui contient assez de matière organique pourrait être un témoin d'une différenciation en horizons du profil pédologique.

Contrairement aux sols cultivés où la teneur en argiles ne présente aucune tendance, les sols sous steppe et les sols non cultivés ont des teneurs en argiles légèrement croissantes en profondeur. Cela est dû probablement à la relative stabilité des profils pédologiques marquée par un lessivage vertical pendant les pluies suivie d'une accumulation d'argiles.

Globalement, la valeur du pH des sols du bassin versant Allal Al Fassi sis dans un environnement carbonaté devrait être basique et ne diminuerait qu'en présence de la matière organique. Dans le cas des deux types de sols non labourés, cette tendance est marquée dans leurs parties sommitales (Figure 117).

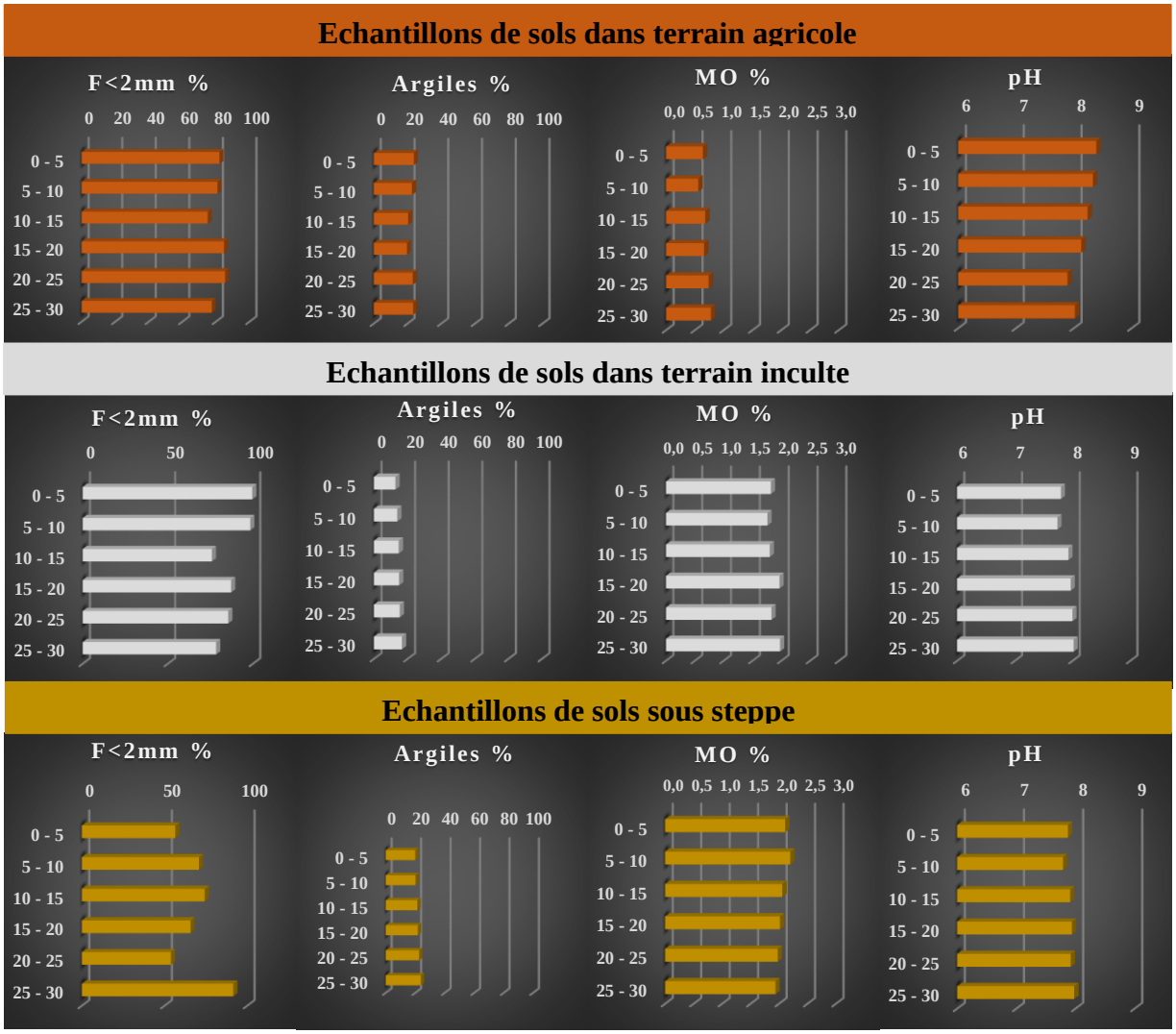


Figure 117: Evolution de quelques paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur de sols de trois occupations des sols

IV.4. Transect Ahermoumou

Comme il a été signalé plus haut, l'étude des paramètres physicochimiques et des variables biogéographiques des sols du bassin versant Allal Al Fassi est basée principalement sur les résultats d'analyses de transects. Le transect Ahermoumou est l'un des transects qui peuvent être représentatifs. Il a été effectué le long d'un versant exposé au Nord avec une pente modérée et irrégulière (pente moyenne de 15%) et recouvert d'un sol calcimagnésique. Le transect se termine au Nord dans une plaine alluviale.18 échantillons de sols y sont prélevés dans trois types d'occupations de sols, du numéro 1 au numéro 11 sont sous matorral, du numéro 12 au numéro 15 dans un sol agricole et du numéro 12' au numéro 14' dans un sol non cultivé (Figure 118).

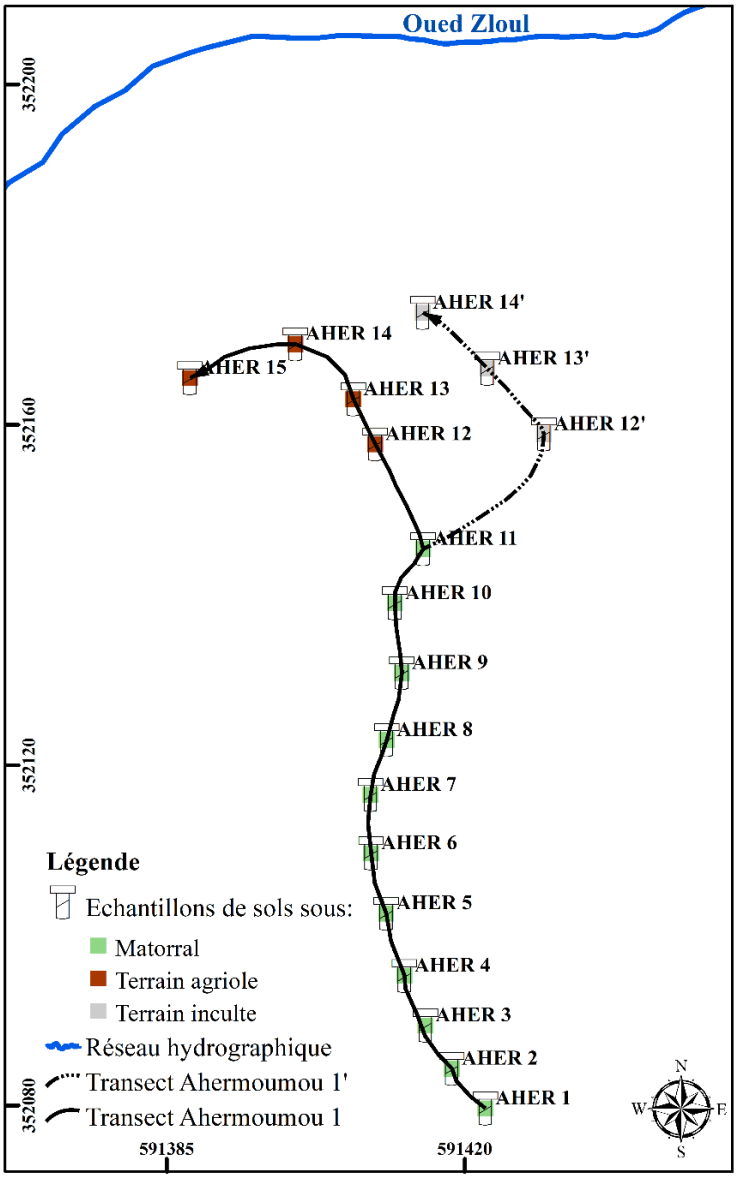


Figure 118: Situation des échantillons de sols du transect Ahermoumou

L'analyse granulométrique de la fraction fine (<2mm) des échantillons de sols du transect Ahermoumou, montre des variations sinueuses irrégulières notamment les pourcentages de la fraction fine, des argiles, des silts et des sables. Le pourcentage des argiles présente un pic (95%) au niveau de l'échantillon Aher8 au dépend du pourcentage des silts (3%), qui concorde avec une légère baisse du taux de matière organique et une chute de l'érodibilité K. Cela est dû à la présence d'un replat topographique au niveau du site d'échantillonnage Aher8, facilitant l'accumulation des argiles et probablement une mise en action de la pédogenèse (Figure 119).

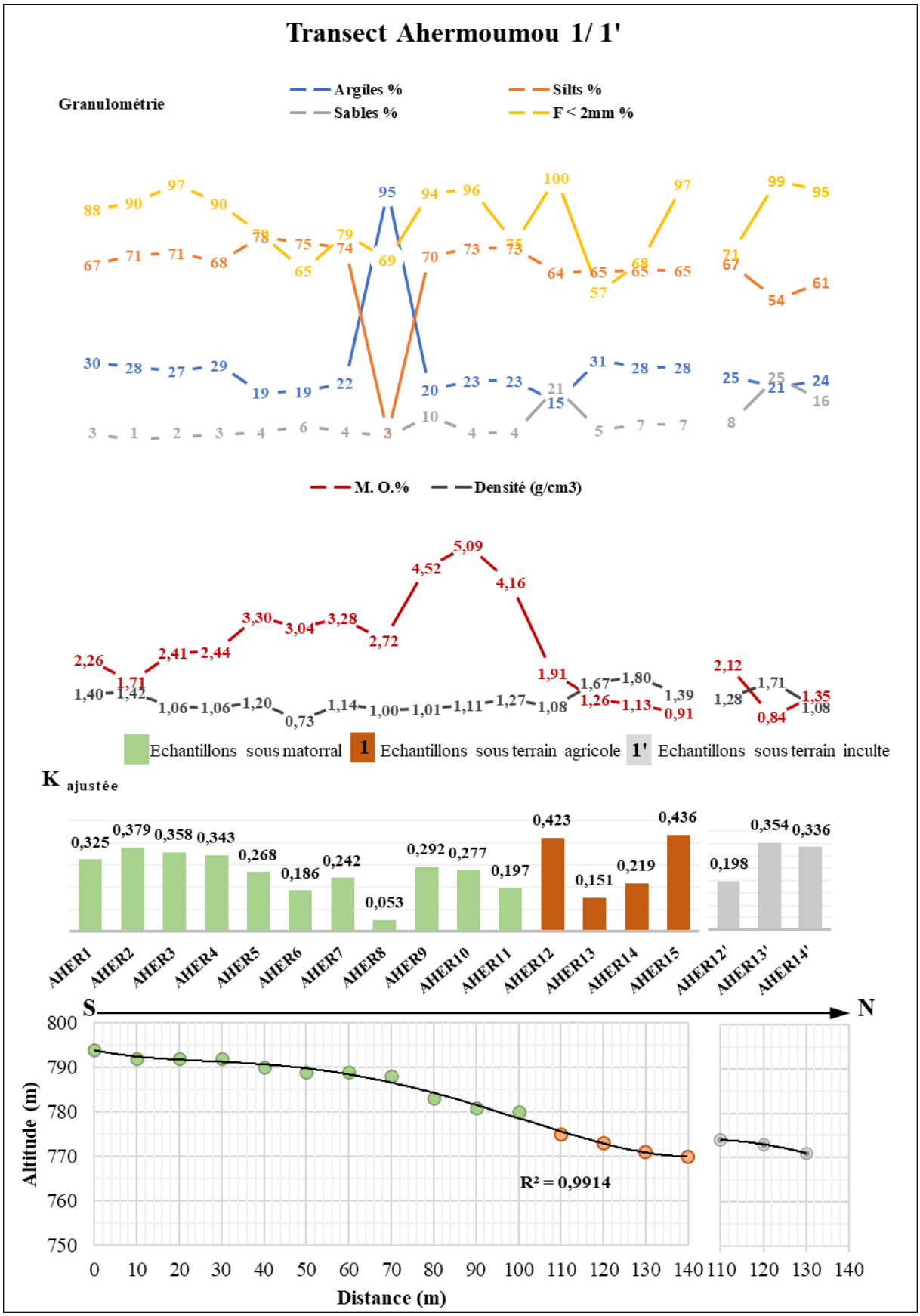


Figure 119: Paramètres physico-chimiques et érodibilité K de chaque échantillon de sols du transect Ahermoumou (El Kamel et al., 2020b)

La courbe des taux de matière organique montre que le pourcentage de celle-ci est plus important dans les échantillons sous matorral que ceux dans le sol agricole ou le sol non cultivé. Il diminue avec l'altitude, de l'échantillon Aher1 (2,26%) jusqu'à l'échantillon Aher10 (5,09%) et chute au niveau de l'échantillon Aher12 (1,91%). Cette baisse en taux de la matière organique pourrait être due à un changement de type d'occupation des sols (matorral, sol agricole ou sol non cultivé), à une variation de la densité du couvert végétal (au niveau du matorral, nombre de pieds d'arbustes par surface) et/ou à un changement de substrat (sols calcimagnésiques sur calcaires sous matorral et sols agricoles ou non cultivés sur dépôts alluviaux) *(El Kamel et al., 2020b)*.

Sachant que la densité apparente des sols exprime sa structure et sa porosité, en particulier son agrégation et son adhésion *(Kauffman et al., 1998)*. Dans le transect Ahermoumou la densité apparente des différents échantillons de sols est relativement importante pour les sols agricoles par rapport aux sols sous matorral ou sur sol non cultivé. Ces échantillons ont une composition particulière qui pourrait justifier cette élévation qui se manifeste par une teneur en argiles avoisinant 30% et une teneur en silts de 65% et une très faible quantité de matière organique.

V. Conclusion

L'étude de l'érodibilité des sols en fonction des paramètres physicochimiques et des variables biogéographiques du bassin versant Allal Al Fassi a permis de soulever plusieurs questions dont les réponses permettant de comprendre ce phénomène d'érodibilité dans un contexte à la fois naturel et soumis à l'action anthropique. Le calcul de l'érodibilité K des différents échantillons des sols, par le biais de l'équation universelle des pertes en sols révisée RUSLE, a contribué à l'attribution d'une valeur K ajustée pour chaque type de sol. Elle varie entre 0,05 et 0,38 selon la nature et la structure des sols, faible pour les sols structurés et évolués (vertisols, sesquioxydes et les calcimagnésiques) et élevée pour les sols moins structurés et remaniés (les sols à minéraux bruts, les sols peu évolués et les complexes C2 et C3).

Par le biais de la combinaison des résultats du calcul de l'érodibilité, des paramètres physico-chimiques et des variables biogéographiques, des relations entre eux ont été définies. L'analyse de la matrice de corrélation et des relations linéaires simples, à l'aide de l'indice de corrélation de Pearson, montre que l'érodibilité est fortement corrélée positivement avec la fraction fine et négativement avec la fraction grossière. Elle est corrélée positivement avec le pourcentage des silts et négativement avec les pourcentages des argiles, de la matière organique

et de $CaCO_3$, ce qui évoque l'effet du complexe organo-minéral dans la structure et le maintien de l'équilibre intrinsèque des sols et la résistance à l'érosion hydrique.

L'analyse de l'ANOVA montre que l'érodibilité présente des variances significatives avec la fraction fine, le pourcentage d'argiles, le pourcentage de matière organique et la densité apparente. Elle diminue pour les sols les plus denses qui sont les plus évolués, les mieux structurés et les plus résistants à l'érosion hydrique. Cette analyse a précisé que l'érodibilité est importante quand la fraction fine est abondante et les taux des argiles et de la matière organique sont faibles. L'érodibilité montre des différences significatives avec la texture, l'occupation des sols et la lithologie. Elle est ainsi relativement faible sur les sols sous matorrals et importante sur les sols sous steppes et sols agricoles et non cultivés. La texture silteuse-fine des sols et les substrats formés d'alternance de marnes et grès jouent en sa faveur. L'analyse de la variation des paramètres physico-chimiques (teneur en fraction fine, teneur en argiles, teneur en matière organique et pH) en fonction de la profondeur des sols de trois occupations des sols, sols cultivés, non cultivés et sous steppe montre une distribution de ceux-ci selon les phénomènes naturels tels la pédogenèse, la végétation, le substrat et l'action anthropique.

CHAPITRE IV

Effet de l'installation du barrage M'Dez sur l'érosion hydrique dans le bassin versant
Allal Al Fassi

Chapitre IV : Effet de l'installation du barrage M'Dez sur l'érosion hydrique dans le bassin versant Allal Al Fassi

Pour une enveloppe qui s'élève à 1,5 MMDH, le barrage M'Dez, toujours en chantier de construction, dans la commune de Tazouta appartenant à la province de Sefrou, constituera une infrastructure hydrique de grande envergure. Il permettra de capter dans le cadre de la sauvegarde de la plaine de Saïss les ressources hydriques des zones excédentaires pour faire bénéficier d'autres zones à potentiel de développement ou à déficit pluviométrique. Cette infrastructure aura d'importantes retombées socio-économiques par la création d'emplois et le développement de l'écotourisme en faveur de l'exploitation de la retenue du barrage d'une capacité de 700 millions m^3. Celle-ci permettra l'irrigation de la plaine de Saïs avec près de 125 millions m^3 chaque année et assurera le besoin en eau potable.

Le bassin versant M'Dez constitue la partie haute du grand bassin versant Sebou et par conséquent du bassin versant Allal Al Fassi, avec une superficie de 3382 km^2 (Figure 120). Dans le domaine moyen atlasique, environ 80% de sa superficie totale est située dans le Moyen Atlas plissé contre environ 20% dans le Moyen Atlas tabulaire. Les formations géologiques y sont diversifiées, d'âge allant du Paléozoïque jusqu'au Quaternaire avec prédominance de calcaires et dolomies du Lias *(Charrière, 1990 ; Sabaoui, 1998)*. Il est considéré comme une zone d'altitude, avec plus de 76% de sa superficie a une altitude supérieure à 1500m, un sommet à 2957 m et un exutoire à 727 m. Sa morphologie est caractérisée par une prédominance de pentes faibles à moyennes, environ 70% a une pente inférieure à 20 %. Son indice de compacité de 1,9 confirme sa forme allongée apparente qui ralentie sa réponse hydrologique. Il est drainé par l'Oued Guigou et l'Oued Maasser, ses principaux cours d'eau. Plusieurs étages bioclimatiques y coexistent allant de l'humide à hiver froid au semi-aride.

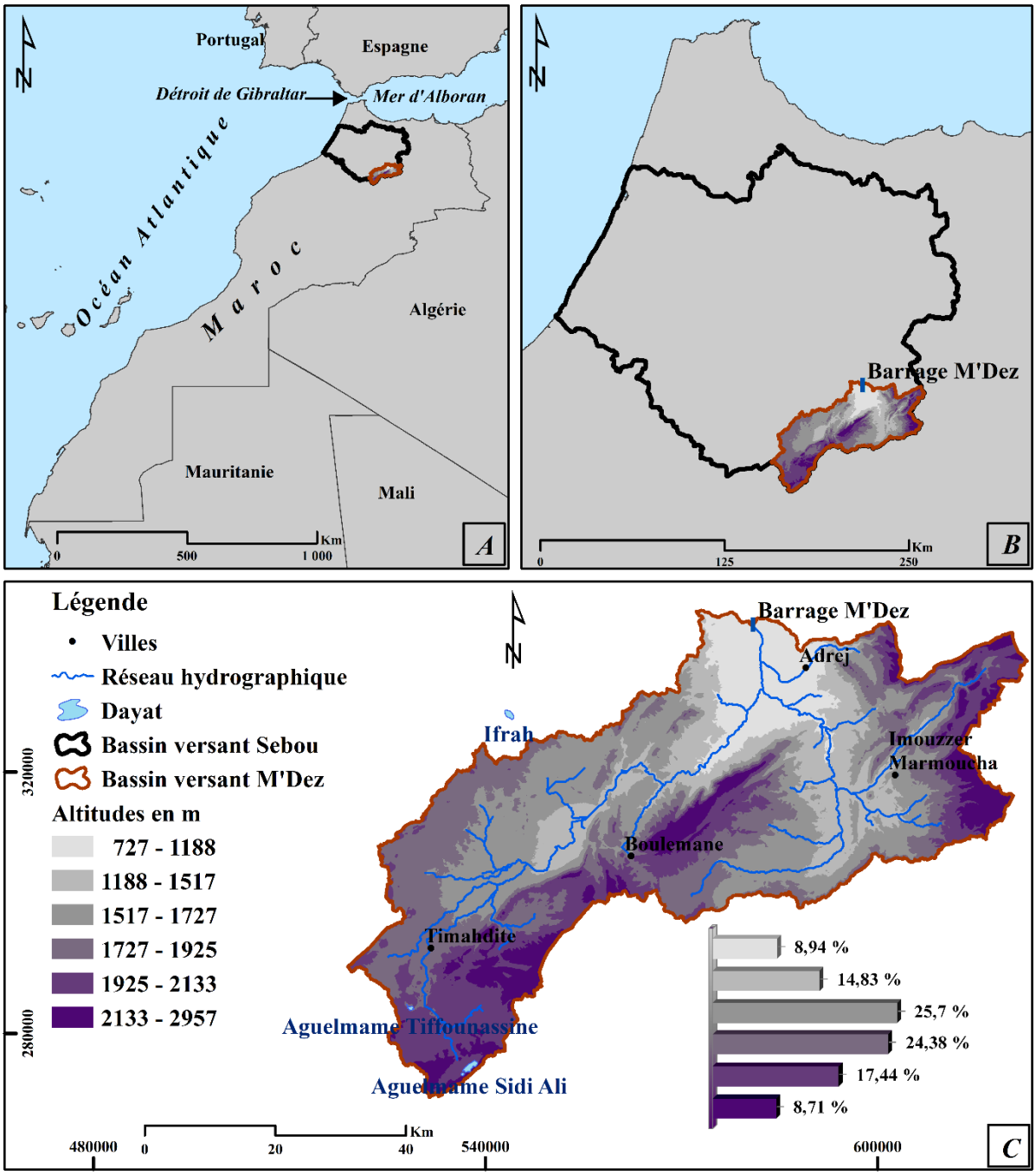


Figure 120. Situation géographique du bassin versant M'Dez

I. Morphométrie du bassin versant M'Dez

L'évaluation des caractéristiques physiographiques du bassin versant M'Dez basée sur le traitement du modèle numérique de terrain par les systèmes d'information géographique (SIG) pour l'extraction des différentes caractéristiques géomorphologiques et le calcul des différents indices qui influencent l'écoulement des eaux de surface a permis la compréhension de toutes ses fonctionnalités.

Le bassin versant M'Dez s'étale sur une superficie de 3382 Km^2 et un périmètre de 403,1 Km. L'indice de Gravelius est égal à 1,9 et confirme la forme apparente allongée étroite du bassin versant M'Dez, orienté ENE-WSW, qui traduit de faibles débits de pointe, caractérisés par un temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus long. En d'autres termes, cette forme allongée ralentie la réponse hydrologique avec une notion de temps de concentration (t_c) plus long que dans le cas de la forme en éventail.

Le modèle numérique du terrain (MNT) a permis, aussi de déterminer les altitudes en tout point du bassin versant M'Dez avec un sommet culminant à 2957 m, un exutoire à 727 m et une altitude moyenne de 1723,84 m. Six classes hypsométriques peuvent être différenciées séparant trois zones d'altitude. La partie amont du bassin versant est là où les altitudes sont les plus élevées, entre 1925 m et 2957 m, notamment au niveau de Jbel Bou Iblane, Tichoukt, Aguelmame Sidi Ali et Immouzzer Marmoucha. La partie centrale avec une tranche d'altitude Allant de 1517 m à 1925 m. La troisième partie est caractérisée par des altitudes de plus en plus faibles en tenant compte de tout le bassin versant et atteignant les 727 m dans la partie aval (vallée de M'Dez) (Figure 120).

Le relief du bassin versant M'Dez peut être représenté par sa courbe hypsométrique réalisée à partir de pourcentages cumulés des surfaces pour chaque tranche d'altitudes (Tableau 60). L'allure générale de la courbe hypsométrique du bassin versant M'Dez correspond à l'état dit mature qui correspond à un stade d'érosion relativement développé. Cet état exprime une dégradation des conditions bioclimatiques (climat et couvert végétal) associée à l'action anthropique intensifiée (Figure 121). Les dimensions du rectangle équivalent du bassin versant M'Dez, montrent que la longueur (L= 217,12 Km) est presque douze fois (11,75) sa largeur (l= 18,47 Km) (Figure 122).

Tableau 60: Calculs hypsométriques du bassin versant M'Dez

Tranches d'altitudes	**Surface (A_i) en Km^2**	**Surface (A) en %**	**Surface cumulée en Km^2**	**Surface cumulée en %**	**Altitude moyenne (H_i) en m**
727 - 1188	302,30	8,94	3382,00	100,00	957,5
1188 - 1517	502,50	14,83	3079,70	91,06	1353
1517 - 1727	868,90	25,70	2577,20	76,23	1622
1727 - 1925	824,10	24,38	1708,30	50,53	1826
1925 - 2133	589,70	17,44	884,20	26,15	2029
2133 - 2957	294,50	8,71	34,26	8,71	2545
Total	3382,00	100	-	-	-

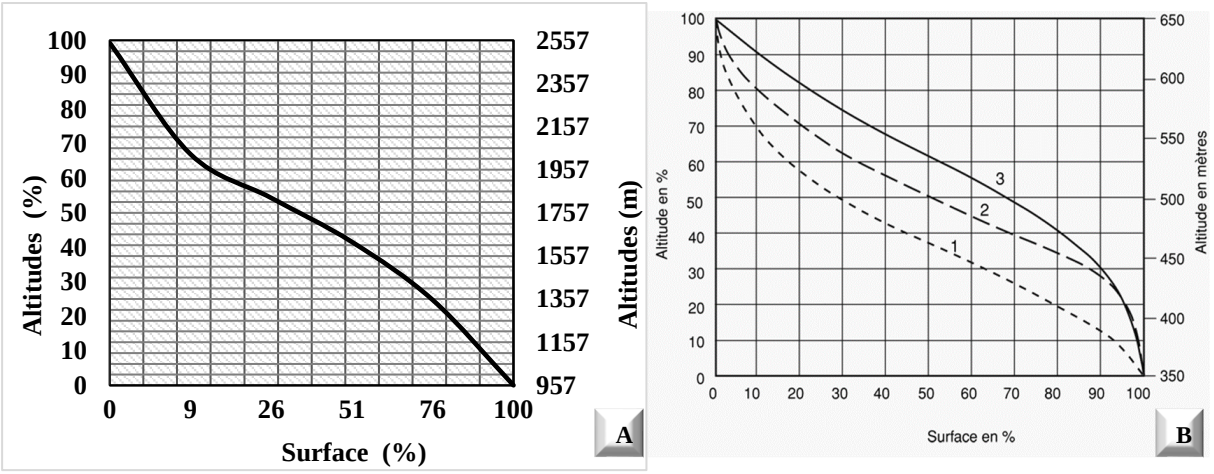


Figure 121 : A - Courbe hypsométrique du bassin versant M'Dez ; B - Classification de l'aspect général des courbes hypsométriques selon l'état d'érosion

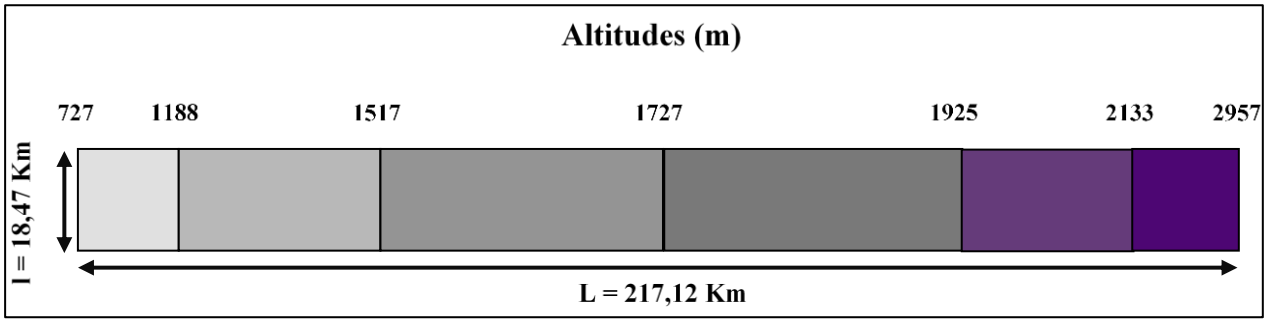


Figure 122. Rectangle équivalent du bassin versant M'Dez

Le système altimétrique d'un bassin versant influence directement les débits issus des précipitations Dans le bassin versant M'Dez, l'altitude minimale est de 727 m et l'altitude maximale est de 2957 m. L'altitude moyenne est de 1723,68m et la médiane (l'altitude sur la courbe hypsométrique au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin versant) est de 1826 m.

Les pentes faibles à moyennes prédominent. Les classes des pentes inférieures à 20 % occupent environ 67 % de la superficie totale du bassin versant M'Dez. Les pentes les plus fortes sont localisées dans le Moyen Atlas plissé à zones montagneuses, notamment sur Jbel Bou Iblane et Jbel Tichoukt. Ces pentes sont dominées par une orientation Nord-Ouest perpendiculaire au contexte morphostructural (Figure 125). La classe des pentes moyennes de 10,27% est relativement faible, chose qui favorise l'infiltration des eaux surtout lorsque la perméabilité du substrat la permettrait. L'indice de pente de Roche est égal à 0,09 et l'indice globale de pente à 0,068, témoignant d'un relief fort selon la classification de l'ORSTOM.

L'écoulement des eaux de surface dans le bassin versant M'Dez est assuré par des oued à flux épisodique et saisonnier avec caractère torrentiel et par un écoulement diffus. Le réseau hydrographique est drainé par deux oueds principaux, Oued Guigou et Oued Maasser, dont l'écoulement est assuré en majorité par les précipitations et la fonte de neige, et l'existence de sources d'eau, principalement Aïn Tataw, Aïn Titzil et Aïn Aberchane.

Le réseau hydrographique, de 3109,77 Km de longueur, est dense et ramifié (Tableau 61). En épousant la morphologie complexe du bassin versant, les affluents s'organisent en réseau généralement dendritique et homogène, avec des variations locales, notamment dans la partie avale où ils deviennent parallèles. Le réseau hydrographique du bassin versant M'Dez témoigne de la forte densité de drainage et de la dynamique importante. Son cours d'eau principal d'ordre 6 selon l'échelle de Strehler, témoigne d'un réseau à fort potentiel érosif (Figure 123).

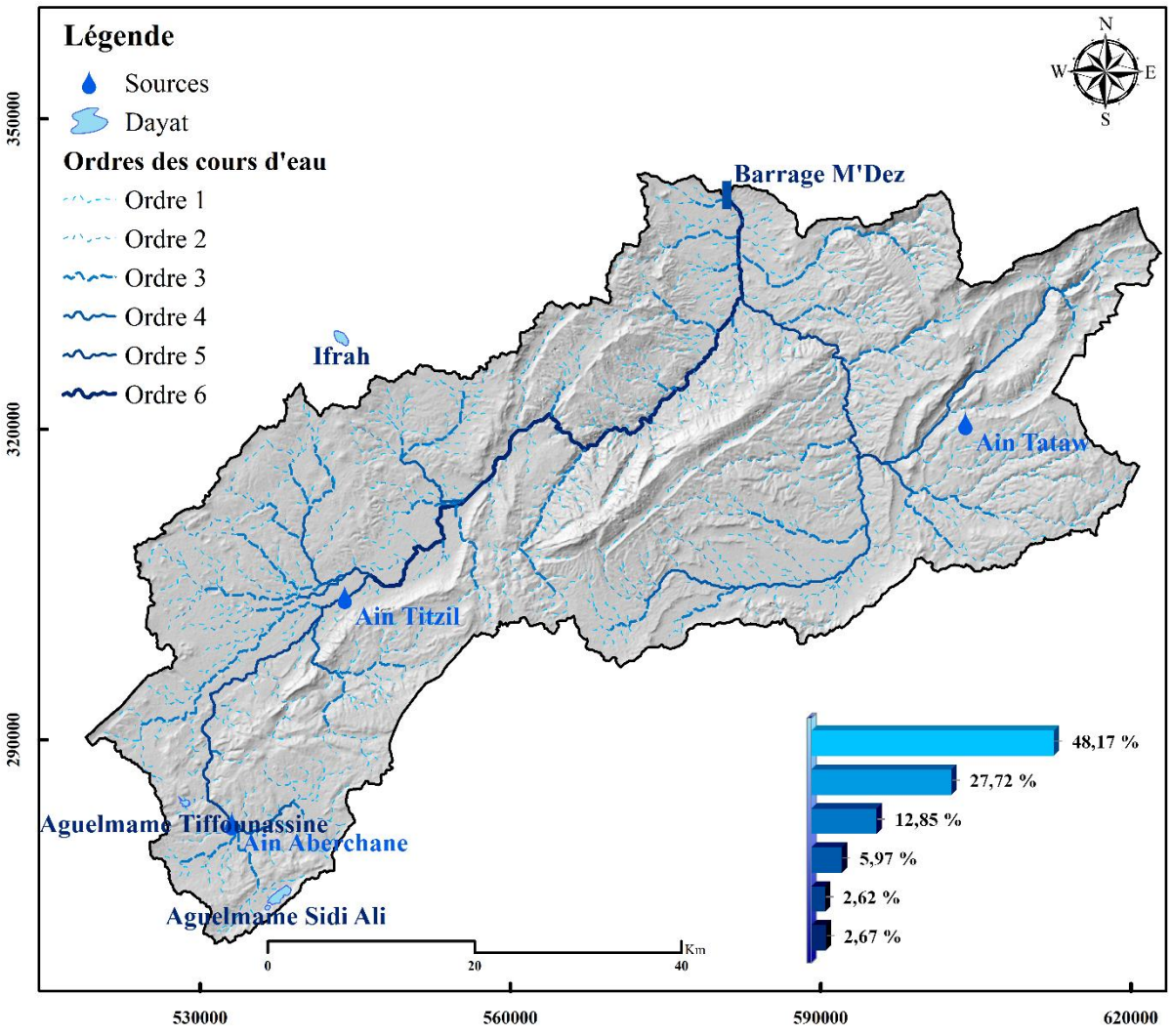


Figure 123. Carte de l'ordre des cours d'eau du bassin versant M'Dez

Tableau 61: Ordres et longueurs des cours d'eau du bassin versant M'Dez

Ordres des cours d'eau	Longueur des cours d'eau L_i (Km)
Ordre 1	1498
Ordre 2	862
Ordre 3	399,5
Ordre 4	185,8
Ordre 5	81,55
Ordre 6	82,92
Total	3109,77

La densité de drainage D_d du bassin versant M'Dez, caractérisant son chevelu hydrographique, est de l'ordre de 0,92 Km/Km^2, une valeur témoignant d'un bassin moyennement drainé. Cette valeur de densité du drainage peut s'expliquer par la perméabilité du substratum et le relief accidenté. Quant à sa densité hydrographique, elle est égale à 1,87 Km^{-2}. Cette faible valeur témoigne de l'importance de la perméabilité du substratum, de l'importance du couvert végétal et du relief accidenté. Le coefficient de torrentialité est égal à 0,83 Km/Km^4. Cette faible valeur est fortement liée à la forte perméabilité des formations géologiques. Le temps de concentration des eaux dans le bassin versant M'Dez est de 8,96h. En raison de ce temps de concentration important (Tc= 8h 57min 36s), les crues et les débits de pointes sont rendus faibles.

Dans le bassin versant M'Dez le rapport de confluence varie entre 1,23 et 2,48 (inférieur à 3) (Tableau 62) et le rapport de longueur varie entre 0,57 et 1,25 (Tableau 63). Ces valeurs témoignent de la grande influence de la géologie sur l'écoulement des eaux superficielles dans le bassin versant M'Dez *(Strahler, 1964).*

Tableau 62: Rapport de confluence dans le bassin versant M'Dez

Ordre des cours d'eau	Nombre des cours d'eau (N_n)	R_C
Ordre 1	3052	1,84
Ordre 2	1657	2,48
Ordre 3	668	1,23
Ordre 4	544	2,46
Ordre 5	221	1,23
Ordre 6	180	-

Tableau 63: Rapport de longueur du réseau hydrographique du bassin versant M'Dez

Ordre des cours d'eau	Nombre des cours d'eau	Longueur totale	Longueur moyenne	R_L
Ordre 1	3052	1498,00	0,49	1,06
Ordre 2	1657	862,00	0,52	1,15
Ordre 3	668	399,50	0,60	0,57
Ordre 4	544	185,80	0,34	1,08
Ordre 5	221	81,55	0,37	1,25
Ordre 6	180	82,92	0,46	-

La densité du drainage (0,92Km/Km^2), la densité hydrographique (1,87 Km^{-2}) et le coefficient de torrentialité (0,83) qualifient le bassin versant M'Dez de bassin moyennement drainé avec substratum perméable et relief accidenté. Le rapport de confluence varie entre 1,23 et 2,48, témoignant de la grande influence de la géologie sur l'écoulement des eaux superficielles dans le bassin versant M'Dez (Tableau 64).

Tableau 64: Caractéristiques morphométriques du bassin versant M'Dez

Caractéristiques morphométriques du bassin versant M'Dez	
Surface	3382 Km^2
Périmètre	403,1 Km
Indice de compacité	1,9
Longueur du rectangle équivalent	217,126 km
Largeur du rectangle équivalent	18,473 km
Altitude maximale	2957 m
Altitude minimale	727 m
Altitude moyenne	1723,839 m
Altitude médiane	1826 m
Pente moyenne	10,27 %
Indice de pente global	0,06 %
Indice de pente de Roche I_p	0,09 %
Densité du drainage	0,92 Km/Km^2
Densité hydrographique	1,87 Km^{-2}
Coefficient de torrentialité	0,83 Km/km^4
Temps de concentration T_c	8,96 h

II. Evaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant M'Dez

Le bassin versant M'Dez est sujet d'une dynamique érosive intense. Il constitue la partie haute du grand bassin versant Sebou et du bassin versant Allal Al Fassi. Ce dernier, soumis à son tour à une érosion hydrique menaçante, les pertes en sols moyennes y sont estimées à 624,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$. Le bassin versant M'Dez aura sûrement d'importantes retombés socio-économiques, mais aussi environnementales et écologiques, notamment vis-à-vis de la retenue Allal Al Fassi.

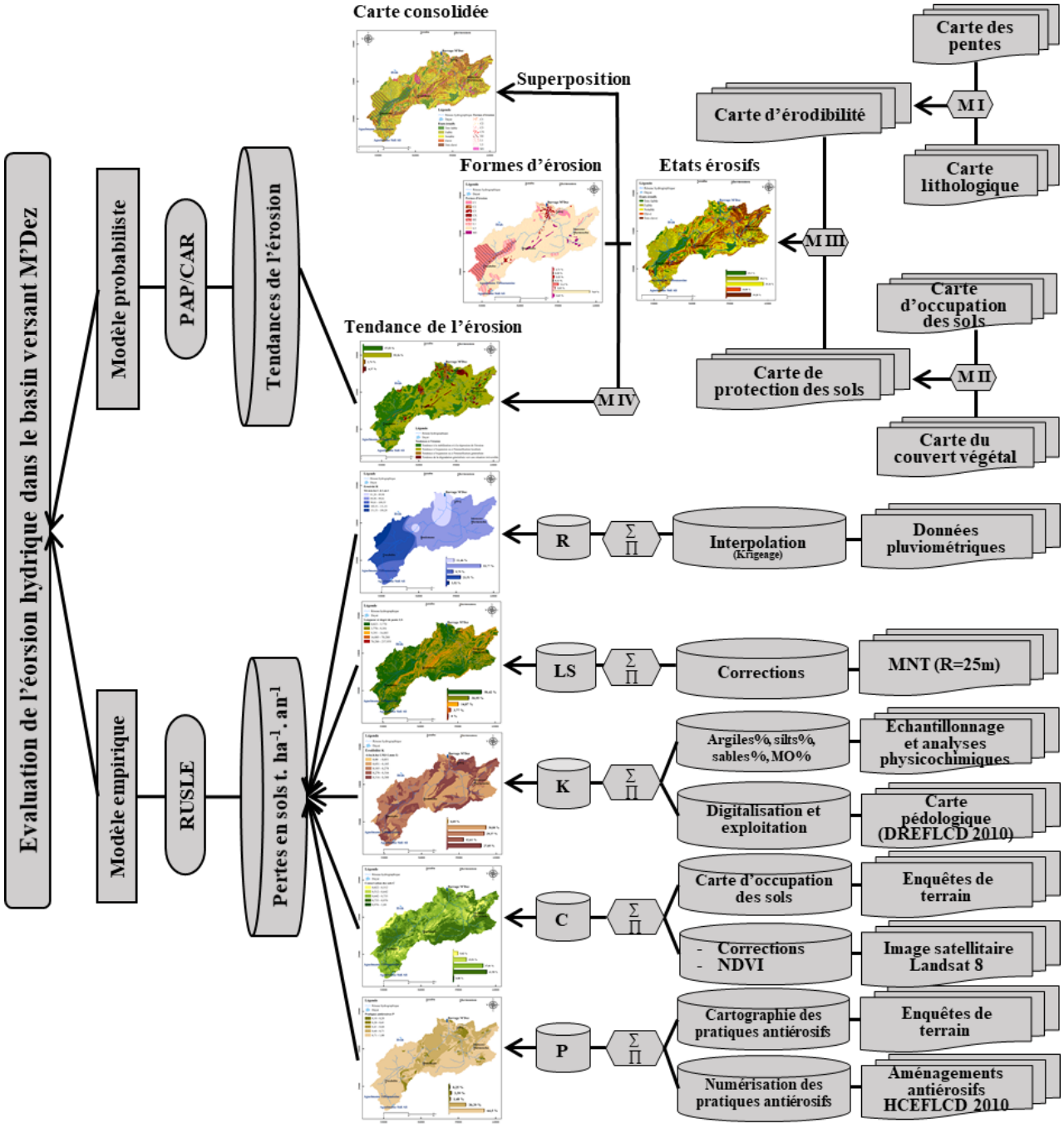


Figure 124: Organigramme méthodologique de l'évaluation de l'érosion dans le bassin versant M'Dez

Le bassin versant M'Dez fait l'objet de l'évaluation et la quantification de l'érosion hydrique et ses facteurs causaux par deux modèles. Le premier est probabiliste par l'application des directives du Centre d'activités régionales pour le Programme d'Actions Prioritaires (PAP/CAR) pour l'étude de la susceptibilité. Le deuxième est empirique par l'équation des pertes en sols révisée RUSLE pour la quantification de l'érosion (Figure 124). L'objectif est de déterminer les facteurs causaux responsables de l'érosion hydrique et leurs interactions afin d'avoir une visibilité sur le taux d'envasement de la retenue, de développer des mesures de contrôle pour éviter de nouvelles dégradations et d'estimer avec précision les pertes en sols *(Boardman et Poesen, 2006)*. Ces informations spatiales, tant qualitatives que quantitatives, contribuent de manière significative à la gestion de la conservation des sols, au contrôle de l'érosion, à l'aménagement des bassins versants et à la prévention de l'envasement de la retenue du barrage M'Dez *(Prasannakumar et al., 2011)*.

II.1. Evaluation de la susceptibilité et des tendances de l'érosion

L'évaluation de la susceptibilité et des tendances de l'érosion est réalisée en moyennant un modèle probabiliste par la méthode PAP/CAR (Centre d'Activités Régionales du Programme d'Actions Prioritaires), visant à définir les tendances et l'érosion potentielle dans le bassin versant M'Dez. Il s'agit d'un ensemble de directives pour la formulation d'un programme de lutte antiérosive dans le cadre du plan d'action pour la méditerranée (PAM) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) qui permet de cartographier l'érosion. Cette méthode se base sur un ensemble de facteurs naturels qui conditionnent le régime érosif : des facteurs invariants comme la lithologie et la topographie et des facteurs variants comme la densité de la couverture végétale et l'occupation des sols (Figure 124).

II.1.1. Approche prédictive

II.1.1.1. Carte des pentes

L'analyse de la carte des pentes montre que le bassin versant M'Dez est caractérisé par la prédominance de pentes faibles et moyennes. Les classes des pentes inférieures à 20 % s'étendent sur environ 67 % de la superficie totale, notamment dans la vallée de M'Dez, la vallée d'El Adrej et la vallée de Guigou, contre 33 % pour les classes des pentes dépassant 20 %. Les pentes fortes à très fortes, sont localisées dans les zones montagneuses, notamment aux Jbel Bou Iblane et Jbel Tichoukt (Figure 125).

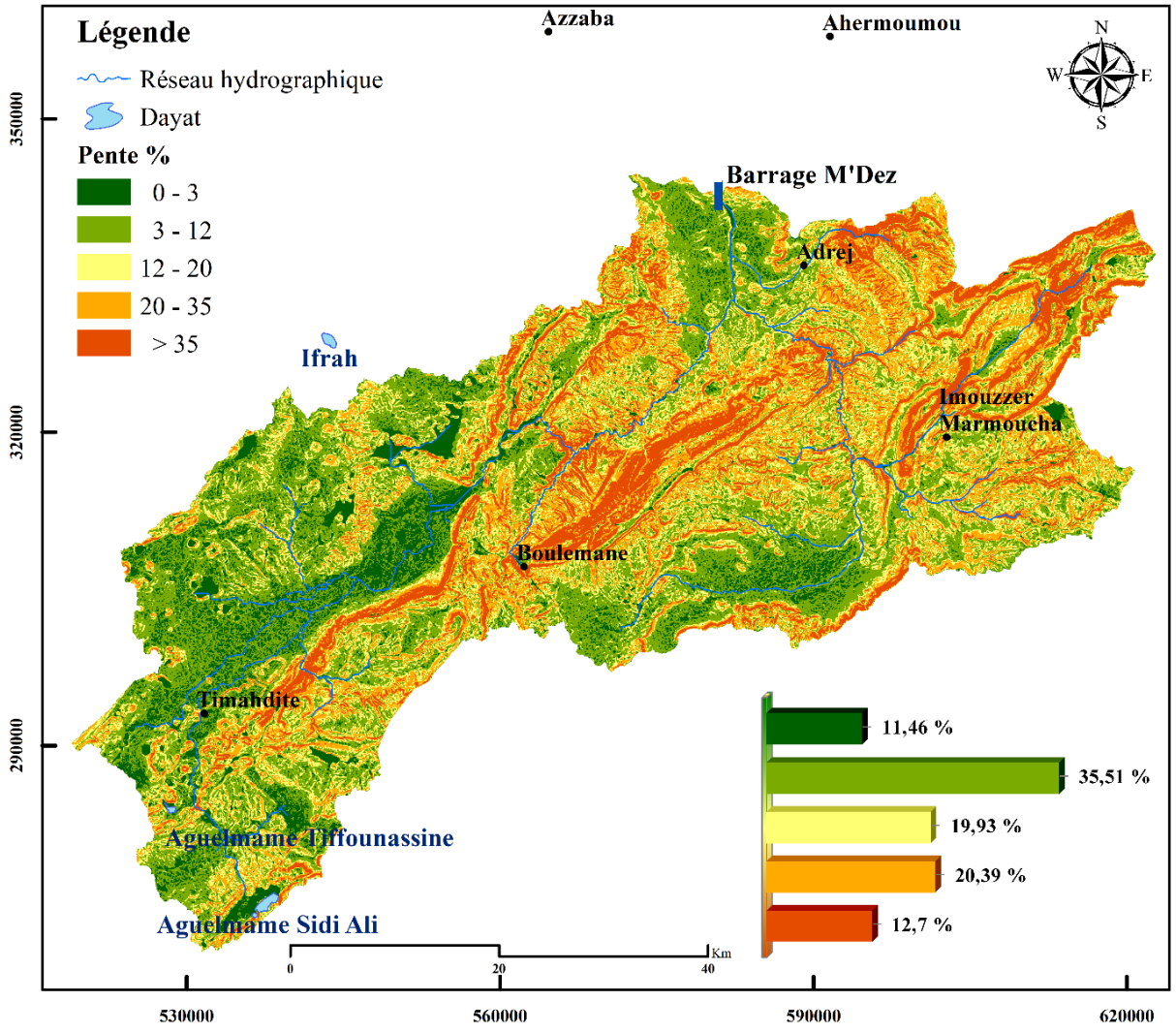


Figure 125: Carte des pentes du bassin versant M'Dez

II.1.1.2. Carte lithologique

La carte de lithofaciès réalisée à partir de la carte géologique, répartit le bassin versant en cinq classes en fonction du degré de friabilité des roches, en attribuant un code pour chaque degré allant de 1 pour les roches dures à 5 pour les roches friables (Tableau 43).

La répartition des lithofaciès selon les directives PAP/CAR montre une alternance dans l'espace de faciès compact constitué de roche cohésif et de faciès meuble constitué de sédiment ou sol meuble, non cohésif et de faible résistance. 58,77% de la superficie totale du bassin versant présente des terrains de résistance mécanique forte à extrême et correspondent aux calcaires et dolomies du Lias et calcaires lacustres, contre 17,3% présentant une résistance mécanique faible à très faible correspondant aux argiles et basaltes doléritiques altérés du Trias, marnes et grès du Miocène et alluvions du Quaternaire. Les terrains à résistance moyenne

s'étalent sur 23,93% de la superficie totale et correspondent aux couches de marnes en alternance avec des bancs de grès (Figure 126).

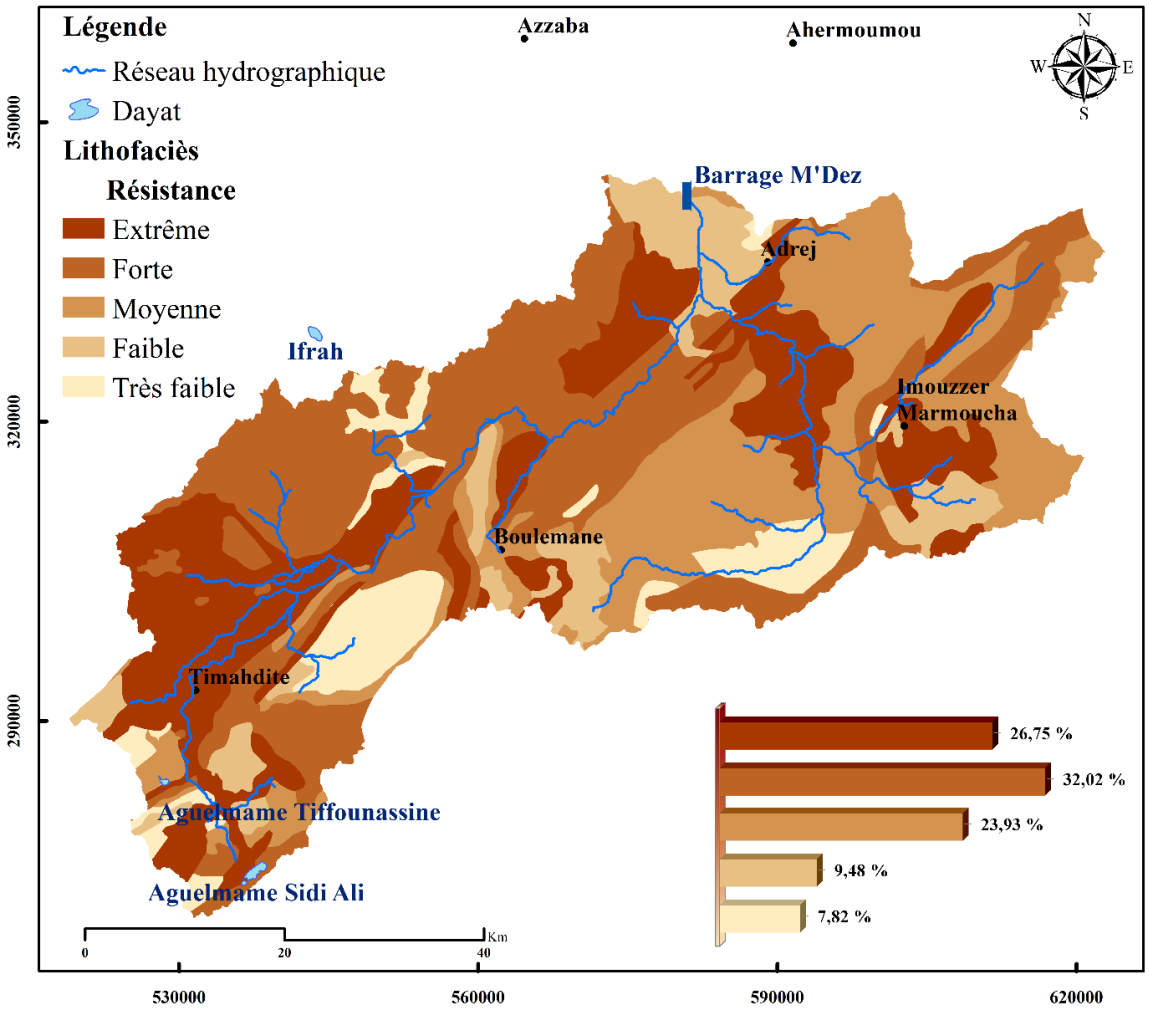


Figure 126: Carte lithologique du bassin versant M'Dez

II.1.1.3. Carte d'érodibilité

La carte d'érodibilité hiérarchise le bassin versant en cinq classes allant du degré faible au degré extrême. Les classes sont définies en fonction de la raideur des pentes et la friabilité du substrat. Plus la pente est forte et le terrain est friable, plus le degré d'érodibilité est fort (Figure 127).

La carte montre que la classe dominante est celle du degré d'érodibilité faible avec 31,28% de la superficie du bassin versant, suivie de celle du degré d'érodibilité moyen avec 25,49% de la superficie. Les terrains fortement à extrêmement érodés représentent 23,53% de la superficie totale. L'analyse de la carte montre que l'érodibilité est forte à extrême sur les terrains de faible résistance et à forte pente notamment dans la partie est du bassin versant.

Contrairement à la partie ouest où les terrains sont plus résistants avec un faible degré de pente (inférieur à 12%), et d'une érodibilité moins inquiétante avec un degré faible à modéré. On en déduit que les pentes rectilignes accentuent le degré d'érodibilité *(Roose et Sarrailh, 1990)*. Paradoxalement dans la partie centrale où existent des terrains friables avec un degré de pente faible à modéré, le degré d'érodibilité est moyen à modéré. On en décompte que les faibles pentes atténuent le degré d'érodibilité (Figure 127).

En général, le bassin versant M'Dez peut être subdivisé en deux grands ensembles de classes d'érodibilité, le premier renferme les classes faible et modérée et le deuxième renferme les classes moyenne, forte et extrême. Cette subdivision coïncide avec la subdivision structurale du Moyen Atlas, séparant le Causse moyen atlasique tabulaire et le Moyen Atlas plissé *(Charrière, 1990 ; Martin, 1988)*.

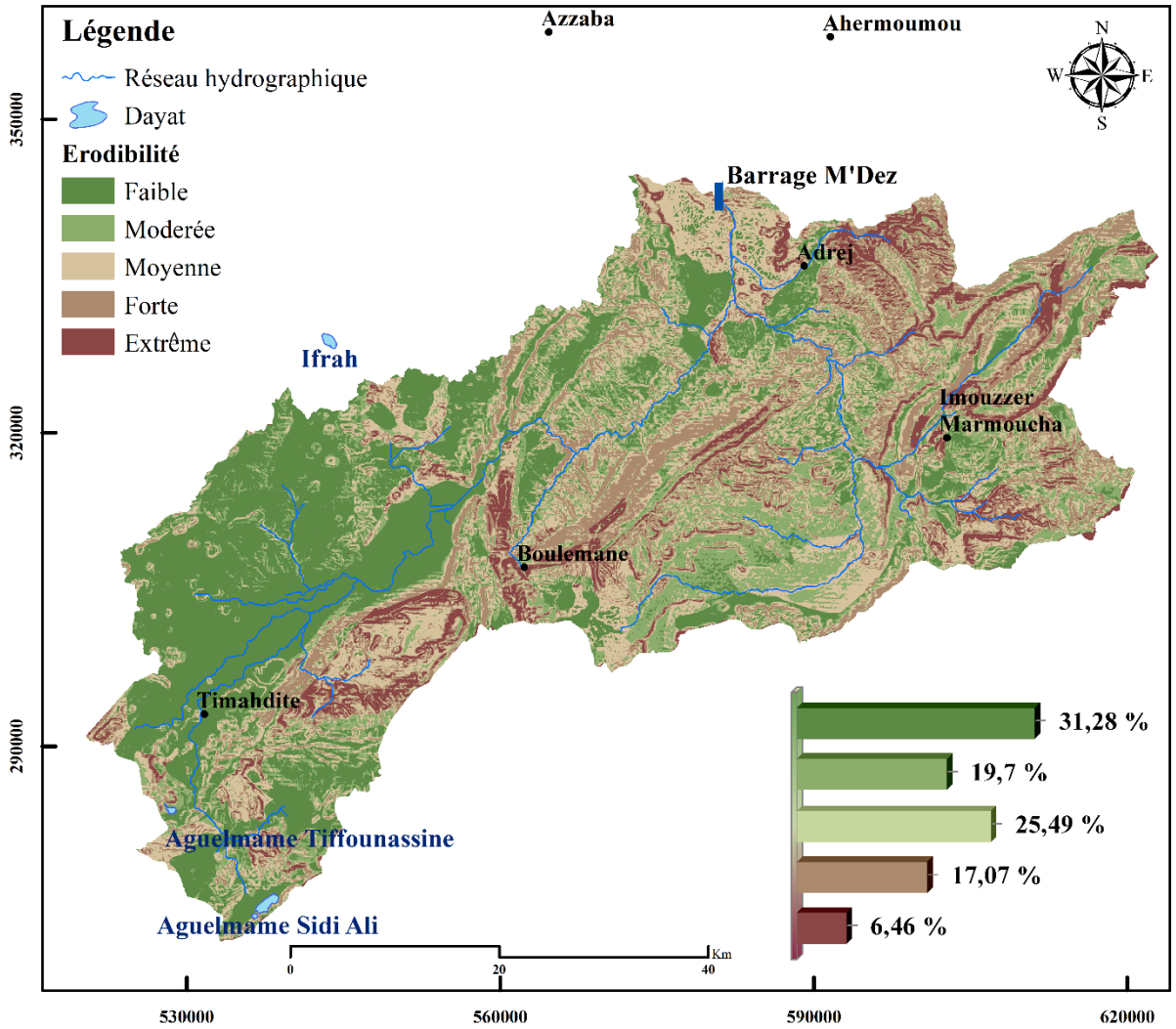


Figure 127: Carte d'érodibilité du bassin versant M'Dez

II.1.1.4. Carte d'occupation des sols

Tenant compte des différentes dégradations que peut subir la couverture végétale dans le temps et dans l'espace, une carte d'occupation des sols du bassin versant de M'Dez actuelle a été réalisée en se basant sur l'investigation du terrain, sur la télédétection (analyse et traitement d'images satellitaires Landsat 8) et sur la carte d'occupation des sols du bassin versant Allal Al Fassi *(El Kamel et al., 2020b)*.

La carte d'occupation des sols répartit le bassin versant M'Dez en 10 classes dominées par la classe matorral couvrant 28,75% de la superficie totale suivie par celle des steppes à 20,04%. Les terrains agricoles occupent 10,12% de la superficie et les terrains nus et les zones de parcours s'étalent sur 25,36% de la superficie (Figure 128).

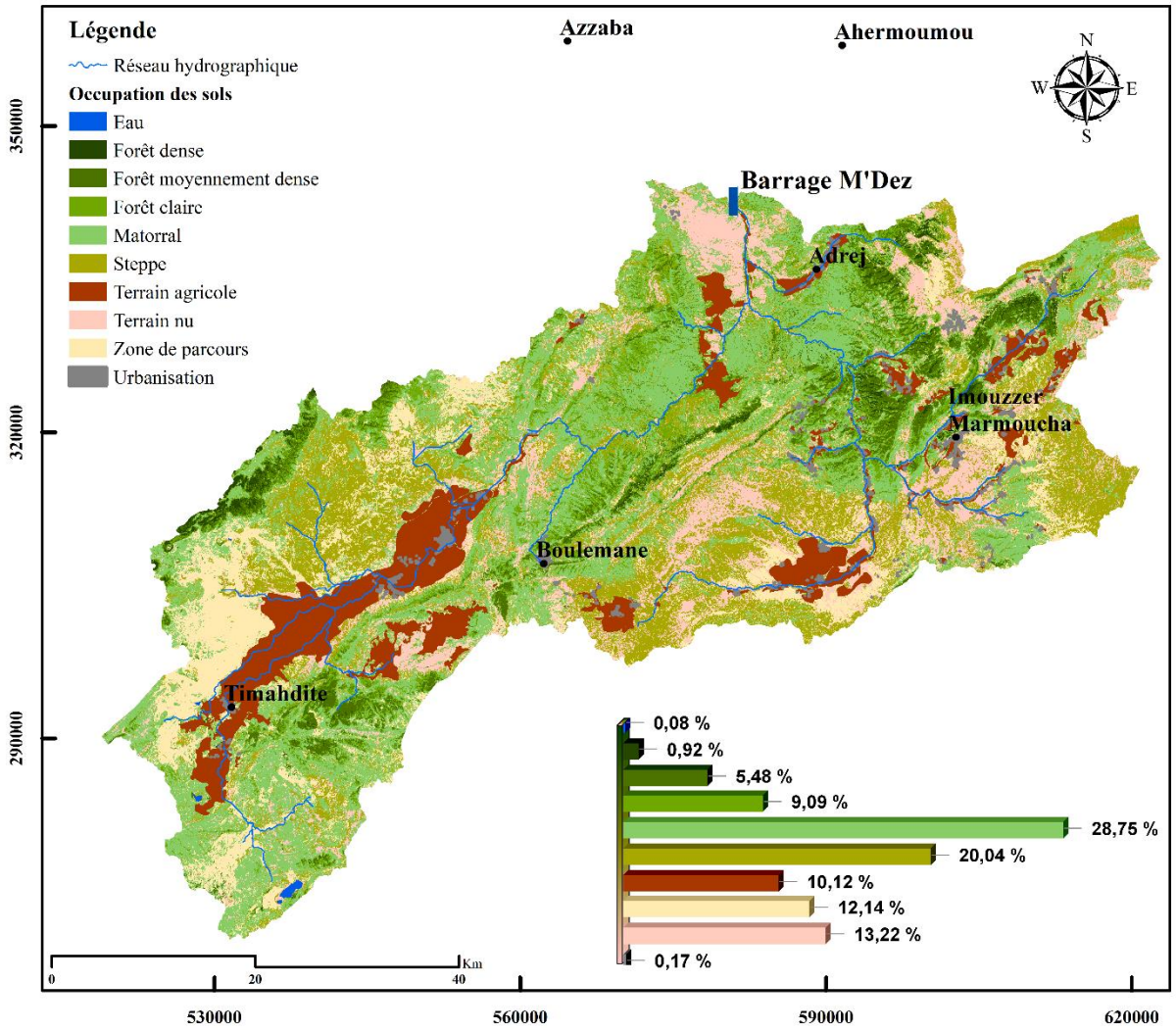


Figure 128: Carte d'occupation des sols du bassin versant M'Dez

II.1.1.5. Carte de densité du couvert végétal

Tenant compte du rôle incontournable que joue la densité du couvert végétal dans le maintien de la résistance des sols, plus le couvert végétal est dense plus la protection du sol est forte et l'action des pluies est minimisée, la carte de densité du couvert végétal est réalisée par le calcul de l'indice normalisé de végétation NDVI, classé selon les pourcentages suggérés par les directives PAP/CAR (Tableau 43). La carte montre que la classe dense est dominante (50% - 75%) avec 30,25% de la superficie du bassin versant suivie de la classe éparse (inférieur à 25%) avec environ 30% de la superficie. La classe moyenne (25% - 50%) est la moins représentée enregistrant une valeur de 16,54%.

Le couvert végétal du bassin versant M'Dez est donc relativement dense, les classes dense (50% - 75%) et très dense (supérieur à 75%) représentent 53,49% de la superficie totale (Figure 129).

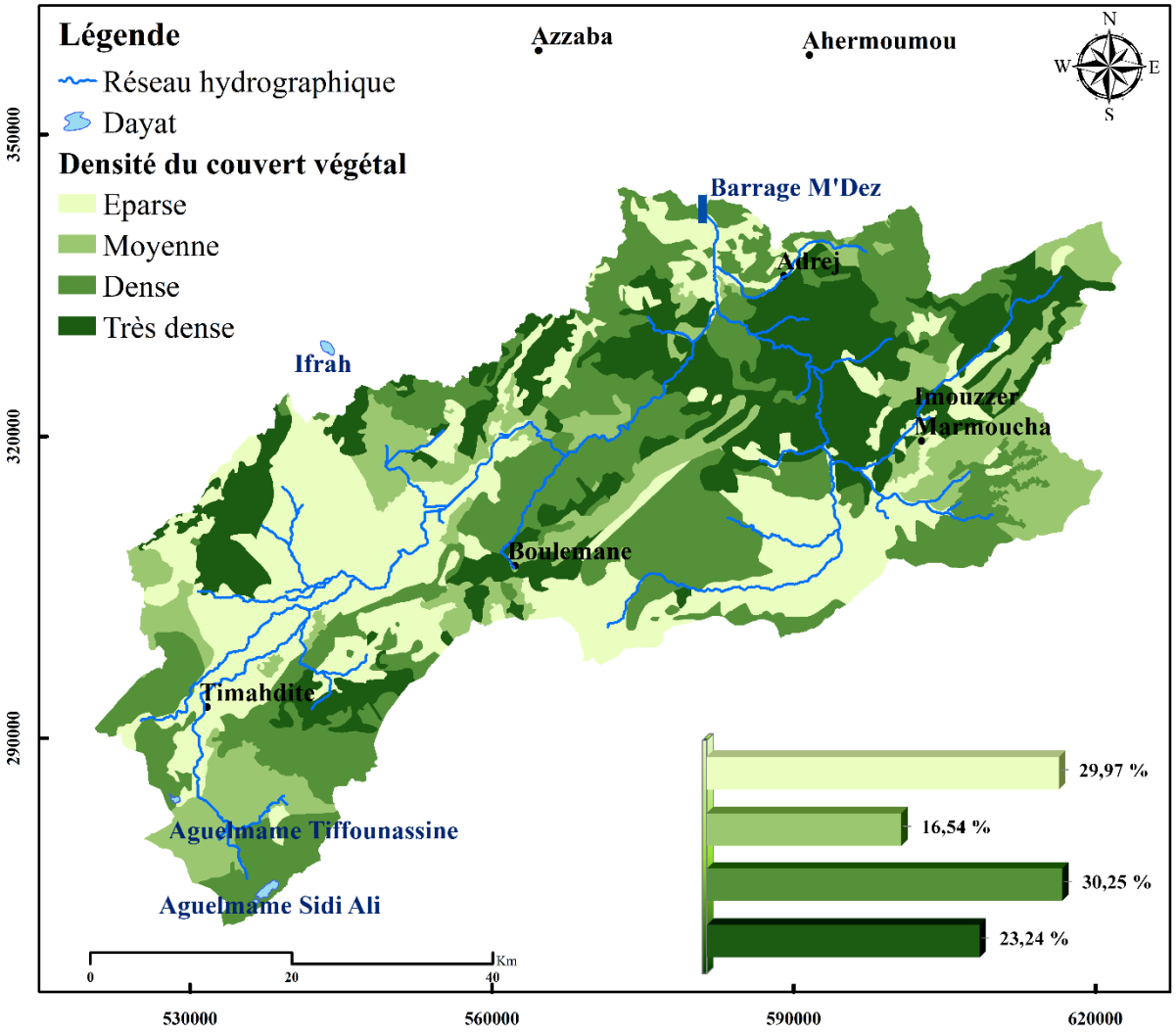


Figure 129: Carte de densité du couvert végétal du bassin versant M'Dez

II.1.1.6. Carte de protection des sols

La carte de protection des sols résultante de l'intersection de la carte d'occupation des sols et la carte de densité du couvert végétal selon la matrice II (Tableau 44) hiérarchise le bassin versant en cinq classes allant de très élevée à très faible. L'analyse de cette carte montre que le bassin versant M'Dez est bien protégé. La classe dominante a un degré de protection élevé en couvrant 41,57% de la superficie totale, suivie par celle qui a un degré de protection très élevé sur 33,46% de la superficie. Ces deux classes, existent partout dans le bassin versant, mais dominent la partie sud-est (Figure 130). Les zones à degré de protection des sols faible à très faible sont éparses et couvrent 17,14% de la superficie totale. Elles coïncident avec les zones à terrains agricoles et terrains nus, avec une très faible densité du couvert végétal. La classe de protection des sols moyenne représentant 7,82% et coïncide avec les zones de parcours et les steppes ayant une densité du couvert faible à moyenne.

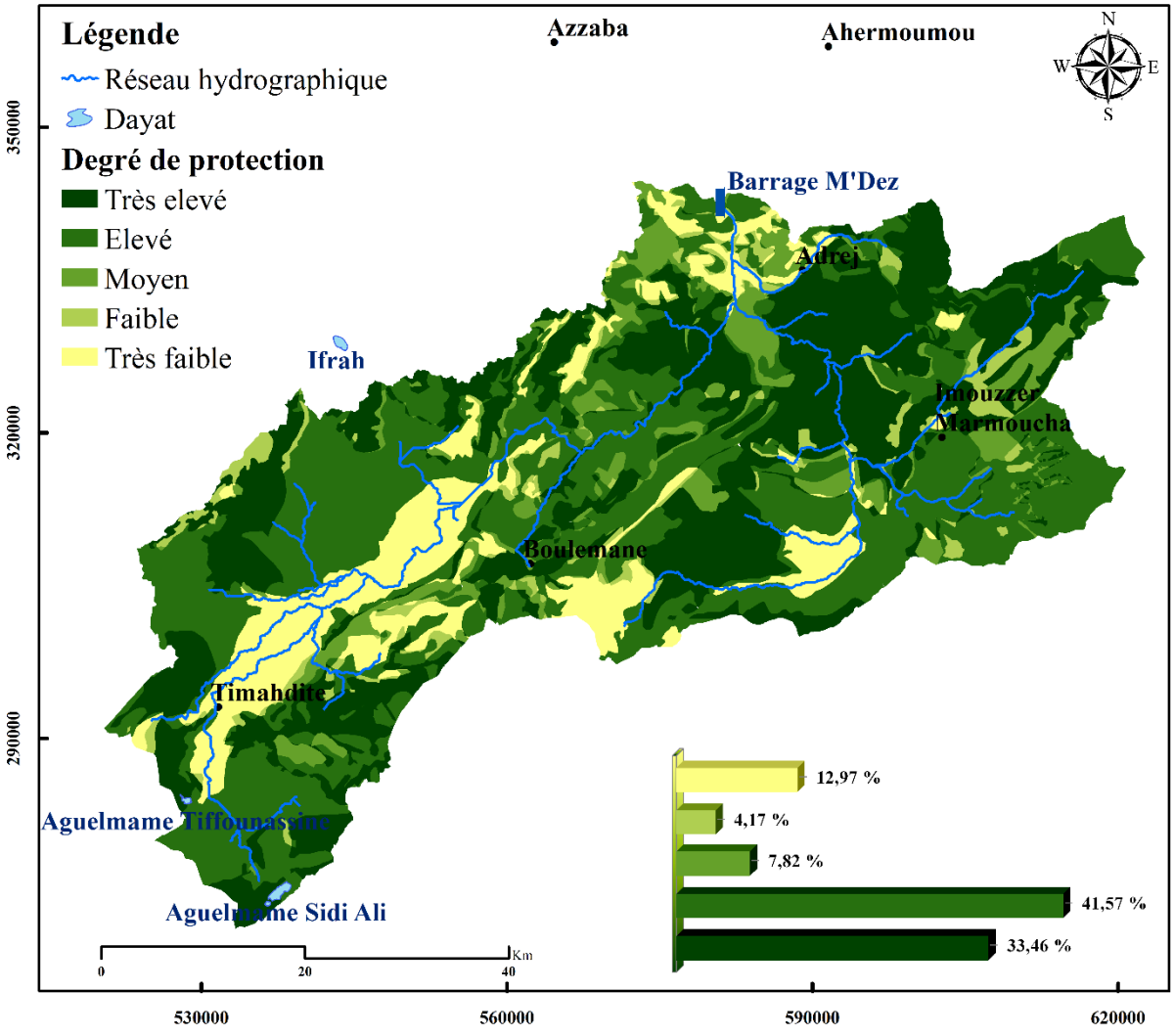


Figure 130: Carte de protection des sols du bassin versant M'Dez

II.1.1.7. Carte des états érosifs

La carte des états érosifs qui constitue l'étape finale de l'approche prédictive, est hiérarchisée en cinq états d'érosion par l'intersection de la carte d'érodibilité et la carte de protection des sols selon la matrice III (Tableau 44). Son analyse montre que la classe de l'état d'érosion notable est dominante et représente 29,34% de la superficie du bassin versant suivie par la classe faible couvrant 25,2%. Les classes élevée et très élevée couvrent 30,16% de sa superficie. Les zones les plus érodées se situent principalement dans le Moyen Atlas plissé notamment dans la partie est et le centre du bassin versant en suivant la raideur des pentes, notamment au niveau de Jbel Tichoukt et Jbel Bou Iblane (Figure 131).

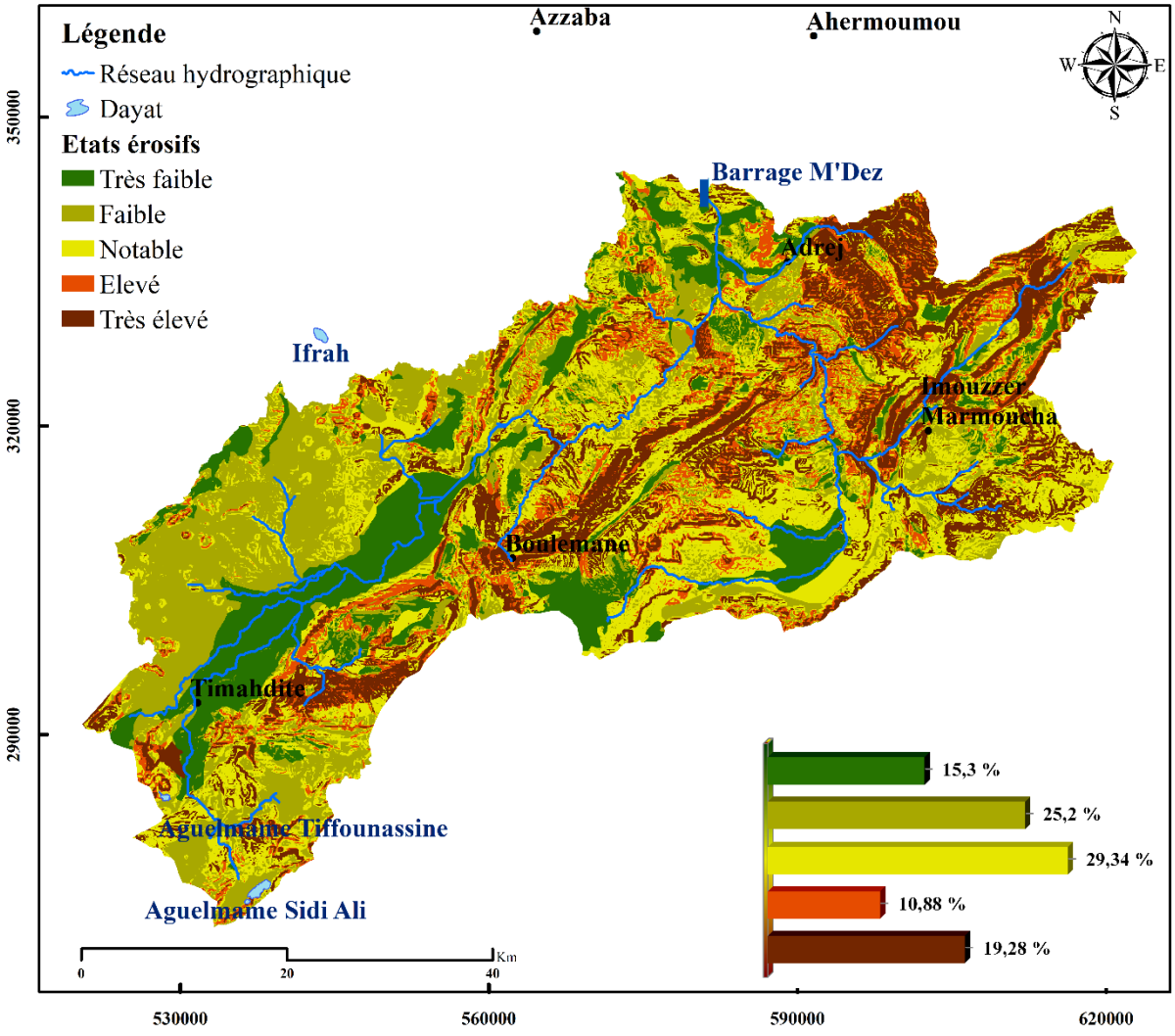


Figure 131: Carte des états érosifs du bassin versant M'Dez

Le traitement de la base de données montre que l'érosion hydrique prend de l'ampleur sur les pentes raides et les lithofaciès peu résistants mais pas nécessairement dans les zones à

faible couvert végétal. Les faibles pentes peuvent diminuer l'état de l'érosion même à faible degré de protection des sols (occupation des sols à état dégradé et faible densité du couvert végétal). Il en déroule que plus de la moitié de la superficie du bassin versant M'Dez (59,5%) est vulnérable à l'érosion hydrique (états érosifs notable, élevé et très élevé).

II.1.2. Approche descriptive

L'approche descriptive consiste à élaborer une carte de l'érosion réelle décrivant qualitativement les processus et les formes d'érosion par observation directe sur le terrain. Pour ce faire, la carte pédologique du bassin versant Allal Al Fassi (DREFLCD-FB) et la carte des formes de l'érosion des deux bassins de Beni Alaham et Al Azhar *(Faleh et Maktite, 2014)* sont rectifiées au moyen d'un navigateur satellitaire et d'observations sur le terrain.

La carte des formes d'érosion est réalisée conformément aux directives de la méthode PAP/CAR en attribuant un code sous forme de lettre (L, D, C…) pour chaque forme d'érosion suivie d'un chiffre pour l'agressivité du processus (1, 2, 3, X) (Tableau 46).

Dans le bassin versant M'Dez, le décapage superficiel et le ruissellement diffus (L3) se développent partout. Il représente environ 76,8 % de la superficie du bassin versant. Les rigoles et ravins superficiels (D2) arrivent en deuxième position, après le décapage, sur environ 11,2% de la superficie. Ils apparaissent en automne dans les sols labourés après chaque averse importante et sont effacés avec les labours et évoluent généralement en formes plus importantes sur les terrains non exploitables *(Mesrar, 2016)*. Les autres formes d'érosion (C1, C2, C3, Cx, L1, M1) sont plus rares et éparses sur différents lithofaciès du bassin versant (Figure 132).

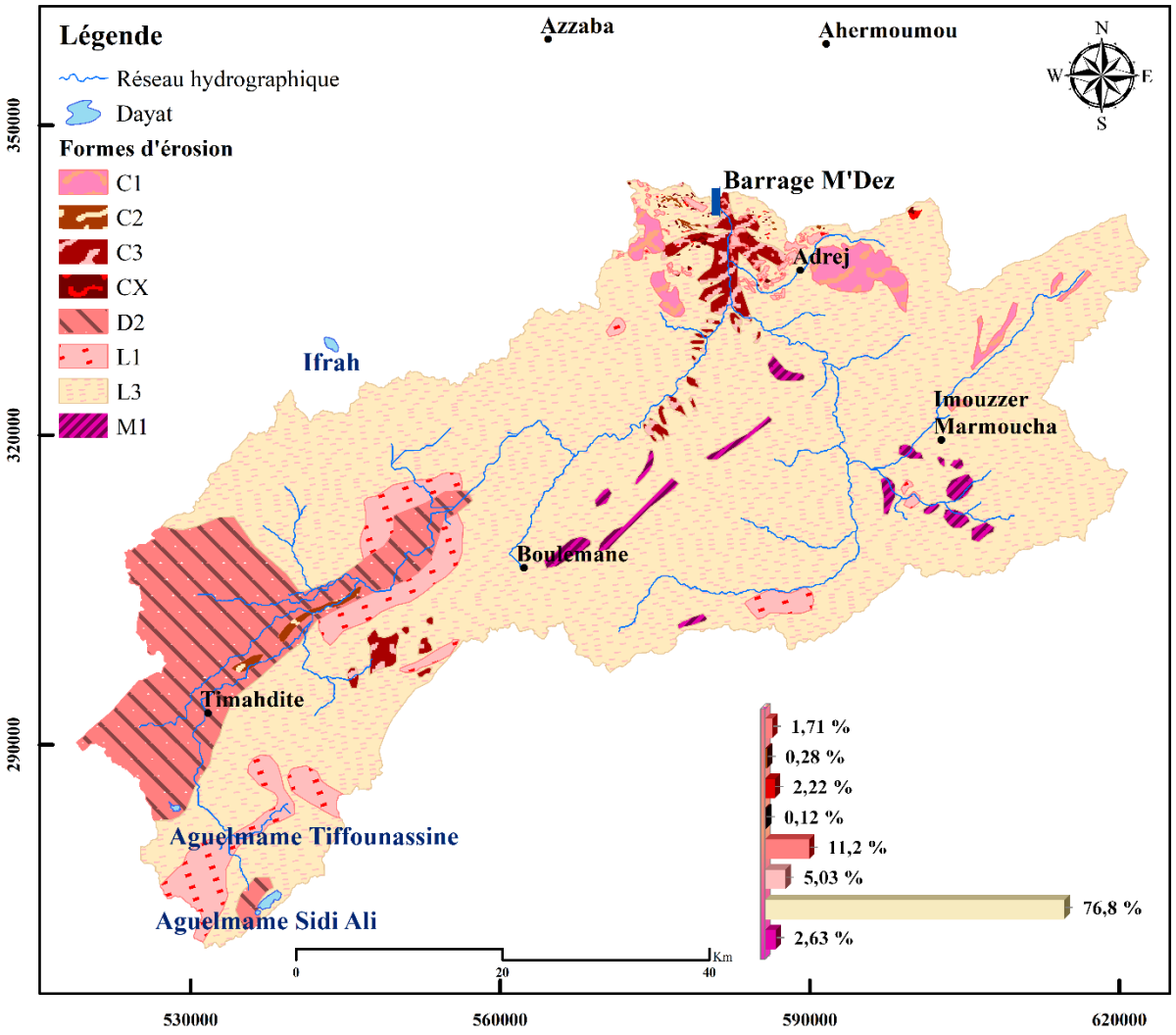


Figure 132: Carte des formes de l'érosion du bassin versant M'Dez

II.1.3. Approche d'intégration

L'approche d'intégration est la combinaison des résultats des approches précédentes, prédictive et descriptive, et consiste à réaliser la carte consolidée et la carte des tendances de l'érosion.

II.1.3.1. Carte consolidée

La carte consolidée est le résultat de la superposition des cartes des états érosifs et des formes d'érosion (Figures 131, 132). Elle est qualifiée de carte qualitative qui présente des informations complètes sur les différents aspects du phénomène d'érosion.

La carte consolidée montre que les principales formes d'érosion avoisinent le réseau hydrographique principal et se localisent dans toutes les zones de différents degrés d'érodibilité. Les ravins moyennement profonds coïncident avec les zones où l'état érosif est faible à notable,

notamment dans la partie nord où leur présence peut être liée à la forte pente et à l'agressivité des pluies. Malgré ces conditions, il y a des zones qui n'atteignent pas le degré extrême d'érosion qui ne peut être expliqué que par la forte densité du couvert végétal

Les ravinements profonds et les glissements de terrain sont liés surtout aux terrains à forte pente et faible densité du couvert végétal, en présentant un degré d'état érosif élevé à très élevé. La partie avale du bassin versant est marquée par la forme d'érosion en nappe, caractérisée par une faible pente, un faible couvert végétal et un état érosif notable à élevé (Figure 133).

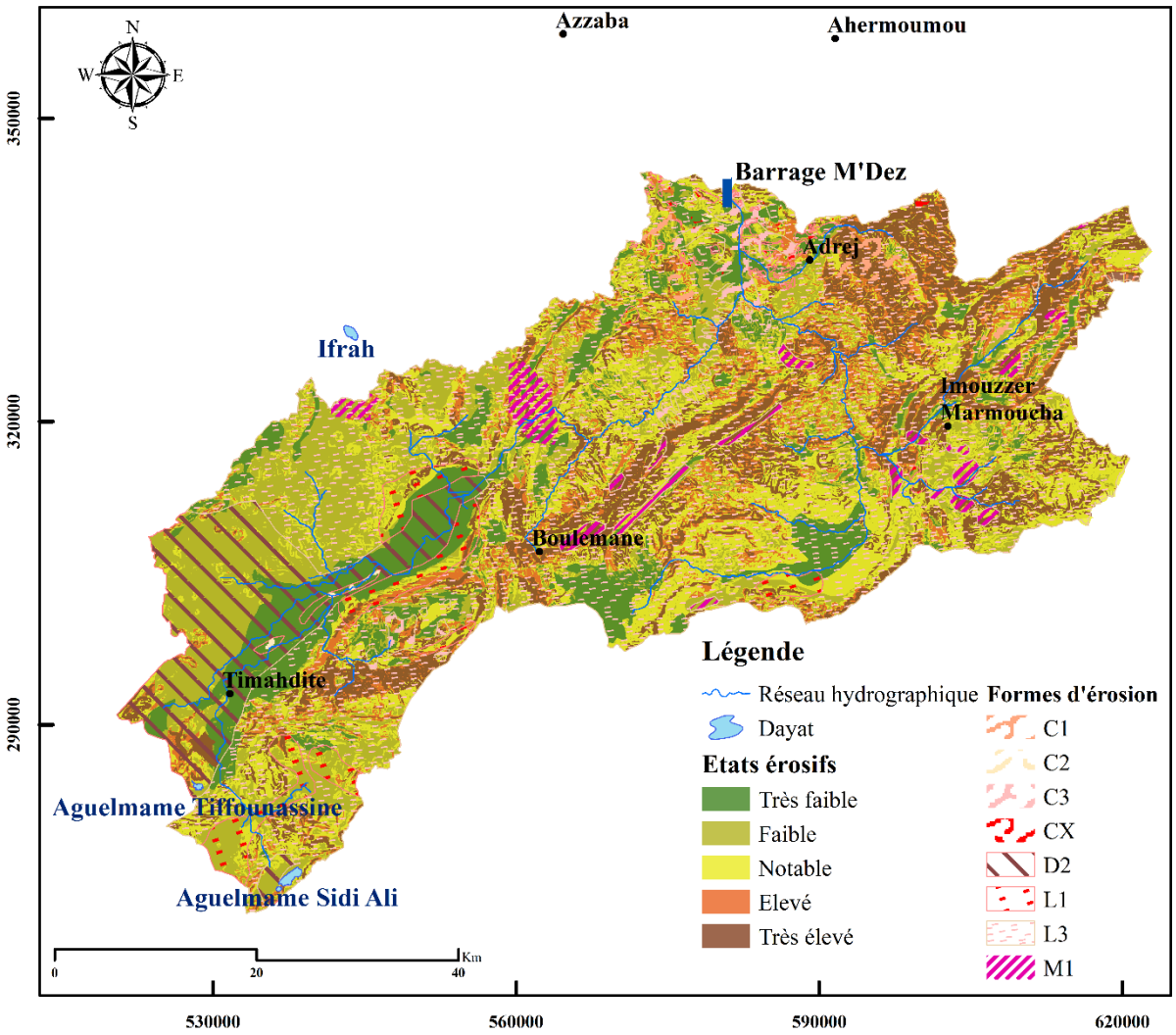


Figure 133: Carte consolidée du bassin versant M'Dez

II.1.3.2. Carte des tendances de l'érosion

La carte des tendances de l'érosion permet de hiérarchiser le bassin versant en quatre classes en tenant compte des états érosifs et des formes d'érosion. Selon la matrice IV (Tableau 48), les tendances de l'érosion sont exprimées par un indice de 1 à 4 (Tableau 47).

L'analyse de la carte montre que les tendances de la dégradation généralisée vers une situation irréversible couvrant une superficie de 4,37% et les tendances à l'expansion ou à l'intensification généralisée couvrant une superficie de 2.74%, coïncident avec les formes d'érosion C1, C2, C3, Cx et M1 et les états érosifs élevés à très élevés. Environ 55% de la superficie du bassin versant présente des tendances à l'expansion ou à l'intensification localisée, notamment à l'Est, coïncidant surtout avec les formes d'érosion L1 et L3 et les états érosifs élevés à très élevés. La classe des tendances à la stabilisation et à la régression de l'érosion couvre environ 40% de la superficie totale et coïncide avec les états érosifs faibles à très faibles (Figure 134).

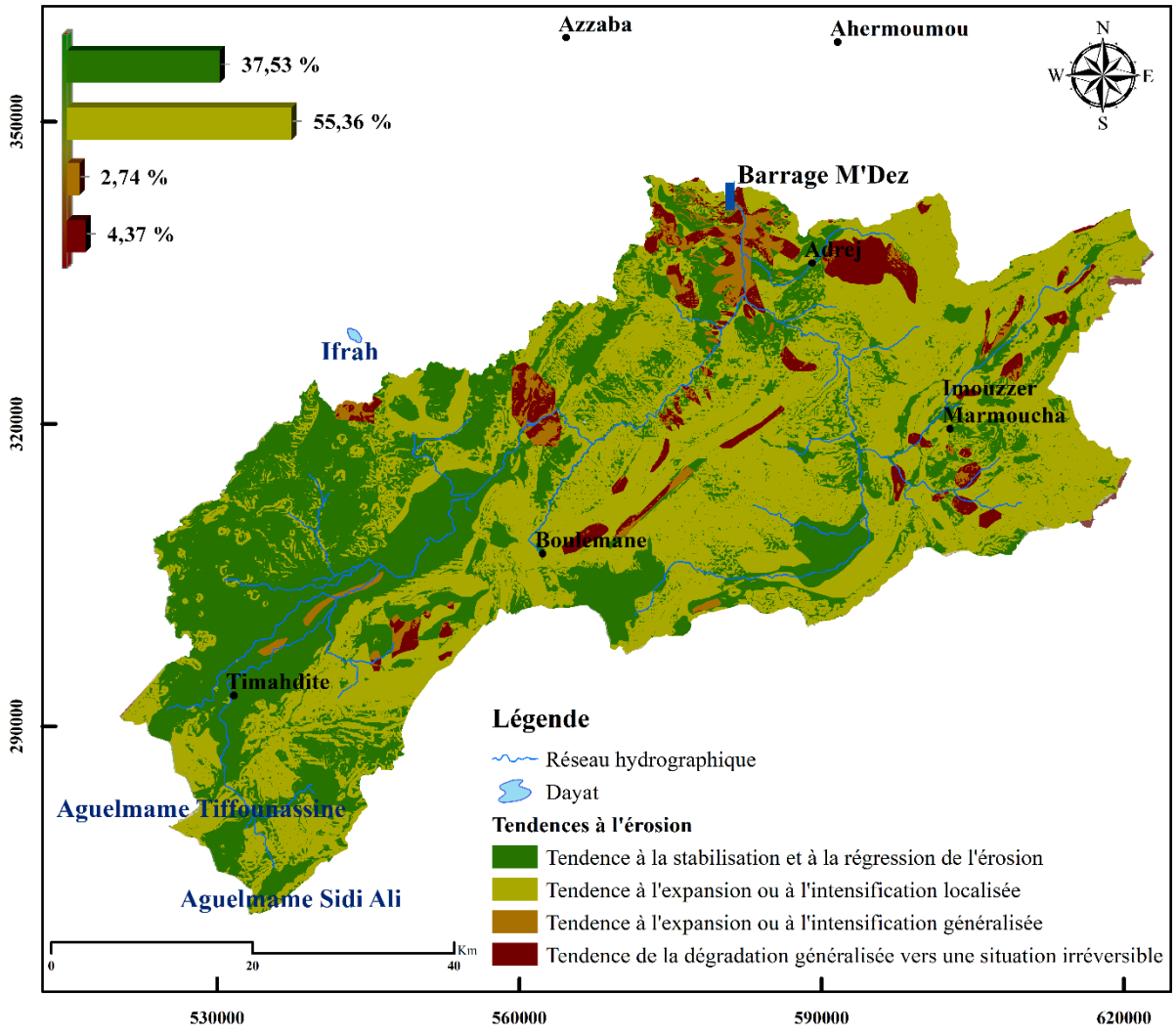


Figure 134: Carte des tendances de l'érosion du bassin versant M'Dez

II.2. Quantification des pertes en sols

Le modèle mathématique par l'équation universelle des pertes en sols révisée (RSLE) permet de quantifier l'érosion hydrique en tonnes par hectare par an. Elle intègre cinq facteurs qui sont associés au climat, au sol, à la topographie, à la végétation et à la gestion, à savoir l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité (K), le degré et longueur de pente (LS), la conservation des sols (C) et les pratiques antiérosives (P). L'équation universelle des pertes en sols révisée (RUSLE) est le modèle le plus largement utilisé et accepté pour la quantification des pertes en sols *(Renard et al., 1997 ; Alexakis et al., 2013)*.

II.2.1. Érodibilité (K)

L'érodibilité K exprime la susceptibilité du sol aux détachement et transport des particules. Dans le bassin versant M'Dez, il varie entre 0,00 et 0,38, où 0 correspond aux sols les moins susceptibles à l'érosion et la valeur de 0,38 réfère aux sols très sensibles à l'érosion hydrique. Sa répartition montre que 30,88% de la superficie totale du bassin versant enregistre une érodibilité faible (0,051-0,185), 29,37% enregistre une érodibilité moyenne (0,185 - 0,278) et 39,66% présente une érodibilité forte (0,278 - 0,316) à très forte (0,316 - 0,380) (Figure 135). L'érodibilité est faible pour les sols les plus structurés et les plus évolués, notamment les vertisols, les sesquioxydes et les calcimagnésiques, alors qu'elle est plus forte pour les sols les moins développés et les non structurés à savoir les sols à minéraux bruts, les sols peu évolués et les complexes C2 et C3.

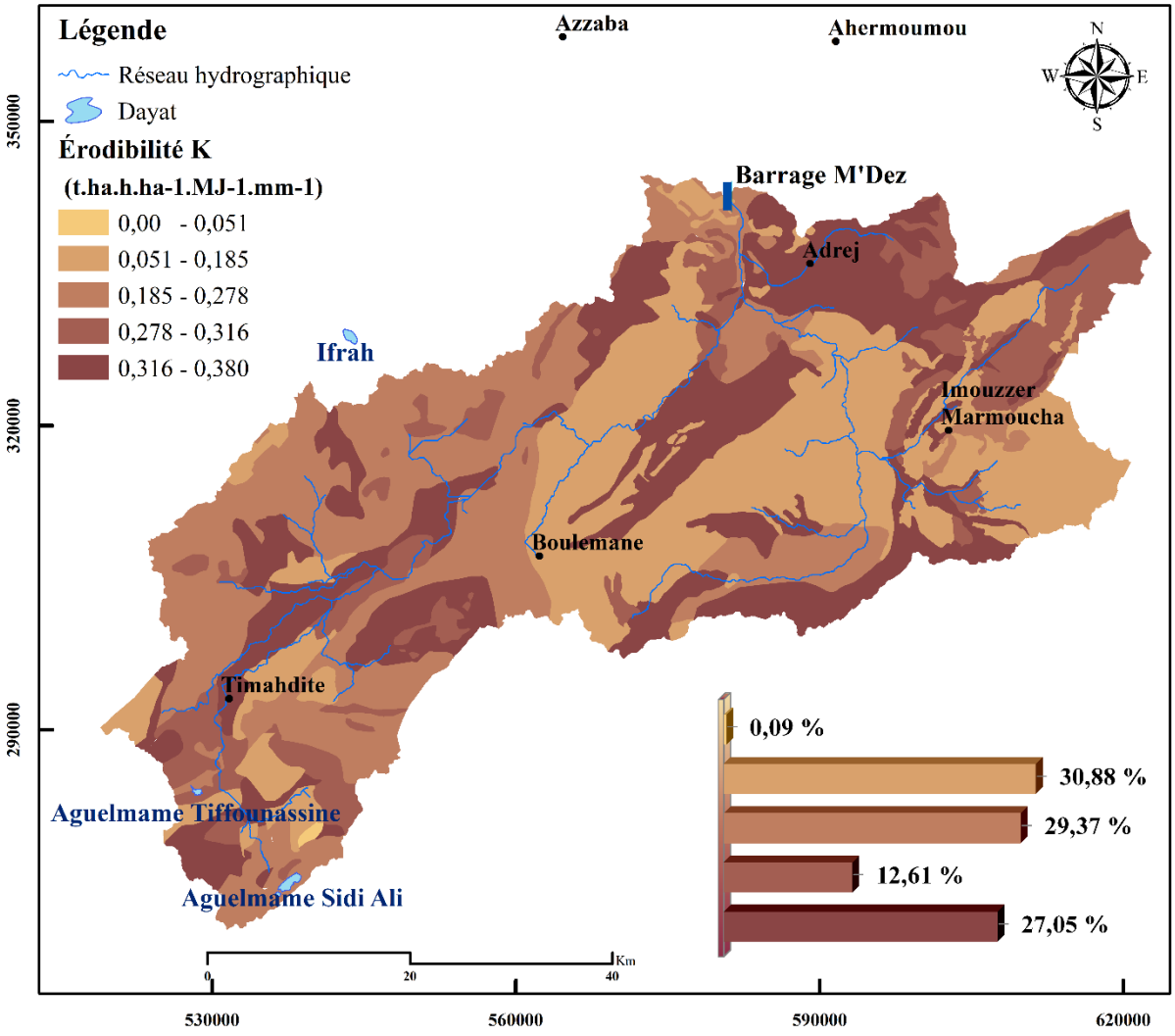


Figure 135: Carte de l'érodibilité K du bassin versant M'Dez

II.2.2. Longueur et degré de pente (LS)

Le facteur LS dans le bassin versant M'Dez varie entre 0,023 et 237,959. Sa répartition montre que 49,25% de la superficie représente la classe très faible (0,023 – 3,770) et 31.39% représente la classe faible (3,770 – 9,391). Les classes moyenne (9,391 – 16,885), forte (16,885 – 70,280) et très forte (70,280 – 237,959) représentent 19,36% de la superficie (Figure 136). 80,64% de la superficie du bassin versant enregistre un facteur LS faible à très faible, localisé principalement dans le Causse moyen atlasique et correspond aux dépressions et cuvettes inter-rides du Moyen Atlas plissé, contre 19,63% de la superficie ayant un facteur LS modéré à très fort localisé essentiellement dans le Moyen Atlas plissé et correspond aux rides.

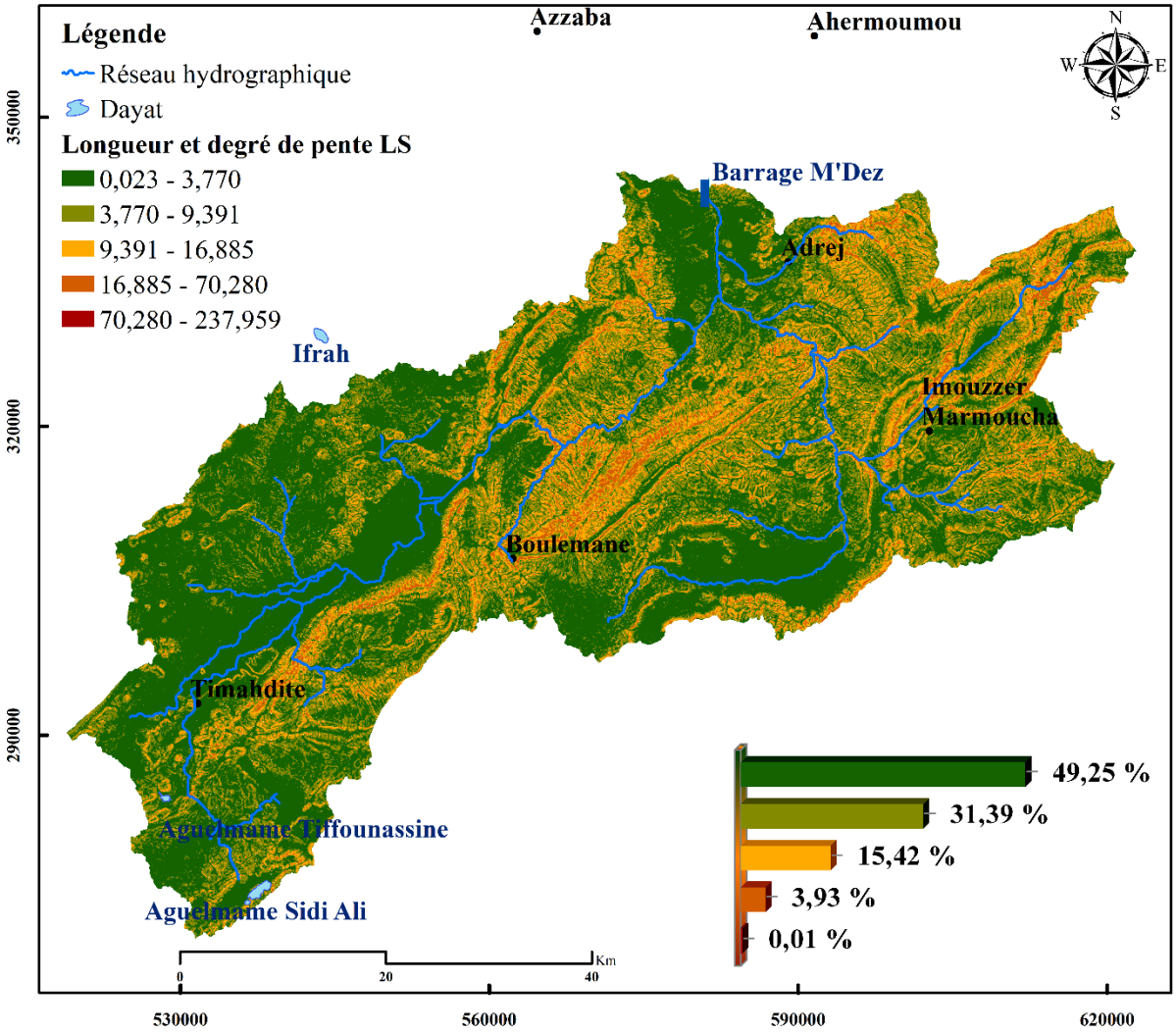


Figure 136: Carte de longueur et degré de pente du bassin versant M'Dez

II.2.3. Érosivité des pluies (R)

La carte de répartition du facteur R montre que 65,23% de la superficie totale enregistre une érosivité faible (89,98 – 99,81) à très faible (81,20 – 89,98). L'érosivité moyenne (99,81–109,55) s'étale sur 9,75% de la superficie du bassin versant, alors que les classes d'érosivité forte (109,55 – 131,53) et très forte (131,53 –180,20) n'occupent que 25,03% (Figure 137). En gros, l'érosivité des pluies a tendance à augmenter de l'aval vers le Sud-Ouest du bassin versant, qui ne pourrait être expliqué que par l'abondance et l'irrégularité des pluies concentrées et agressives au cours de l'année.

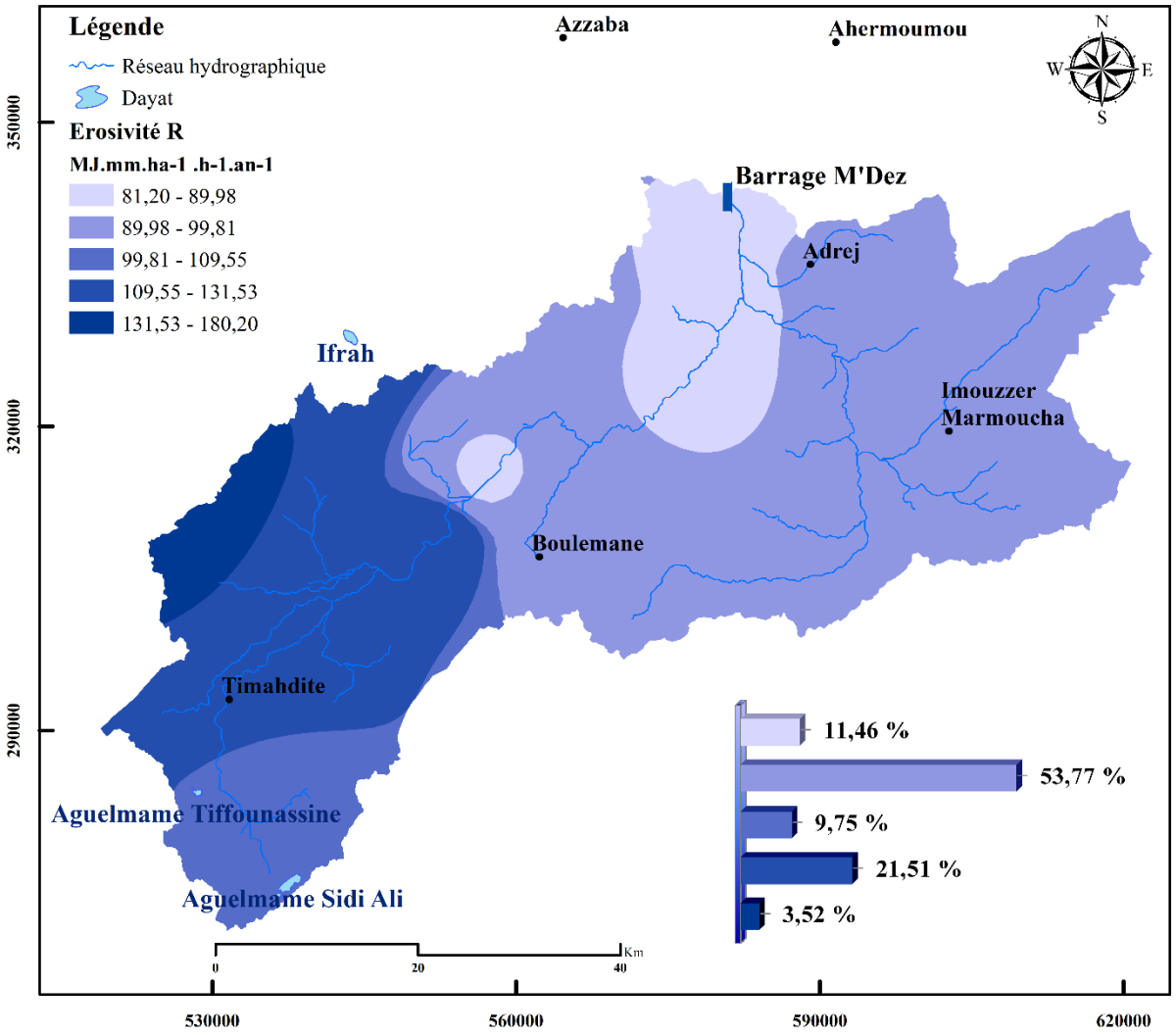


Figure 137: Carte de l'érosivité des pluies du bassin versant M'Dez

II.2.4. Conservation des sols (C)

Le facteur C est le rapport entre l'érosion d'un sol nu et l'érosion d'un sol sous un système de production (Roose E. , 1994). Il est négligeable pour un sol bien couvert toute l'année même avec une forte pente et d'intenses précipitations, et d'une valeur de 1 pour un sol nu. Etant donné que l'énergie cinétique des gouttes de pluie peut être à l'origine de l'érosion des sols, la couverture végétale peut réduire les risques de l'érosion et du ruissellement en protégeant la surface du sol.

La carte de répartition du facteur C dans le bassin versant M'Dez montre que la classe forte (0.733 – 0.976) est la classe dominante avec 41.98% de la superficie et concorde avec des terrains agricoles et sols nus, suivie par la classe médiane (0.642 – 0.733) avec 37.01% de la superficie et correspond aux zones occupées par des matorrals et steppes. Les classes faible (0.512 – 0.642) et très faible (0.022 – 0.512) représentent 20.93 % de la superficie et

correspondent aux terres occupées par les forêts denses, moyennement denses et claires (Figure 138).

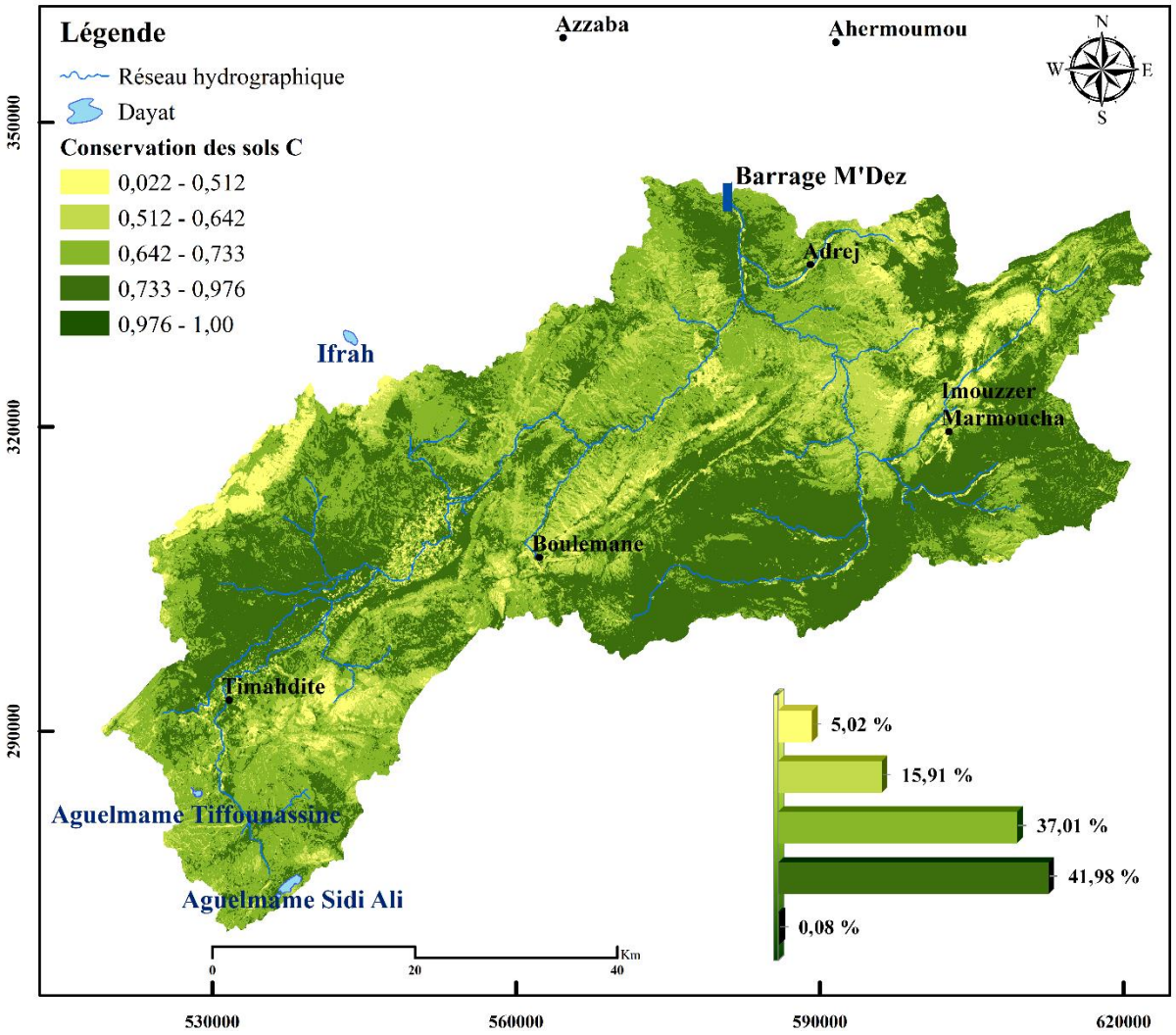


Figure 138: Carte de la conservation des sols du bassin versant M'Dez

II.2.5. Pratiques antiérosives (P)

La répartition du facteur des pratiques antiérosives P dans le bassin versant M'Dez montre que la classe dominante est la classe très forte (0,71 – 1,00) qui correspond à l'absence d'aménagement et/ou des pratiques non durables et couvre 64,50% de la superficie suivie de la classe forte qui représente 30,39%. La classe qui est attribuée aux aménagements de conservation les plus efficaces (0.1 – 0.2) ne représente que 0.25% de la superficie (Figure 139).

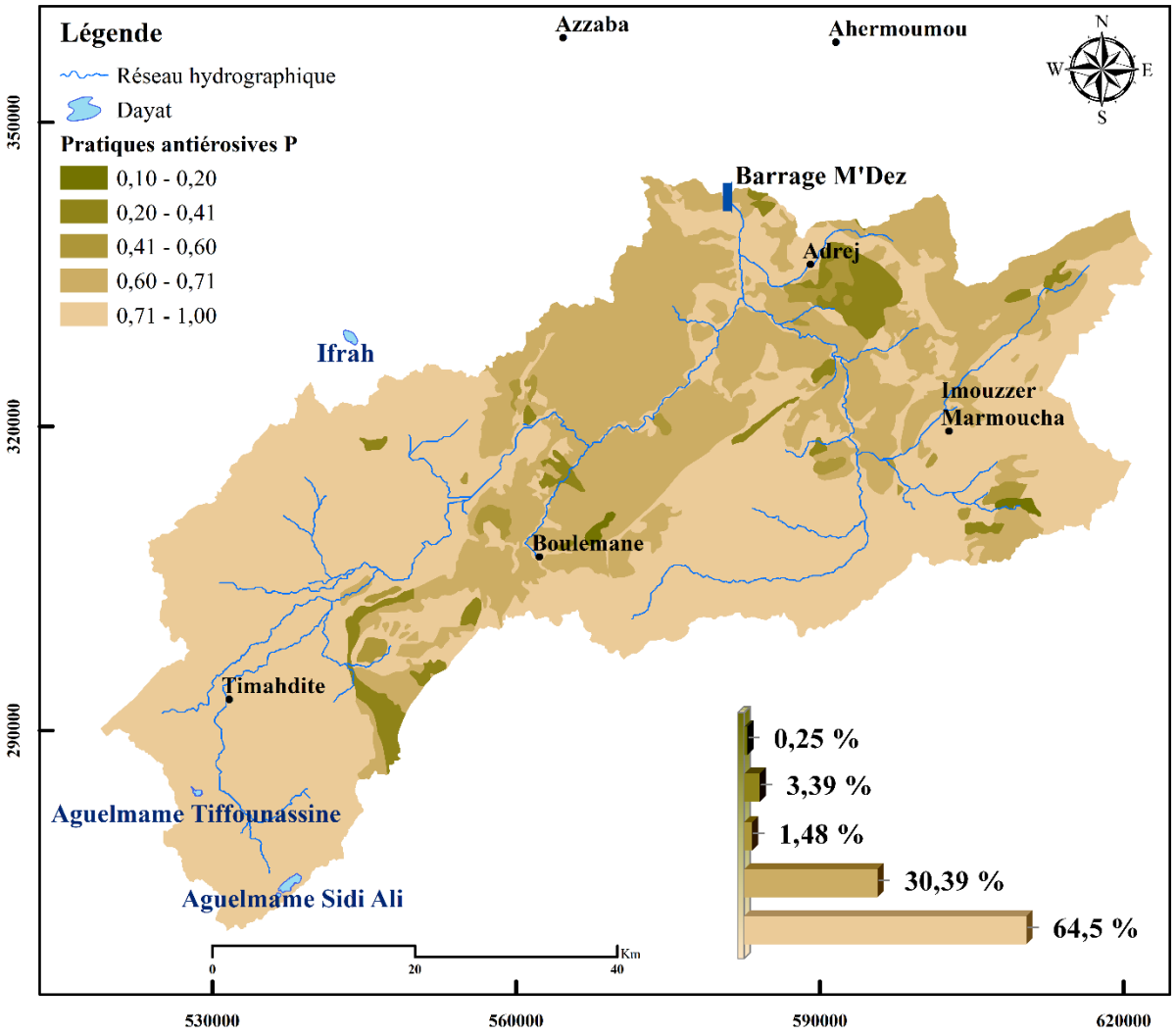


Figure 139: Carte des pratiques antiérosives du bassin versant M'Dez

II.2.6. Pertes en sols (Y)

La quantification des pertes en sols Y dans le bassin versant M'Dez montre qu'elles varient entre 3,58 et 3520,20 t. $ha^{-1}.an^{-1}$ avec une moyenne de 596,08 $t.h^{-1}.an^{-1}$. La carte montre que la classe des pertes très faible est dominante avec 35,58% de la superficie et correspond aux zones à facteurs d'érosivité, de longueur et degré de pente et d'érodibilité, faibles à très faibles, de pratiques antiérosives faibles et de conservation des sols forte. Elle est suivie par la classe des faibles pertes représentant 33,07% de la superficie. Les classes des pertes en sols forte et très forte, représentent 13,14% de la superficie et correspondent aux zones où les sols sont fortement érodibles, à forts degré et longueur de pente et peu ou absence des pratiques antiérosives même si la conservation est très variable et l'érosivité est très faible à faible (Figure 140).

Généralement, les pertes en sols sont plus importantes principalement dans la partie est du bassin versant, là où les pentes sont fortes et longues, les sols sont fortement érodibles avec peu

ou pas d'aménagements malgré un facteur de conservation très variable et une érosivité très faible à faible.

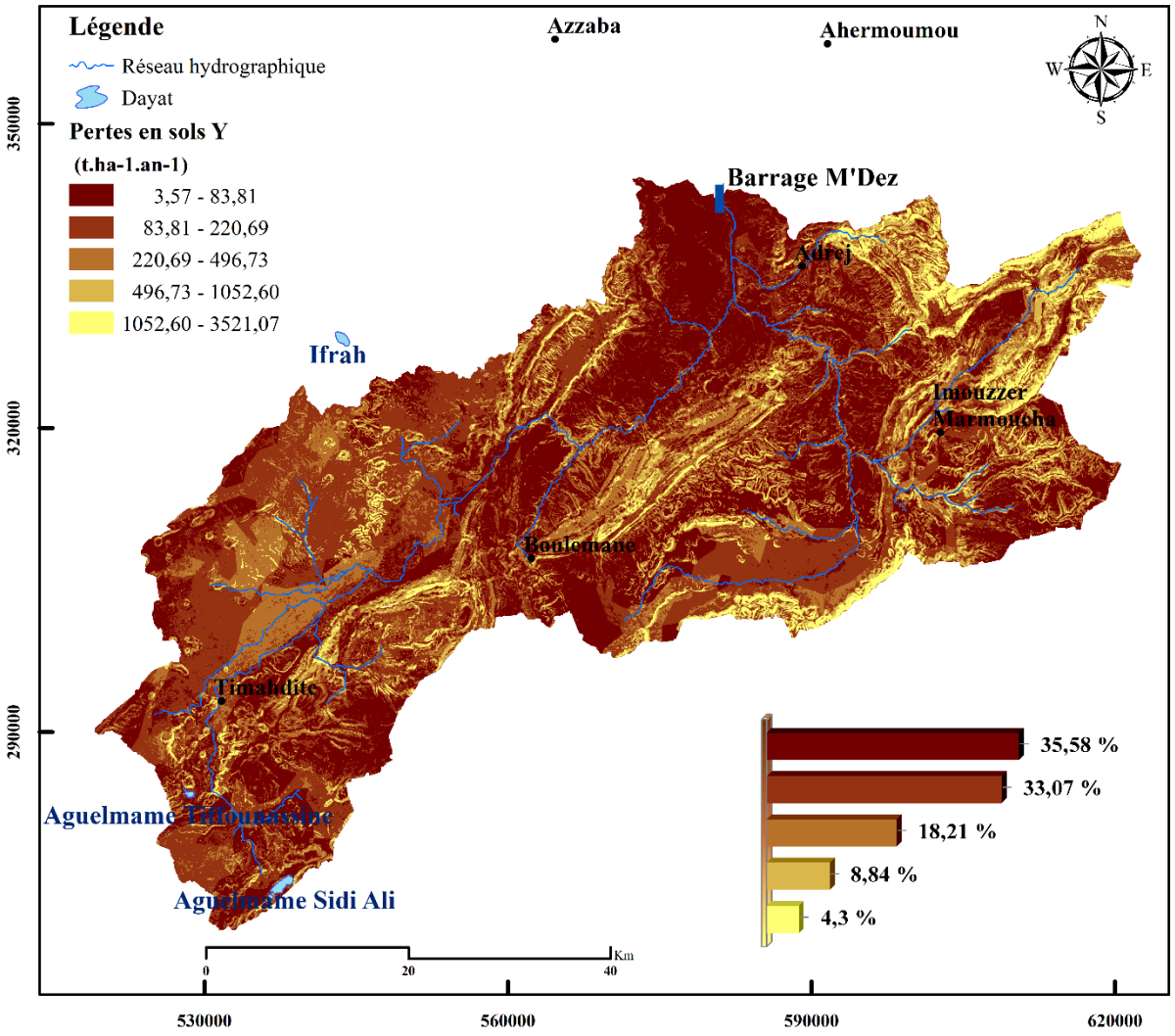


Figure 140: Carte des pertes en sols du bassin versant M'Dez

III. Statistiques multivariées

La base des données obtenue à partir de l'évaluation et la quantification de l'érosion dans le bassin versant M'Dez est traitée à l'aide de Microsoft Office Excel 2016 et soumise à une analyse statistique multivariée à l'aide du programme StatGraphics Centurion 18. L'analyse statistique comprend la corrélation de Pearson r, la régression linéaire R^2 simple et multiple et l'analyse en composantes principales ACP.

III.1. Pertes en sols et facteurs causaux

Les statistiques sommaires des pertes en sols avec les facteurs causaux sont représentés dans le tableau 65. Les pertes en sols Y moyennes sont de 596,08 $t.h^{-1}.an^{-1}$ avec un très vaste intervalle de variation (3,58 – 3512,20 $t.h^{-1}.an^{-1}$). Tenant compte de l'influence des valeurs de la classe extrême des pertes en sols (1052,60 – 3521,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$), qui ne représente que 4,3% de la superficie totale du bassin versant M'Dez, sur la moyenne des pertes en sols, la médiane de 339,59 $t.h^{-1}.an^{-1}$ est retenue. L'érodibilité K varie entre 0,02 et 0,33 $t.ha.h.ha^{-1}MJ^{-1}mm^{-1}$ avec une moyenne de 0,23. Le facteur longueur et degré de pente LS présente une moyenne de 80,21. Le facteur conservation des sols C varie entre 0,31 et 0,95 avec une moyenne de 0,65. La moyenne de l'érosivité R est de 84,28 $MJ\ mm\ .ha^{-1}.an^{-1}$ avec un large intervalle de variation (40,60 - 134,74). Le facteur des pratiques antiérosives P varie entre 0,25 et 0,85 avec une moyenne de 0,61 (Tableau 65).

Tableau 65: Statistiques sommaires

	Y	K	R	LS	C	P
Nombre	3689	3689	3689	3689	3689	3689
Moy.	596,08	0,23	84,28	80,21	0,65	0,61
Déviation standard	674,04	0,09	29,14	63,09	0,22	0,22
Coeff. de variation	113,08	38,59	34,58	78,66	33,61	36,94
Minimum	3,58	0,02	40,6	9,61	0,31	0,25
Maximum	3512,2	0,33	134,74	197,32	0,95	0,85

III.1.1. Coefficient de corrélation de Pearson (r)

L'examen des relations entre les pertes en sols Y et les facteurs causaux, réalisé par le coefficient de corrélation de Pearson r montre principalement des corrélations linéaires positives, presque parfaites avec la longueur et degré de pente (r = 0,74) et relativement faible avec l'érodibilité (r = 0,32) et la conservation des sols (r = 0,26) (Figure 141). Elles montrent que l'érosion hydrique augmente avec le facteur topographique LS et indiquent une forte relation positive entre les deux variables.

-1,0 1,0

Y		**0,13**	**0,32**	**0,74**	**0,26**	**0,16**
R	**0,13**		**-0,08**	**-0,01**	**0,01**	**0,03**
K	**0,32**	**-0,08**		**0,00**	**0,06**	**-0,02**
LS	**0,74**	**-0,01**	**0,00**		**-0,04**	**-0,02**
C	**0,26**	**0,01**	**0,06**	**-0,04**		**0,07**
P	**0,16**	**0,03**	**-0,02**	**-0,02**	**0,07**	
	Y	**R**	**K**	**LS**	**C**	**P**

Figure 141: Matrice de corrélation des pertes en sols et facteurs causaux du bassin versant M'Dez

III.1.2. Régression linéaire (R^2)

Le modèle de régression linéaire multiple qui décrit la relation entre les pertes en sols (Y) et les facteurs causaux (R, K, LS, C et P) est ajusté à l'équation 45 (Figure 142). Il explique 72,99 % de la variabilité des pertes en sols dans le bassin versant M'Dez.

$$\boldsymbol{Y} = -341{,}58 + 0{,}78 * \mathbf{R} + 349{,}30 * \mathbf{K} + 6{,}66 * \mathbf{LS} + 252{,}54 * \mathbf{C} + 117{,}43 * \mathbf{P} \quad (45)$$

La régression des pertes en sols avec la longueur et degré de pente LS enregistre le pourcentage le plus élevé avec 55,46% suivi de 10,71% pour le facteur K, par rapport aux autres facteurs dont le pourcentage ne dépasse pas 10%.

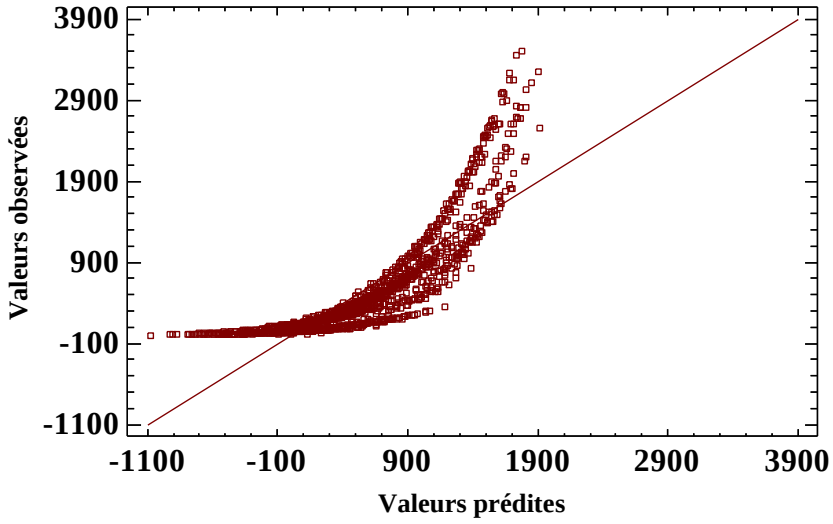


Figure 142: Courbe et nuage de points du modèle de régression multiple des pertes en sol et des facteurs causaux du bassin versant M'Dez

Afin de décrire la relation entre les pertes en sols et chaque facteur causal (R, K, LS, C et P), l'ajustement du modèle a comme résultats :

Les équations du modèle ajusté décrivant les relations entre les pertes en sols et l'érosivité R (**Y = 20,22 + 0,65*R**), avec une régression linéaire R^2 indiquant que le modèle explique 7,70% de la variabilité des pertes en sols Y, celles entre les pertes en sols et l'érodibilité K (**Y = -2,46 + 352,41*K**) avec une valeur de R^2 montrant que le modèle représente 10,71% de la variabilité de Y et celles avec la longueur et degré de pente LS (**Y = 1,76 + 6,52*LS**), avec une valeur R^2 indiquant que le modèle explique 55,46% de la variabilité des pertes en sols Y. Elles présentent des coefficients de corrélation indiquant une relation relativement faible entre les variables, dans l'ordre, r=0,13, r=0,32 et r=0,74 (Figure 143).

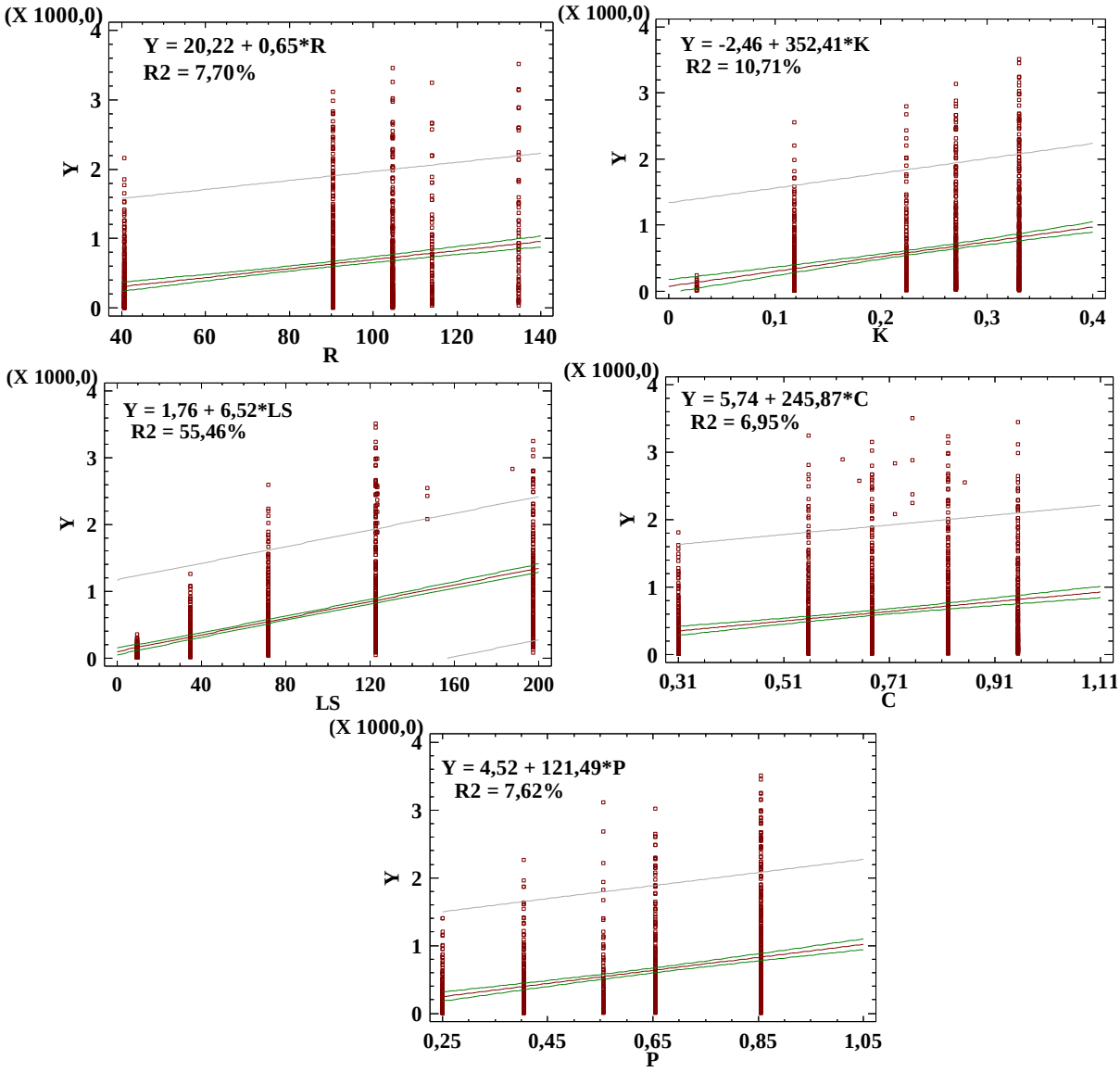


Figure 143: Courbes de régression des pertes en sols et des facteurs causaux dans le bassin versant M'Dez

L'équation du modèle ajusté pour décrire la relation entre les pertes en sols et le facteur de conservation des sols C est **Y = 5,74 + 245,87*C**. La valeur R^2 indique que le modèle explique 6,95% de la variabilité des pertes en sols Y et le coefficient de corrélation r=0.26 indiquant une relation faible entre les variables. Celle qui décrit la relation entre les pertes en sols et le facteur des pratiques antiérosives P est **Y = 4,52 + 121,49*P**. La valeur de R^2 indique que le modèle explique 7,62% de la variabilité des pertes en sols Y avec un coefficient de corrélation r=0,16 indiquant une relation modérément forte entre les variables (Figure 143).

Les tendances des résultats ont des indications semblables entre les pertes en sols et tous les facteurs causaux, excepté le facteur degrés et longueur de pente LS avec lequel les tendances des résultats sont particulièrement uniques. Pour une P-valeur est inférieure à 0,05, il existe une relation statistiquement significative entre les pertes en sols et les cinq facteurs causaux à un niveau de confiance de 96,0%.

III.1.3. Analyse en composantes principales (ACP)

L'application de l'analyse en composantes principales ACP a pour but de chercher un petit nombre de combinaisons linéaires des six variables qui expliquent la plus grande partie de la variabilité des données. Dans ce cas, les trois composantes qui ont des valeurs propres supérieures ou égales à 1 ont été extraites. Elles représentent 67,20% de la variabilité des données d'origine qui constitue une part acceptable de la variation des pertes en sols, et donc trois premières composantes principales seront utilisées.

Les équations des principales composantes (Tableau 66), dont la première composante principale a l'équation 46, où les valeurs des variables sont normalisées en soustrayant leurs moyennes et en les divisant par leurs écarts types. Pour la première composante principale, la direction et la valeur importante du coefficient du facteur LS (0.62) qui montrent que c'est le facteur le plus important dans le calcul de la composante.

$$\mathbf{0,19 * K + 0,62 * LS + 0,14 * P + 0,09 * R + 0,22 * C + 0,71 * Y} \qquad (46)$$

Tableau 66: Tableaux des poids des composantes du modèle RUSLE

	Composante		
	1	2	3
K	0,19	-0,15	0,68
LS	0,62	0,43	-0,09
P	0,14	-0,56	-0,26
R	0,09	-0,18	-0,65
C	0,22	-0,67	0,18
Y	0,71	0,00	-0,02

Numéro de composante	Valeur propre	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
1	1,84	30,59	30,59
2	1,10	18,36	48,95
3	**1,09**	**18,25**	**67,20**
4	0,94	15,69	82,89
5	0,88	14,71	97,60
6	0,14	2,40	100,00

Le diagramme des composantes principales montre que l'intensité de la relation entre les pertes en sols et la longueur et degré de pente LS est très élevée contrairement à l'érosivité des pluies R et les pratiques antiérosives P qui se trouvent moins liées aux pertes en sols Y. Les pertes en sols et la longueur et degré de pente s'avèrent bien liés (Figure 144).

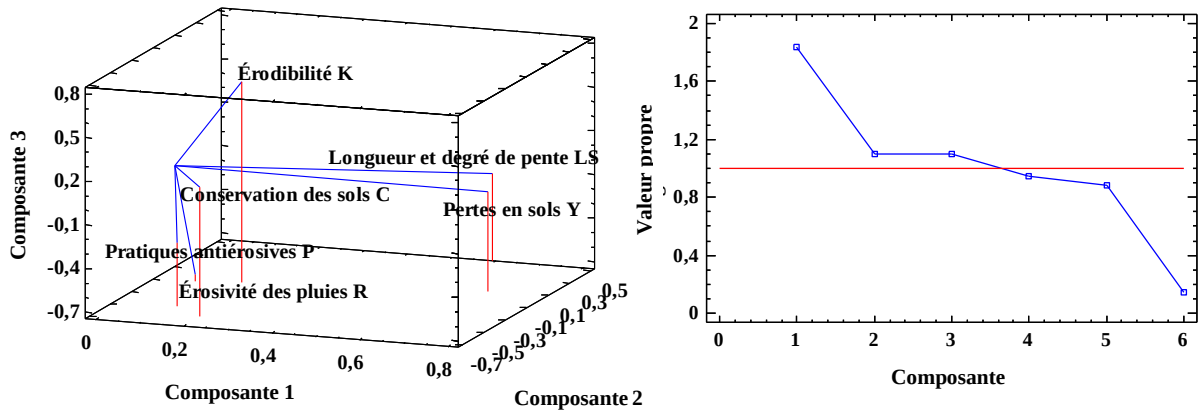


Figure 144: Diagramme des composantes principales et poids des variables

III.2. Etats érosifs et facteurs causaux

III.2.1. Coefficient de corrélation de Pearson (r)

La matrice de corrélation montre que les états érosifs présentent des corrélations positives presque parfaites avec l'érodibilité (r=0.76) et la pente (r=0.66), et une corrélation presque parfaite mais négative avec le couvert végétal (r=-0.37). La corrélation avec l'occupation des sols est négative mais reste non significative (r=-0.03). L'érodibilité enregistre une corrélation positive parfaite avec la pente (r=0,79). La protection des sols montre une corrélation négative presque parfaite avec le couvert végétal (r=-0.66) et une corrélation négative non significative avec le type d'occupation des sols (r=-0.11). Les tendances de l'érosion présentent des corrélations significatives positives avec les états érosifs (r=0,48) et

l'érodibilité (r=0,33), négatives avec les formes d'érosion (r=-41), peu significatives avec le couvert végétal (r=-0,17) et nulle avec l'occupation des sols (Figure 145).

L'analyse de la matrice de corrélation montre que lorsque les pentes s'intensifient et le couvert végétal diminue, l'érodibilité augmente et l'érosion s'intensifie. La corrélation est nécessairement inverse entre les états érosifs et le couvert végétal. Ces corrélations montrent que le facteur topographique (la pente) est le facteur qui agit le plus sur l'érosion dans le bassin versant M'Dez.

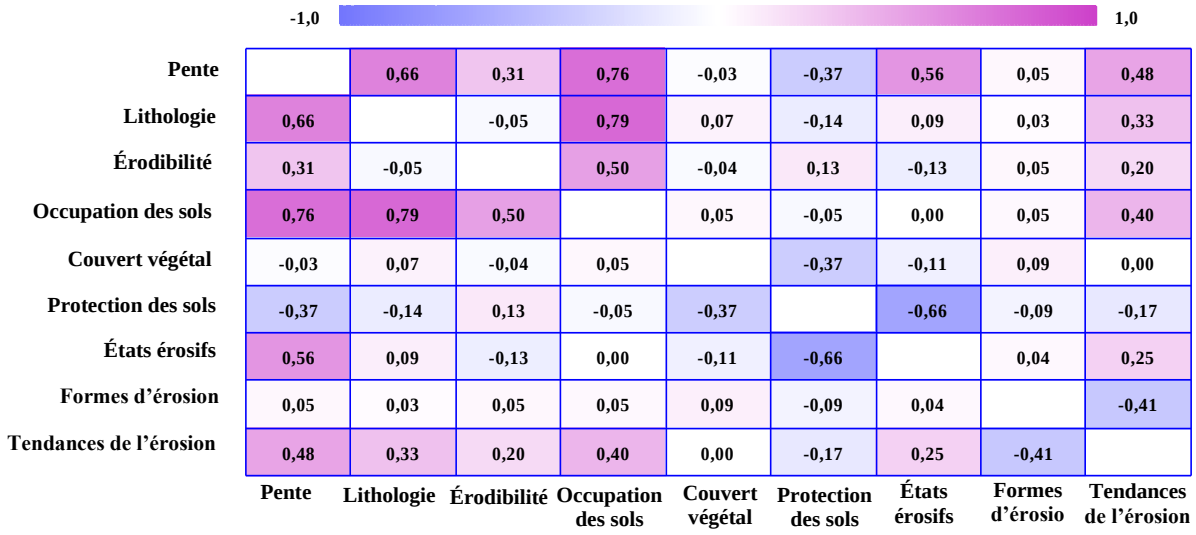


Figure 145: Matrice de corrélation des facteurs causaux et des états érosifs du bassin versant M'Dez

III.2.2. Régression (R^2)

Le modèle de régression linéaire multiple qui relie les états érosifs aux facteurs causaux de l'érosion (pente, lithologie, occupation des sols et couvert végétal) est ajusté selon l'équation 47 en établissant le rapport entre les valeurs observées et les valeurs prédites du modèle de régression. La régression linéraire R^2 montre que le modèle explique 69,15% de la variabilité des états érosifs.

$$\textbf{Etats érosifs} = 1,39 + 0,73 * \textbf{Pente} + 0,41 * \textbf{Lithologie} - 0,13 * \textbf{Occupation des sols} - 0,46 * \textbf{Couvert végétal} \quad (47)$$

Afin de mieux décrire les relations entre les états érosifs et les facteurs causaux dans le bassin versant M'Dez, les résultats de l'ajustement des modèles sont vérifiés. Les états érosifs avec la pente enregistrent le pourcentage le plus élevé de 43,09% suivi de 13,93% pour le couvert végétal. Le reste des facteurs causaux ne dépassent pas 10% (Figure 146).

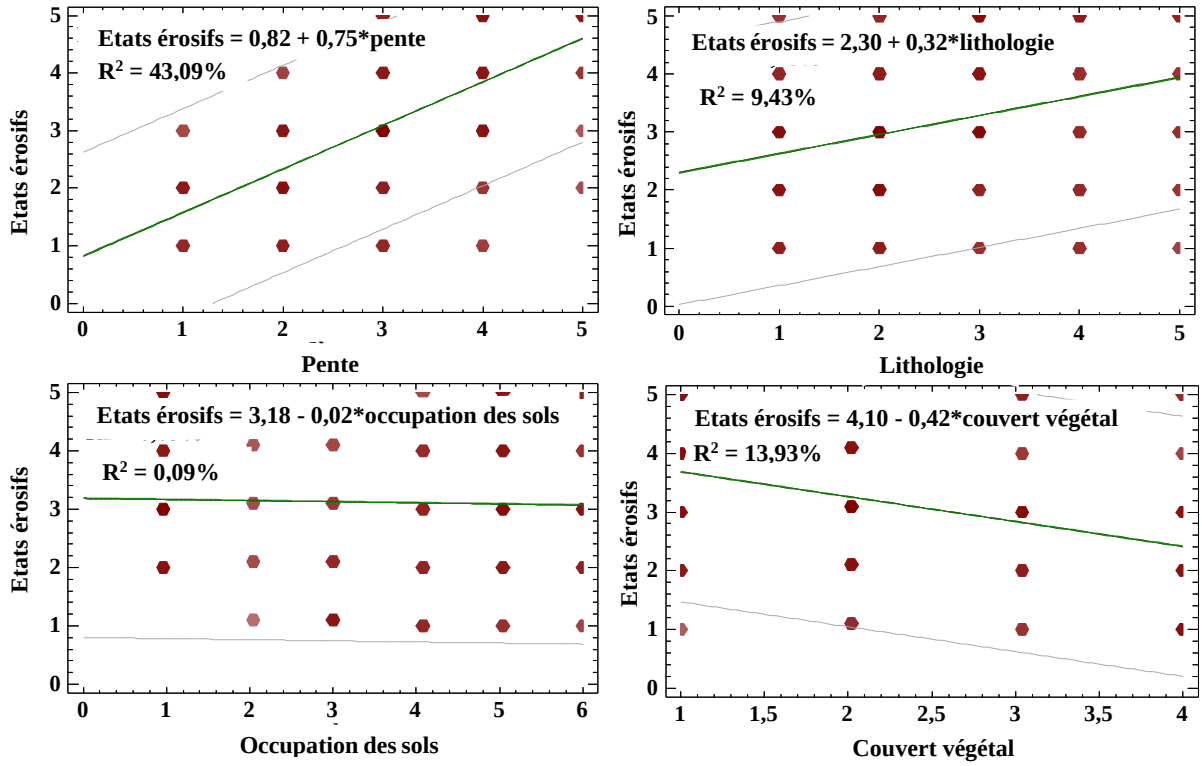


Figure 146: Courbes de régression des états érosifs et des facteurs causaux du bassin versant M'Dez

L'équation du modèle ajusté pour décrire la relation entre les états érosifs et la pente (états érosifs=0,82+0,75*pente) montre une régression linéaire indiquant que le modèle explique 43,09% de la variabilité des états érosifs. Celle qui décrit la relation entre les états érosifs et le couvert végétal (états érosifs=4,10-0,42*couvert végétal) montre une régression linéaire indiquant que le modèle explique 13,93% de la variabilité des états érosifs. Les deux facteurs présentent des coeffcients de corrélation témoignant d'une relation relativement forte avec les états érosifs, positive pour la pente (r=0,66) et négative pour le couvert végétal (r=-0.37). L'équation du modèle ajusté pour décrire la relation entre les états érosifs et la lithologie (états érosifs=2,30+0,32*lithologie) a une régression linéaire indiquant que le modèle explique 9,43% de la variabilité des états érosifs et celle qui décrit la relation entre les états érosifs et l'occupation des sols (états érosifs=3,18+0,02*occupation des sols) montre une régression linéaire indiquant que le modèle n'explique que 0,09% de la variabilité des états érosifs. Les deux facteurs présentent des coefficients de corrélation témoignant de relations faibles avec les états érosifs, positive avec la lithologie (r=0,31) et négative avec l'occupation des sols (r=-0,03).

III.2.3. Analyse en composantes principales (ACP)

L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) a pour but de chercher un petit nombre de combinaisons linéaires des neuf variables qui expliquent la plus grande partie de la variabilité des données. Dans ce cas, les quatre composantes qui ont des valeurs propres supérieures ou égales à 1 ont été extraites (Tableau 67). Elles expliquent 81,10% de la variabilité des données d'origine qui représente une part acceptable de la variation des données des quatre premières composantes qui seront utilisées. Le tableau 67 présente le détail des équations des principales composantes extraites, où les valeurs des variables sont normalisées en soustrayant leurs moyennes et en les divisant par leur écarts types, en citant la première composante principale selon l'équation 48.

$$\mathbf{0,43 * Pente + 0,18 * Lithologie + 0,47 * Erodibilité + 0,04 * Occupation\ des\ sols - 0,24 * couvert\ végétal + 0,26 * Protection\ des\ sols + 0,53 * Etats\ érosifs - 0,01 * Formes\ d'érosion + 0,35 * Tendances\ de\ l'érosion} \quad (48)$$

Pour la première composante principale, la direction et la valeur importante du coefficient de la pente (0.43) montrent que c'est le facteur le plus important parmi les facteurs causaux dans le calcul de la composante, suivie de la lithologie (0,18).

Tableau 67: Tableaux des poids des composantes du modèle PAP/CAR

	Composante			
	1	**2**	**3**	**4**
Pente	0,43	0,12	0,15	-0,15
Lithologie	0,18	0,41	0,11	0,18
Erodibilité	0,48	0,34	0,2	-0,04
Occupation des sols	0,04	-0,2	0,39	-0,75
Couvert végétal	-0,25	0,59	-0,08	0,12
Protection des sols	0,27	-0,54	-0,19	0,37
Etats érosifs	0,54	-0,03	0,02	0,19
Formes d'érosion	-0,02	-0,11	0,71	0,38
Tendances de l'érosion	0,36	0,07	-0,47	-0,23

Numéro de composante	**Valeur propre**	**Pourcentage de variance**	**Pourcentage cumulé**
1	3,09	34,3	34,3
2	1,77	19,68	53,97
3	1,34	14,91	68,88
4	**1,1**	**12,22**	**81,1**
5	0,97	10,76	91,86
6	0,4	4,45	96,31
7	0,23	2,54	98,85
8	0,07	0,81	99,65
9	0,03	0,35	100

L'analyse des associations linéaires entre les états érosifs et les facteurs causaux a permis de les représentés dans un espace factoriel et d'interpréter leurs relations en dérivant une série de composantes regroupant les variables qui expliquent le mieux la variance, y compris les états érosifs, les formes d'érosion et les tendances de l'érosion. Quatre composantes principales ont été extraites, avec une valeur propre supérieure ou égale à 1, en expliquant

81,10% de la variabilité des données normalisées (Figure 147). La première composante explique 34,30% de la variation. Les variables les plus pondérées sont les états érosifs et le facteur de pente. Ces deux variables sont corrélées positivement (les vecteurs représentant les deux variables évoluent dans la même direction), alors que les corrélations sont négatives avec le couvert végétal et les formes d'érosion (les vecteurs qui représentent les deux facteurs évoluent dans une direction opposée à celui des états érosifs). La première composante principale, sur l'axe horizontal, présente des coefficients positifs pour sept variables (états érosifs, pente, érodibilité, lithologie, protection des sols, tendances de l'érosion et occupation des sols), représentés par sept vecteurs dirigés vers la moitié droite du graphe. Les formes d'érosion et le couvert végétal présentent des coefficients négatifs.

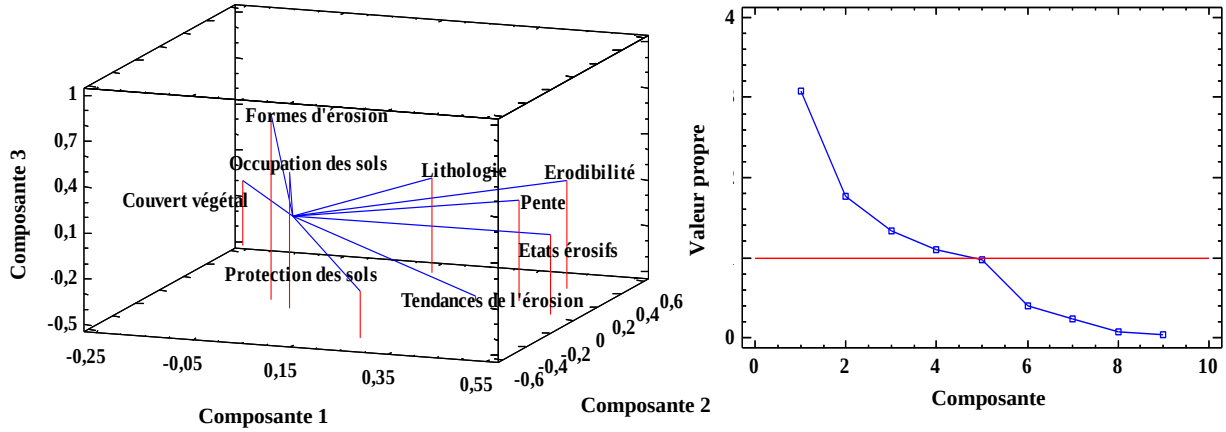


Figure 147: Diagramme des composantes principales et poids des variables

IV. Conclusion

Le bassin versant M'Dez, sous bassin versant de l'Oued Sebou, dans le pourtour méditerranéen, est soumis à l'érosion hydrique des sols. Celle-ci est évaluée et quantifiée par le biais de deux modèles, PAP/CAR et RUSLE.

Le modèle PAP/CAR a permis de définir les tendances de l'érosion selon des matrices croisées, basées sur les degrès d'influence des différents facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique à savoir, la pente, la lithologie, l'occupation des sols et le degré du recouvrement végétal. La carte des états érosifs hiérarchise le bassin versant M'Dez en cinq états par la superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols selon une matrice III. 30,16% de la superficie du bassin versant présente une prédisposition notable à l'érosion (degré d'érosion élevé à très élevé). L'analyse de la base de données montre que les zones les plus susceptibles se situent principalement dans le Moyen Atlas plissé notamment dans la partie est

et le centre du bassin versant suivant la raideur des pentes, notamment au niveau de Jbel Tichoukt et Jbel Bou Iblane. L'érosion prend de l'ampleur sur les pentes raides et les faciès peu résistants quelle que soit la densité du couvert végétal. Les faibles pentes peuvent diminuer l'état de l'érosion même avec un faible degré de protections des sols (occupation des sols à état dégradé et faible densité du couvert végétal). Plus de la moitié de la superficie du bassin versant M'Dez (59,5%) est vulnérable à l'érosion (états érosifs notables, élevés et très élevés). Les processus d'érosion y sont diversifiés, dominés par le décapage superficiel qui affecte 76,8% de la superficie. Les zones à rigoles et ravins superficiels arrivent en deuxième position sur 11,2% de la superficie. L'approche d'intégration montre que 55,36% de la superficie présente des tendances à l'expansion ou l'intensification localisées.

Par le modèle RUSLE, les pertes en sols qui sont quantifiées et estimées à 596,08 $t.h^{-1}.an^{-1}$ de moyenne, avec un intervalle très large variant entre 3,57 et 3520,20 t. $ha^{-1}.an^{-1}$. 35,58% de la superficie du bassin versant présente de très faibles pertes en sols où facteurs d'érosivité, de longueur et degré de pente, et d'érodibilité faibles à très faibles, de pratiques antiérosives faibles et de conservation des sols forte. Les pertes en sols fortes à très fortes, se manifestent dans 13,14% de la superficie où les sols sont fortement érodibles à forts degré et longueur de pente et peu ou pas d'aménagements. Et ce, même si la conservation est très variable et l'érosivité est très faible à faible, principalement à l'Est.

Les résultats ci-dessus des deux modèles et après une analyse statistique multivariée, ont prouvés l'existence d'un lien statistique entre les variables, à savoir d'une part les états érosifs et les facteurs causaux, et d'autre part les pertes en sols et les facteurs causaux. L'analyse statistique a aussi démontré que le facteur topographique, longueur et degré de pente LS du modèle RUSLE et la pente du modèle PAP/CAR, entretient une relation positive avec l'érosion quantitativement et qualitativement. C'est-à-dire plus la pente est raide plus l'érosion est intense. Les deux modèles utilisés pour leurs données parcimonieuses et pour leur compatibilité avec les technologies de télédétection et les systèmes d'information géographique, se sont avérés pertinents et ont permis d'établir un bon diagnostic de l'état de l'érosion hydrique des points de vue à la fois qualitatif et quantitatif.

Le bassin versant M'Dez couvre 63,2% de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi et perd annuellement en moyenne 596,08 t. $ha^{-1}.an^{-1}$ ce qui vaut 95,5% des pertes en sols annuelles moyennes du bassin versant Allal Al Fassi. Ceci lui permettra, certainement de jouer un rôle très important vis-à-vis le bassin versant Allal Al Fassi et pourrait être une solution pour diminuer le taux d'envasement de sa retenue et assurer sa pérennité.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le bassin versant Allal Al Fassi avec une superficie de 5352 km^2 est situé dans le Moyen Atlas dont les formations géologiques sont dominées par les faciès calcaires du Jurassique (70% de la superficie) et les sols peu évolués (22,96% de la superficie). Il a une forme allongée de direction Nord-Est/ Sud-Ouest, parallèle au sens de l'écoulement général des eaux, qui ralentie sa réponse hydrologique, favorise l'érosion linéaire et régressive et rend faibles les débits de pointes et crues en raison du temps de concentration important de 11h57min42s. Il a atteint un stade d'érosion relativement développé exprimant une dégradation des conditions bioclimatiques associée à l'action anthropique intensifiée. Les pentes inférieures à 41,40% occupent environ 82% de sa superficie et jouent en faveur de l'infiltration des eaux de surface surtout lorsque la perméabilité du substrat la permet. Les pentes les plus fortes longent les zones montagneuses principalement dans le Moyen Atlas plissé, notamment au niveau de Jbel Bou Iblane et Jbel Tichoukt. Ces pentes sont dominées par une orientation vers Nord-Ouest perpendiculaire à la disposition morphostructurale. L'écoulement des eaux de surface dans le bassin versant Allal Al Fassi est assuré par des oueds à flux épisodique et saisonnier avec un caractère torrentiel et par des écoulements diffus. Le réseau hydrographique de 4987,40 Km de longueur est dense et ramifié, généralement dendritique et homogène avec des variations locales, notamment dans la partie avale où il deviennent parallèles. À fort potentiel érosif, il est qualifié comme un bassin moyennement drainé avec substrat perméable et relief accidenté.

Le bassin versant Allal Al Fassi sous climat méditerranéen et influence océanique, reçoit une moyenne annuelle des précipitations de 376,23 mm variable pendant les mois et présente une amplitude interannuelle de 419,47 mm qui traduit le caractère instable de la pluviométrie. Il connait un régime thermique marqué par un contraste important (17°) et par une grande variabilité des températures mensuelles moyennes. Son climat varie du semi-aride à subhumide ou tempéré avec deux saisons, une à climat d'hyper-aride à semi-aride et l'autre à climat semi-humide. L'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne est de 827 mm/an, environ deux fois les précipitations annuelles moyennes.

De par sa localisation dans une barrière orogénique naturelle, le bassin versant Allal Al Fassi est à la fois sous l'influence des vents océaniques ouest et nord-ouest, humides et peu violents qui diminuent la température, accroissent l'hygrométrie de l'air et génèrent des précipitations abondantes et des vents continentaux est et sud-est chauds et secs qui contribuent

à accroître l'évapotranspiration. Les indices SPI_{12} et SDI_{12} ont révélé une irrégularité dans la répartition des années sèches et humides et une alternance des périodes extrêmement sèches et extrêmement humides d'une façon aléatoire, phénomène qui joue en faveur de l'érosion hydrique, pendant les crues, des sols déjà devenus plus vulnérables.

Malgré l'occupation des sols bien complexe, elle est dominée par les matorrals, les steppes et les forêts. Le suivi de l'occupation des sols entre l'année 1997 et l'année 2017 a pu mettre en évidence une régression très importante de la forêt menant à l'apparition du matorral et de steppe et une diminution des terrains agricoles. La végétation par sa dynamique spatio-temporelle ne présente aucune relation avec le facteur climatique. La variation interannuelle de la végétation par l'indice SAVI est beaucoup plus marquée que celle par l'indice NDVI qui masque certainement une variabilité intra-annuelle bien différenciée. Les deux indices ne montrent aucune tendance dans la série temporelle assez importante (1985-2020), par des tests de Mann-Kendall.

Le facteur anthropique, par diverses activités constitue le moteur essentiel de l'évolution des géosystèmes et principalement du phénomène de l'érosion hydrique. La majorité des communes du bassin versant est rurale où l'agriculture et l'élevage représentent l'activité principale de plus de la moitié de la population active. L'évaluation de la vulnérabilité basée sur l'appréciation des préjudices corporels, des dommages structurels, des pertes fonctionnelles et de la méconnaissance de l'aléa précise que les classes de vulnérabilité faible et très faible sont fréquentes et correspondent aux communes présentant le minimum de préjudices corporels, de dommages structurels, de pertes fonctionnelles et de méconnaissance de l'aléa.

Vus la diversité des facteurs causaux et les changements climatiques, la méthode PAP/CAR a permis de définir les tendances de l'érosion selon des matrices croisées. Le bassin versant Allal Al Fassi est caractérisé par cinq états érosifs, environ 24% de la superficie présente une faible prédisposition à l'érosion hydrique et environ 30% présente un degré d'érosion élevé à très élevé ; en signalant que l'état érosif très faible correspond à une pente faible, un matériel résistant et un degré de protection très élevé notamment au Sud-Ouest et que l'état érosif élevé à très élevé, une érodibilité extrême et un degré de protection faible à très faible à l'Est. Au centre, l'état érosif est faible malgré un degré d'érodibilité moyen à fort mais un degré de protection des sols très élevé. Le processus de l'érosion hydrique le plus dangereux est le décapage superficiel qui affecte environ 80% de la superficie. Il a été aussi montré qu'environ 55% de la superficie présente des tendances à l'expansion ou à l'intensification localisées.

L’étude statistique a confirmé que les états érosifs s'aggravent avec l'augmentation de la raideur des pentes et la diminution de la protection des sols.

La quantification des pertes en sols annuelles moyennes par le modèle RUSLE est estimée à 624,07 $t.h^{-1}.an^{-1}$, avec un intervalle très large qui varie entre 3,57 et 3521,07 $t.\ ha^{-1}.\ an^{-1}$ et une médiane égale à 335,48 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. Elles sont plus importantes en amont du bassin versant, principalement à l’Est où les pentes sont fortes et longues, les sols sont fortement érodibles avec peu ou pas d’aménagements même si la conservation est très variable et l’érosivité est très faible à faible. Par contre, elles sont faibles dans les zones à facteurs d’érosivité, de longueur et degré des pentes et d’érodibilité faibles à très faibles, de pratiques antiérosives faibles et de conservation des sols forte. Elles présentent des corrélations linéaires positives presque parfaites avec la longueur et le degré de pente suivis de l’érodibilité et les pratiques antiérosives, et des corrélations linéaires relativement faibles, positives dans un ordre décroissant avec le pourcentage de la matière organique, le pH, le pourcentage d’argiles et le pourcentage de la fraction fine inférieure à 2mm, et négatives avec la conductivité (r=-0,25) et le pourcentage de sables. Les pourcentages de silts et d’argiles et le pH ont une incidence significative sur la variation des pertes en sols. Ces dernières sont importantes pour les matorrals suivis par les steppes, deux occupations de sols dominantes, pour les terrains à substrat dolomitique, vue sa prédominance et pour les sols de type complexe C1 suivis par les minéraux bruts et les isohumiques. La relation est élevée entre l’érodibilité, la conservation des sols et la longueur et le degré de pente d’une part et d’autre part entre les pertes en sols et les pourcentages de silts, de la matière organique et de $CaCO_3$ (avec des corrélations négatives) et le pH.

L’érodibilité K est fortement corrélée positivement avec la fraction fine et négativement avec la fraction grossière. Elle est corrélée positivement avec le pourcentage des silts et négativement avec les pourcentages des argiles, de la matière organique et de $CaCO_3$, ce qui évoque l’effet du complexe organo-minéral dans la structure et le maintien de l’équilibre intrinsèque des sols et la résistance à l’érosion hydrique. Elle diminue pour les sols les plus denses qui sont les plus évolués, les mieux structurés et les plus résistants à l’érosion hydrique. L’érodibilité est importante quand la fraction fine est abondante et les taux des argiles et de la matière organique sont faibles. Elle est ainsi relativement faible sur les sols sous matorrals et importante sur les sols sous steppes et sols agricoles et non cultivés. La texture silteuse fine des sols et les substrats formés d’alternance de marnes et grès jouent en sa faveur. Les teneurs des paramètres physico-chimiques (teneur en fraction fine, teneur en argiles, teneur en matière

organique et pH) se répartissent selon les phénomènes naturels tels la pédogenèse, la végétation, le substrat et l'action anthropique.

La retenue du barrage M'Dez constitue une solution à double tranchant, blocage en amont des arrivées détritiques destinées à la retenue Allal Al Fassi et son propre colmatage progressif. Dans son bassin versant, plus de la moitié de la superficie est vulnérable à l'érosion avec des processus d'érosion dominés par le décapage superficiel, et présente des tendances à l'expansion ou l'intensification localisées. Les pertes en sols sont estimées à 596,08 $t.h^{-1}.an^{-1}$ de moyenne, avec un intervalle très large variant entre 3,57 et 3520,20 $t.\ ha^{-1}.an^{-1}$. Lorsqu'elles sont fortes à très fortes, elles se manifestent au niveau des sols fortement érodibles à forts degré et longueur de pente et peu ou pas d'aménagements.

Ces résultats montrent qu'à l'état actuel le bassin versant Allal Al Fassi est soumis à des pertes en sols assez significatives, un degré de susceptibilité important et une érosion qui tend à l'expansion ou à l'intensification localisées. Devant ces tendances menaçantes de la dégradation des ressources naturelles, de l'infrastructure et par conséquent de la qualité de vie socio-économique des populations, elles pourraient causer d'énormes dégâts écologiques si aucune intervention préalable de lutte contre l'érosion hydrique n'est effectuée dans les années à venir, sachant que l'utilisation abusive des terres arables est en perpétuelle extension aux dépens des zones à couvert végétal naturel. Il s'avère nécessaire d'intervenir pour lutter contre le risque d'érosion en agissant efficacement sur les facteurs prépondérants, principalement le facteur topographique qui est démontré le plus important par les deux modèles, probabiliste et mathématique, et nécessite une action optant pour des structures antiérosives qui s'opposent à l'effet de la pente.

Le barrage M'Dez pourrait être une bonne solution pour résoudre la problématique du bassin versant Allal Al Fassi. En effet, le bassin versant M'Dez couvre 63,2% de la superficie du bassin versant Allal Al Fassi et perd annuellement en moyenne 596,08 $t.\ ha^{-1}.an^{-1}$ ce qui vaut 95,5% des pertes en sols annuelles moyennes du bassin versant Allal Al Fassi. Ceci lui permettra, certainement de jouer un rôle très important vis-à-vis du bassin versant Allal Al Fassi et pourrait être une solution pour diminuer le taux d'envasement de sa retenue et assurer sa pérennité. De ce fait, l'aménagement du bassin versant M'Dez devient une priorité dans le but de prévenir l'érosion hydrique et l'envasement des deux retenues Allal Al Fassi et M'Dez (en cours de construction). La gestion des ressources des deux bassins versants doit adopter une approche écosystémique intégrée qui vise à comprendre l'ensemble des interactions entre les facteurs biotiques (y compris humains) et abiotiques. La stratégie des aménagements antiérosifs

doit se basée sur une analyse attentive des conditions actuelles et des processus dynamiques dans les bassins versants et l'élaboration d'une vision à moyen et long terme dans le but de diminuer et prévenir l'érosion hydrique, préserver les écosystèmes et la biodiversité, optimiser la productivité des ressources et améliorer les moyens d'existence et le bien-être humains. Cela est rendu possible grâce au diagnostic des différentes interconnections entre les différentes composantes du bassin versant.

L'aménagement du bassin versant Allal Al Fassi doit être spécifique à son contexte en agissant efficacement sur les facteurs prépondérants, à commencer par le facteur topographique, en tenant compte de la variété des processus d'érosion et des conditions écologiques et socio-économiques en impliquant les paysans, les principaux gestionnaires des terres, dans le développement des projets de conservation des sols. Leurs restituer les capacités d'invention, d'adaptation, d'expérimentation et de choix des techniques adaptées à leurs moyens, à leurs connaissances techniques, au type de culture et à leurs objectifs.

Pour la validation des résultats obtenus, le modèle physique est adopté pour traçage de l'érosion par Césium ^{137}Cs, et 150 échantillons représentatifs sont préparés dans l'attente d'une confirmation pour analyse.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Aboulabbes O (2005) Études de Diagnostic en Hydrogéologie du SIBE de Chekhar. Projet GEP Gestion des aires protégées. Haut-commissariat aux eaux et forêts et la lutte contre la désertification, 76.

Alexakis D, Hadjimitsis D, Agapiou A (2013) Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus. Atmospheric Research, 131: 108-124.

Alexandersson H, Moberg A (1997) Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 17(1): 25-34.

Almagro M, Vente J, Boix-Fayos C, García-Franco N, Melgares de Aguilar J, González D, Albert SB, Martínez-Mena M (2016) Sustainable land management practices as providers of several ecosystem services under rainfed Mediterranean agroecosystems. Mitig. Adapt. Strategies Glob. Change 21: 1029-1043. DOI:1029-10431029.

Altieri M (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. (M. Paoletti, Éd.) Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes: 19-31. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4.

Arnaez J, Lasanta T, Errea M, Ortigosa L (2011) Land abandonment, landscape evolution, and soil erosion in a Spanish Mediterranean mountain region: the case of Camero Viejo. Land Degradation & Development, 550 : 537-550. DOI : 10.1002/ldr.1032.

Aviotti A (2011) Contribution à la caractérisation de la vulnérabilité de l'habitat individuel face à l'inondation. Thèse de doctorat. Paris Tech, Paris, 261.

Baali A (1998) Genèse et évolution au plio-quaternaire de deux bassins intramontagneux en domaine carbonaté méditérraneen. Les bassins versants des dayetsAfourgagh et Agoulmam (Moyen Atlas, Maroc). Thèse de doctorat d'état : 326, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc.

Baali A, Cheddadi R, Chairi R (2007) Evolution sédimentologique, pédologique et paléoclimatique du bassin lacustre de la dayetAgoulmam (Moyen Atlas, Maroc) depuis le Pléistocène (Soltanien) à l'Holocène. Revue Méditerranéenne de l'Environnement, 2(1) : 267-280.

Baize D, Girard M (1992) Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe. Versailles, INRA, Éditions, 222.

Baja S, Nurmiaty U, Arif S (2014) GIS-Based Soil Erosion Modeling for Assessing Land Suitability in the Urban Watershed of Tallo River, South Sulawesi, Indonesia. Modern Applied Science 8(4): 50-60. DOI: 10.5539/mas.v8n4p50.

Bartolia F, Burtina G, Guerif J (1992) Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. Geoderma, 54: 259-274.

Beaudet G, Ruellan A (1971) Le Quaternaire marocain : état des études. Revue de Géographie du Maroc (20) : 3-56.

Benchetrit M (1954) L'érosion anthropogène : couverture végétale et conséquences du mode d'exploitation du sol. L'information géographique, 18(3) : 100-108.

Benzougagh B, Dridri A, Boudad L, Sdkaoui D, Baamar B (2019) Apport des SIG et télédétection pour l'évaluation des caractéristiques physiques du bassin d'Oued Inaouene (Nord-Est Maroc) et leurs utilités dans le domaine de la gestion des risques naturels. American Journal of innovative Research & Applied Sciences, 8(4): 120-130.

Bergsma E, Charman P, Gibbons F, Hurni H, Moldenhauer W, Panichapong S (1996) Terminology for soil erosion and conservation. International Society of Soil Science/International Soil Reference and Information Centre ISSS/ISRIC, 322.

Beroutchachvili N, Bertrand G (1978) Le géosystème ou « système territorial naturel ». Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen, 49(2) : 167-180. DOI: https://doi.org/10.3406/rgpso.1978.3548.

Beuselinck L, Steegen A, Govers G, Nachtergaele J, Takken I, Poesen J (2000) Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. Geomorphology, 32(1-2) : 69-82.

Bidou J, Droy I (2009) Décrire la construction temporelle des vulnérabilités : observatoires ruraux et analyse historique des moyens d'existence dans le sud malgache. Dans M. Mormont, Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés : 155-170. Paris : L'Harmattan.

Birot P (1966) Les nouvelles classifications des sols d'après P. Duchaufour. Annales de Géographie, 75(410) : 448-453.

Birot P (1973) Emmanuel de Martonne, précurseur de la géomorphologie climatique. Bulletin de l'Association de Géographes Français, 50(408) : 551-554.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (2004) At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters (2nd ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203714775.

Blong R (2003) A new damage index. Natural Hazards, 30(1): 1-23.

Boardman J, Poesen J (2006) Soil erosion in Europe: major processes, causes and consequences. Soil Erosion in Europe. New York: John Wiley & Sons, 477-487. DOI: 10.1002/0470859202.ch36.

Boiffin J (1976) Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. Annales Agronomiques, 27(4) : 447-463.

Boiffin J (1984) La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse D.I. INA-PG, 320.

Bolle H J (2002) Mediterranean climate: variability and trends. Springer Science & Business Media.

Bollinne A (1975) La mesure de l'intensité du splash sur sol limoneux. Mise au point d'une technique de terrain et premier résultats. Pédologie, 25(3) : 199-210.

Bonneau M, Brethes A, Lelong F, Levy G, Nys C, Souchier B (1979) Effets de boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol. (AgroParisTech, Éd.) Revue Forestière Francaise (3) : 198-207. DOI : https://doi.org/10.4267/2042/21280.

Bonnet P (1983) Prise en compte des risques naturels en forêt de montagne : cas des forêts soumises dans les Alpes du Nord. Thèse de doctorat : 127. IRSTEA.

Borrelli P, Robinson D, Fleischer L, Lugato E, Ballabio C, Alewell C,Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, MontanarellaL,Panagos P (2017)An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. Nature Communications 8(1): 1-13. DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.

Bradford J, Huang C (1996) Splash and detachment by waterdrops. (M. Dekker, Éd.) Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation, Books in Soils, Plants and the Environment, 61-76.

Bronner G, Marchand J, Sougy J (1985) Carte Geologique du Maroc 1: 1.000. 000. Notes et Memoires : 260.

Burel f, Garnier E, Amiaud B, Aulagnier S, Butet A, Villenave C (2008) Chapitre 1 : Les effets de l'agriculture sur la biodiversité. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies, Expertise scientifique collective. France : ESCo "Agriculture et biodiversité" INRA.

Burton I, Kates R, White G (1978) The Environment as Hazard. New York: Guilford, 290.

Carlston C (1963) Drainage density and streamflow. Washington: Unites States Government Printing Office.

Carver S (1991) Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International journal of geographical information systems, 5(3) : 321-339.

Castany G (1963) Trait é pratique des eaux souterraines. Paris: Dunod.

Cerdà A (1998) The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain. Canadian Journal of Soil Science, 78(2) : 321-330.

Chafik H (2012) Contribution au développement d'une application Web pour l'évaluation de l'érosion hydrique dans le cadre du Projet Arboriculture Fruitière - Maroc. Mémoire de 3ème cycle. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat.

Chaney K, Swift R (1984) The Influence of Organic Matter on Aggregate Stability in Some British Soils. European Journal of Soil Science, 35(2): 223-230.

Charrière A (1990) Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : Le Moyen Atlas au sud-est de Fès (Maroc). Thèse de doctorat d'état : 589, Université Paul sud-est, Toulouse III, France.

Cheddadi R, Lamb H, Guiot J, Van Der Kaars S (1998) Holocene climatic change in Morocco: a quantitative reconstruction from pollen data. Climate Dynamics, 14: 883-890.

Chen H, Takashi O, Wu P (2017) Assessment for soil loss by using a scheme of alterative sub-models based on the RUSLE in a Karst Basin of Southwest China. Journal of Integrative Agriculture 16(2) : 377-388. DOI :10.1016/S2095-3119(16)61507-1.

Choubert G, Marçais J (1952) Géologie du Maroc : Fascicule 1. 1re partie. Aperçu structural. Casablanca : Impr. Édita, Service Géologique Notes et Mémoires (100) : 196.

Chow V, Maidment D, Mays L (1988). Applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 147-151.

Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and psychological measurement, 20(1): 37-46.

Cohen J (1968) Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. Psychological bulletin, 70(4) : 213.

Collinet J, Zante P, Balieu O, Ghesmi M (2001) Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne). Tunis (TUN) ; Projet de développement intégré du Nord et du Nord-Est du Kef. Le Kef : IRD ; CRDA, multigr, 60.

Colo G (1961) Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional : Atlas de planches hors texte. Notes et Mémoires du Servie de Géologie (139 bis) : 226.

Division de la géologie, Direction, Ministère, Royaume du Maroc.

Cosandey C, Didon-Lescot J, Martin C (2000) Forêt et écoulements : étude des processus responsables des modifications dubilan d'écoulement annuel à l'occasion d'une coupe forestière. Forêt méditerranéenne, 21 : 154–155.

Daveau S (1978) La répartition des précipitations en fonction du relief : Étude du cas Portugais. Geoforum, 9(6) : 425-433.

De Martonne E (1926) Aréisme et indice d'aridité. Comptes rendus Académie des Sciences, 181 : 1395-1398.

De Noni G, Viennot M (1998) Étude des facteurs de l'érosion hydrique sur des versants volcaniques cultivés. Une réponse à une demande de développement. Bulletin-Réseau Erosion, 18 : 437-449.

Derruau M (2010) Le système anthropique, les formes du relief terrestre. Notions de géomorphologie. Armand Colin, « U » : 240. DOI : 10.3917/arco.derru.2010.01.

Diallo D, Orange D, Roose E, Morel A (2000) Potentiel de production de sédiments dans le bassin versant de Djitiko (103 km^2) zone soudanienne du Mali Sud. Bulletin Réseau Erosion, 20 : 54-66.

Didon J, Durand-Delga M, Kornprobst J (1973) Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar. Bull. Soc. Géol. Fr 7(XV): 77-105. DOI: 10.2113/gssgfbull.S7-XV.2.77.

Dietrich W, Dune T (1978) Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain. Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd 29 : 191-206.

Dridri A (1987) Étude sédimentologique des terrasses quaternaires et des alluvions actuelles du Moyen Sebou (région de Fès). Thèse Troisième cycle : 180. E.N.S Fès.

Dridri A (2004) Les formations quaternaires des Oueds Inaoune et Moyen Sebou (entre Fès et col de Touahar) analyses lithostratigraphique sédimentologique et morpho structurale. Thèse de doctorat d'état : 380, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc.

Du Dresnay R (1988) Recent data on the geology of the Middle-Atlas (Morocco). In The Atlas System of Morocco: 293-320. Berlin, Heidelberg: Springer.

Dubreuil P (1974) Initiation à l'analyse hydrologique. Paris : Masson et Cie Editeurs, 216.

Duchaufour P (1977) Pédologie I: Pédogenèse et classification. Paris: Masson.Géographie physique et Quaternaire, 32(2) : 177-178.

Duffa C, Danic F (2006) Entraînement et redistribution des radionucléides sur le bassin versant de la Peyne. Rapport préliminaire. Direction de l'Environnement et de l'Intervention. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 19.

Dumas J (1965) Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie :3(4) : 307-333.

Dumolard P, Dubus N, Charleux L (2003) Les statistiques en géographie (Vol. collection "Atouts Géographie"). Editions Belin, 239.

Ekern P (1950) Raindrop impact as the force initiating soil erosion. Soil Science Society of America Proceedings, 15: 7-10.

El Kamel T, Baali A, Belhaj Ali A, Couscous A, El Ibrahimi A, Mesrar H (2020a) Quantification of soil losses and multivariate statistics of factors controlling water erosion (Allal Al Fassi watershed, Morocco). Arabian Journal of Geosciences 13(1247): 1-25. DOI: https://doi.org/10.1007/s12517-020-06230-9.

El Kamel T, Baali A, Couscous A, Hakam O, Mesrar H, Babbou C (2020b) Variation of soils erodibility according to physico-chemical and biogeographic parameters in Allal Al Fassi watershed, Middle Atlas, Morocco. Moroccan Journal of Chemistry 8(4): 919-935. DOI: https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v8i4.21073.

Ellison W (1944) Studies of raindrop erosion. Agricultural Engineering, 25: 131-136.

Ellison W (1947) Soil erosion studies-part V: soil transportation in the splash process. Agric. Eng., 28 : 349-353.

Emberger L (1931) Sur la formule climatique applicable en géographie botanique. Compt. Rend, 191 : 389-390. Séances Acad. Sci.

Emberger L (1955) Une classification biogéographique des climats. Rec. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sc de Montpellier, 7: 3-43.

Erpul, G, Norton L, Gabriels D (2002) Raindrop-induced and wind-driven soil particle transport. Catena, 47(3) : 227-243.

Escadafal R, Huete A (1991) Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, 312(11) : 1385-1391.

Faleh A, Maktite A (2014) Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique à l'aide de la méthode PAP/CAR et SIG en amont du barrage Allal Al Fassi, Moyen Atlas (Maroc). Papeles de Geografía: 71-82.

FAO (1998) Land Cover Classification System (LCCS). SD Dimensions electronic publication. Rome, Italy: FAO Sustainable Development Department.

Farhan Y, Zregat D, Farhan I (2013) Spatial Estimation of Soil Erosion Risk Using RUSLE Approach, RS, and GIS Techniques: A Case Study of Kufranja Watershed, Northern Jordan. Journal of Water Resource and Protection 5 :1247-1261. DOI :10.4236/jwarp.2013.512134.

Fedan B (1984) Découverte du Crétacé dans le synclinale des Marmoucha (Moyen-Atlas, Maroc). Bull.Inst.Sc.(8) : 93.

Fedan B (1988) Évolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur dècrochements : le Moyen Atlas (Maroc) durant le Méso – Cènozoïque. Travaux de L'Institut Scientifique, 18 : 1–80.

Foley J, DeFries R, Asner G, Barford C, Bonan G, Carpenter S, Chapin S, Coe M, Daily G, Gibbs H, Helkowski J, Holloway T, Howard E, Kucharik C, Monfreda C, Patz J, Prentice C, Ramankutty N, Snyder P (2005) Global consequences of land use. Science, 309(5734) : 570-574.

Forsberg C (1989) Importance des sédiments dans la compréhension cyclages de nutriments dans les lacs. Hydrobiologia 176(1): 263- 277.

Foster G, Wischmeier W (1974) Evaluating irregular slopes for soil lossprediction. Transactions of the Asae17(2) : 305-309.

Fournier F (1949) Les facteurs climatiques de l'érosion du sol. Bulletin de l'Association de Géographes Français. (202-203) : 97-103. DOI : https://doi.org/10.3406/bagf.1949.7284.

Fournier F (1967) La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. Sols africains, 12(1): 5-53.

Free G (1952) Soil movement by raindrops. Agricultural Engineering: 491-494.

Fung T, Ledrew E (1988) The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(10): 1449-1454.

García-Ruiz J (2010) The effects of land uses on soil erosion in Spain. Catena 81(1) : 1-11. DOI : 10.1016/j.catena.2010.01.001.

Gaussen H (1954 Théorie et classification des climats et microclimats. Actes VII Congr. Int. Bot. : 125-130. Paris.

Gaussen H (1957) Climatologie. Annales de Géographie, 66(353) : 9-14.

Geddes N, Dunkerley D (1999) The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs. Catena, 36: 303-313.

Gravelius H (1914) Grundriß der gesamten Gewässerkunde, Band 1: Flußkunde. Compendium of Hydrology, 1: 265-278.

Guerra A, Maes J, Geijzendorffer I, Metzger M (2016) An assessment of soil erosion prevention by vegetation in Mediterranean Europe: current trends of ecosystem service provision. Ecol. Indicat. 60 :213-222. DOI : 10.1016/j.ecolind.2015.06.043.

Handel S, Robinson G, Parsons W, Mattei J (1997) Restoration of woody plants to capped landfills: root dynamics in an engineered soil. Restoration Ecology, 5(2) : 178-186.

Harmand C, Moukadiri A (1986) Synchronisme entre tectonique compressive et volcanisme alcalin ; exemple de la province quaternaire du Moyen Atlas (Maroc). Bulletin de la Société Géologique de France, 2(4) : 595-603.

Haynes R, Swift R (1990) Stability of Soil Aggregates in Relation to Organic Constituents and Soil Water Content. Journal of Soil Science, 41(1): 73-83.

HCEFLCD (2007) Plan d'action du Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. Mise en œuvre du programme du gouvernement.

HCEFLCD (2010) Plan National d'Aménagement des Bassins Versants. Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et la Lutte Contre la Désertification. Résume et rapport de synthèse (52): 8-32.

HCEFLCD (2017) Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014 : Caractéristiques Démographiques et Socio-Economiques. DIRECTION REGIONALE DE FES-MEKNES.

Horton R (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin, 56(3): 275-370.

Horton R E (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. GSA Bulletin, 56(3): 275-370.

Hudson N (1992). Land Husbandry. Batsford, 192.

Hudson NW (1981) Conservation des sols. Londres, Batsford Academic and Educational Ltd., 324.

Huete A R (1988) A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment. Remote sensing of environment, 25: 295-309. DOI:10.1016/0034-4257(88)90106-X.

Hurrell J (1995) Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and. Science, 269(5224): 676–679. DOI: 10.1126/science.269.5224.676.

Hussein A, Al Rammahi J, Khassaf S (2018) Estimation of soil erodibility factor in RUSLE equation for euphrates river watershed using GIS. International Journal of GEOMATE 14(46): 164-169. DOI :10.21660/2018.46.87788.

Jankowski P, Andrienko N, Andrienko G (2001) Map-centred exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. International Journal of Geographical Information Science, 15(2): 101-127.

Janssen R, Rietveld P (1990) Multicriteria analysis and geographical information systems: an application to agricultural land use in the netherlands. (S. J. Scholten Henk J., Éd.) Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning (17): 129-139.

Jasrotia A, SinghR (2006) Modeling runoff and soil erosion in a catchment area, using the GIS, in the Himalayan region, India. Environ Geol 51(1) : 29-37. DOI : 10.1007/s00254-006-0301-6.

Jennan L (2004) Le Moyen Atlas central et ses bordures, mutations récentes et dynamiques rurales. Fès : Al Jawahir.

Jigorel A, Morin J (1994) Bilan de la sédimentation dans une retenue eutrophisée, quinze ans après sa création. Acte du 7ème Congrès International de Géologie de l'Ingénieur, Balkema Edition, Rotterdam 4 : 2667- 2674.

Kartic Kumar M, Annadurai R, Ravichandran P (2014) Assessment of Soil Erosion Susceptibility in Kothagiri Taluk Using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Geo-Spatial Technology. International Journal of Scientific and Research Publications 4(10): 9.

Karydas C, Sekuloska T, Silleos G (2009) Quantification and site-specification of the support practice factor when mapping soil erosion risk associated with olive plantations in the Mediterranean island of Crete. Environmental Monitoring and Assessment149(4): 19-28. DOI:10.1007/s10661-008-0179-8.

Kauffman S, Sombroek W, Mantel S (1998) Soils of rainforests: Characterization and major constraints of dominant forest soils in the humid tropics. (S. A. D., Éd.) Soils of Tropical Forest Ecosystems: 9-20.

Krige D (1950) Statisticlal approcach to some basic mine valuation problems. Journal of chemical, mettalurgical and mining society of South Africa, 52, 119-139.

Lamb P (1982) Persistence of Sub-Saharan drough. Nature, 299(5878): 46-48.

Lamb P, Peppler R (1991) West Africa. Teleconnections: Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge: 121-189. Cambridge University Press: Glantz M.H., Katz RW, and Nicholls N.

Landis J, Koch G (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics: 159-174.

Lavabre J, Andréassian V, Laroussinie O (2000) Eaux et forêts : la forêt, un outil de gestion des eaux ? Editions Quae, T. XXI (2) : 146-153.

Le Bissonnais Y (1988) Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat : 216. Université d'Orléans, France. Orléans, France : INRA.

Le Bissonnais Y, Arrouays D (1997) Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. European Journal of Soil Science, 48(1): 39-48.

Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V, Benkhadra H, Souchère V, Martin P (2005). Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. CATENA, 62(2-3) : 111-124.

Le Bissonnais Y, Le Souder C (1995) Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Sensibilité à la battance et à l'érosion., 2(1) : 43-56.

Leguédois S (2010). Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse de doctorat : 156. Université d'Orléans. INRA.

Lelong F, Roose E, Darthout R, Trevisan D (1993) Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés. Expérimentation au champ sous pluies simulées. SCIENCE DU SOL, 31(4) : 251- 279.

Leménager T, Bougnoux N, Roques N, Martin C (2014) Dynamiques démographiques, dégradation environnementale et restauration écologique : enjeux et opportunités. Thèse de doctorat. AFD-Agence Française de Développement, 89.

Léone F (1996) Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Thèse de doctorat. Grenoble 1, 286.

Lepoutre B, Martin J, Chamayou J (1967) Le causse Moyen atlasique. Les cahiers de la recherche, 24 : 207–226.

Llamas J (1985) Hydrologie générale : principes et applications. Québec: Gaëtan Morin.

Lu D, Li G, Valladares G, Batistella M (2004) Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS. Land Degrad Dev (15): 499-512. DOI : 10.1002/ldr.634.

Luterbacher J, Xoplaki E, Dietrich D, Rickli R, Jacobeit J, Beck C, Gyalistras D, Schmutz C, Wanner H (2002) Reconstruction of Sea Level Pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500. Climate Dynamics. DOI: 18. 545-561. 10.1007/s00382-001-0196-6.

MAPM (2019) Fonds de Développement Agricole. Les aides financières de l'Etat pour la promotion des investissements agricoles. Recueil ministériel. Ministère de l'Agriculture et la Pèche Maritime, 90.

Marbut C (1951) Soils: Their Genesis and Classification. Soil Science Society of America, 72 (6): 483.

Mariotti A, Dell'Aquila A (2012) Decadal climate variability in the Mediterranean region: Roles of large-scale forcings and regional processes. Climate Dynamics, 38(5-6) : 1129–1145. DOI : https://doi.org/10.1007/s00382-011-1056-7.

Martin J (1981) Le Moyen Atlas central : étude géomorphologique. Notes et mémoires du Service géologique (258 bis) : 445.

Martins O (1988) Flux of particulate inorganic matter through the Niger River into the Atlantic Ocean. Neth. Jour. Sea Res. 22(2): 91-97.

Mather M (2006) Land-use system. Dans H. Geist, Our Earth's Changing Land: An Encyclopaedia of Land-Use and Land-Cover Change, 2: 379-386.

Matheron G (1989) Estimating and Choosing. Springer, Berlin, Heidelberg, 140. DOI: org/10.1007/978-3-642-48817-7_7.

Mathieu C, Pieltain F (2003) Analyse chimique des sols: méthode choisies.(E. T. Doc, Éd.) France: Lavoisier.

Mati B, Morgan R, Gichuki F, Quinton J, Brewer T, Liniger H (2000) Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: a case study of the upper EwasoNg'iro North basin of Keny. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2: 78-86. DOI: 10.1002/ldr.944.

McKee B, Nolan D, John K (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. American Meteorological Society: 179-183.

Meade R, Yzyk T,Day T (1990) Movement and storage of sediment in rivers of the United States and Canada. The geology of North America (1) :255-280.

MENFPESRS (2021) Travaux de construction de divers bâtiments N° 03/2021. Appel d'offre. Ministère de l'Education Nationale, de la Formation Professionnelle, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Merle G, Nihouarn A, Daligault P (1996) Opérations de restauration et recolonisation naturelle sur la Sélune (Manche) après une opération de vidange de barrages. Hydrologie dans les pays celtiques. Actes du 1er Colloque Interceltique d'Hydrologie et de Gestion des Eaux. Rennes, France. Paris : INRA Editions 79 : 275-282.

Mesrar H (2016) Modélisation, quantification et définition des facteurs contrôlant le risque de l'érosion hydrique. Cas du bassin versant de l'oued Sahla, Rif central, Maroc. Thèse de doctorat d'état, 363, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès.

METLE (2018) Recueil du trafic routier. Ministère de l'équipement, du transport, de la logistique et de l'eau, Direction des Routes.

METLE (2021) Appel d'offre N°20/2021. Le Ministère de l'Equipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau.

Meyer L, Dabney S, Harmon W (1995) Sediment-trapping effectiveness of stiff-grass hedges. Transactions of the ASAE, 38(3) : 809-815.

Michard A (1976) Eléments de géologie marocaine. Notes et Mémoire Service Carte Géologique du Maroc (252) : 408.

Milliman J, Syvitski J (1992) Geomorphic/tectonic control of sediments. Discharge of sediment to the ocean: the importance of small mountain rivers. J. Geol. 100 : 525-544.

Mokhtari N, Lebailly L, Labailly P, Bock L (2014) Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét., 2(1) : 50-66.

Monnier G, Stengel P (1982). La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. Bull Tech. Info. (370-372): 503-512.

Moore I, Wilson J (1992) Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. Journal of Soil and Water Conservation 47(5) : 423-428.

Morin M, Bouchard J (2009) Concepts de base en sécurité civile. Sécurité civile Québec, 48.

Morschel J, Dennis F (2004) Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort lauragais. M@ppemonde 76(4) : 11.

Moukadiri A (1983) Les Enclaves ultrabasiques associées aux balsates alcalins dans le district volcanique d'Azrou-Timahdite (Moyen-Atlas, Maroc). Thèse de doctorat : 150. Univ. Clermont-F6.

Musy A, Higy C (2004) Hydrologie : Une science de la nature, 21 : 314. PPUR presses polytechniques et universitaires romandes.

Musy A, Higy C (2011) Hydrology: A Science of Nature. Taylor & Francis, 356.

Nalbantis I, Tsakiris G (2008) Assessment of Hydrological Drought Revisited. Water Resources Management, 23 : 881-897. DOI : https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1

Nejjari A, Gille E, François D (2001) Les longues chroniques pluviométriques et la caractérisation de la sécheresse récente au Nord du Moyen Atlas (Maroc). Mosella, 25(3-4) : 37-53.

Nejjari A (2002) La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin versant du Haut Sebou (Moyen Atlas septentrional - Maroc). Thèse de doctorat : 332. Metz.

NF EN ISO 10693 (2014) Qualité du sol - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode volumétrique. (X31-105). AFNOR.

NF ISO 10390 (2005) Qualité du sol - Détermination du pH. (X31-117). AFNOR.

Nicholson S (1994) Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent. The Holocène, 4(2) : 121-131.

Noin D (1970) La population rurale du Maroc Les Cahiers d'Outre-Mer, 27 (108) : 405-406.

O'Loughlin C, Zhang X (1986) The influence of fast-growing conifer plantations on shallow landsliding and earthflow movement in New Zealand steeplands. 18th IUFRO World Congress, Ljubljana (Yugoslavia). IUFRO.

OMM (1996) Guide des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. Publication OMM (168). Genève, Suisse.

PABV-HCEFLCD (1997) Etude d'aménagement du bassin versant à l'amont du barrage Allal El Fassi. Milieu Physique et socio-économique. 1, 69. Direction régionale des eaux et forêts du Moyen Atlas. Service des aménagements de forêts et de bassin versants.

PAM/PNUE (2000) Formulation et mise en œuvre des projets du PAC : Guide pratique. Athènes: CAR/PAP-PAM.

Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, Zanden E, Poesen J, Alewell C (2015) Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. Environmental science and policy 51: 23-34. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.03.012.

Panagos P, Imeson A, Meusburger K, Borrelli P, Poesen J, Alewell C (2016) Soil conservation in Europe: wish or reality. Land Degrad. Dev.27 : 1547-1551. DOI : 10.1002/ldr.2538.

PAP/CAR (1992) Rapport du Séminaire sur les résultats du Sous-projet de cartographie des processus érosifs dans les zones côtières méditerranéennes. Malaga : PAP-8/PP/ SM.1/8.

PAP/CAR (1996) Rapport de l'Atelier sur les "Lignes directrices pour l'application d'une méthodologie commune et consolidée de cartographie des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes" et les "Lignes directrices pour la mesure des processus. Barcelone : PAP-8/PP/W.2/1.

PAP/CAR (1998) Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. Centre d'Activité Régionales pour le Programme d'Action Prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO.

PAP/CAR (1998a) Directives pour l'approche intégrée au développement, à la gestion et à l'utilisation des ressources en eau. Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires : PAP-3/1998/G.1. Split.

PAP/CAR (2000) National reports on problems and practices of erosion control management in the Mediterranean region. Malaga: PAP-8/PP/SM.1/8.

Pearson K (1893) Asymmetrical frequency curves. Nature, 48(1252): 615-616.

Poesen J (1985) An improved splash transport model. Zeitschrift für Geomorphologie, 29(2) : 193-211.

Poirel A, Vindimian E, Garric J (1994) Gestion des vidanges de réservoirs, mesures prises pour préserver l'environnement et retour d'expérience sur une soixantaine de vidanges. 18ème Congrès des Grands Barrages, Commission Internationale des Grands. Durban : Q.69-R.9 : 321-349.

Prasannakumar V, Vijith H, Abinod S, Geetha N (2011) Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. Geoscience Frontiers 3(2) : 209-215. DOI : 10.1016/j.gsf.2011.11.003.

Qaini T (2013) Contribution à l'élaboration d'une méthodologie modèle pour l'aménagement antiérosif d'un Bassin Versant au Maroc. Mémoire: 181, Université Mohamed V Rabat.

Quansah C (1981). The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport. Journal of Soil Science, 32, 215-224.

Quezel P (1979) La Région Méditerranéenne française et ses essences forestières. Signification écologique dans le contexte circum-méditerranéen. Font Medit., 1(1) : 7-18.

Rafla A, Agrébaoui S, Hamroumi H (2005) 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 l'Oued Rmel. Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques Direction Générale de l'Aménagement et la Conservation des Terres Agricoles, Direction des Ressources en Sols. - Tunisie.

Rango A, Arnoldus H (1987) Aménagement des bassins versant. Cahiers techniques de la FAO, 36.

Rasolofoson R, FerraroP, JenkinsC, Jones J (2015) Effectiveness of Community Forest Management at reducing deforestation in Madagascar. Biological Conservation (184): 271–277. DOI: 10.1016/j.biocon.2015.01.027.

Renard K, Foster G, Weesies D, McCool D, Yoder D (1997) Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook 703: 404. (U. S. USDM, Éd.), Agriculture Research Service, Washington D.C.

Requier-Desjardins M (2008) Social Costs of Desertification in Africa: The Case of Migration. The Future of Drylands: International Scientific Conference on Desertification and Drylands Research: 569-581. Tunis, Tunisia: Springer-UNESCO.

Rey F, Ballais J, Marre A, Rovera G (2004) Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. Comptes rendus géoscience, 336(11) : 991-998.

Rey F, Chauvin C, Richard D, Mathys N, Rovéra G, Morel A (2002) Le piégeage des sédiments marneux par des barrières végétales (Alpes du Sud, France). Bull. Réseau Erosion (21): 331-345.

Riezebos H, Epema G (1985) Drop shape and erosivity. Part II: Splash detachment, transport and erosivity indices. Earth Surface Processes and Landforms, 10(1): 69-74.

Rippey B (1982) Sedimentary record of rainfall variations in a sub-humid lake. Nature (296) : 434-436.

Rishirumuhirwa T (1993) Facteurs anthropiques de l'érosion dans les régions des montagnes et hauts plateaux de la CEPGL (Burundi-Rwanda-Zaïre). Réseau Erosion-Bulletin (13): 53-62.

Robinson A (1977) Relationship between soil erosion and sediment delivery. Int. Ass. Hydrol. Sc.122 : 159-167.

Roche M (1963) Hydrologie de surface. Paris: Gauthier-Villars ORSTOM, 430.

Rojas O, Li Y, Cumani R (2014) Understanding the drought impact of El Niño on the global agricultural areas: an assessment using FAO's Agricultural Stress Index (ASI). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (23) : 42.

Roose E (1994) Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique de la FAO 70 : 420.

Roose E (1996) Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. Bull Réseau Erosion, 16 : 87-97.

Roose E, Sarrailh J (1990) Erodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologique. Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologique, 25 (12): 24.

Rosenfield G, Fitzpatrick-Lins K (1986) A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. Photogrammetric engineering and remote sensing, 52 (2): 223-227.

Rovéra G, Robert Y, Coubat M, Nedjaï R, Riser J (1999) Erosion et stades biorhexistasiques dans les ravines du Saignon (Alpes de Provence). Essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. La montagne méditerranéenne : paléoenvironnements, morphogenèse, aménagements, 28 : 109-115.

Saaty T, Vargas L (1980) Hierarchical analysis of behavior in competition: Prediction in chess. Behavioral science, 25(3) : 180-191. DOI : https://doi.org/10.1002/bs.3830250303.

Sabaoui A (1987) Structure et évolution alpine du moyen-atlas septentrional sur la transversale Tleta des Zrarda-Merhraoua (SW de Taza, Maroc). Thèse 3ème cycle : 189. Toulouse 3.

Sabaoui A (1998) Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen Atlas septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel-Ribat Al Khayr-Bou Iblane. Thèse de doctorat d'état, 432. Maroc : Université Mohammed V-Agdal, Rabat.

Sabaoui A, Obda K, Laaouane M (2009) Potentialités géologiques du développement local du Moyen Atlas septentrional : structures, paysages et histoire géologique. Geomaghreb (5) : 9-39.

Sadiki A (2005) Estimation des taux d'érosion et de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de Boussouab, Maroc nord oriental : Application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope ^{137}Cs et de la susceptibilité magnétique. Thèse de doctorat : 287. Faculté des Sciences Oujda.

Sala M, Calvo A (1990) Response of four different Mediterranean vegetation types to runoff and erosion. Vegetation and erosion. Processes and environments. Thornes, J. B. (ed): 347-362.

Salles C, Poesen J, Govers G (2000) Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy. Water Resources Research, 36(9): 2721-2729.

Schmidt S, Alewell C, Meusburger K (2019) Monthly RUSLE soil erosion risk of Swiss grasslands. Journal of Maps 15(2) : 247-256. DOI :10.1080/17445647.2019.1585980.

Seignobos R (2011) Pouillon J.(éd.) avec A. Messaoudi, D. Rauchenberger, O. Zhiri, 2009. Léon l'Africain. Paris, IISMM/Karthala. Journal des africanistes, 81(1): 255-258. DOI : https://doi.org/10.4000/africanistes.3865.

Shenavr B, Hosseini S (2014) Comparison of Multi-criteria evaluation (AHP and WLC approaches) for land capability assessment of urban development in GIS. International Journal of geomatics and geosciences, 4(3): 435-446.

Singh A (1986) Change detection in the tropical forest environment of north-eastern India using Landsat. Remote sensing and tropical land management, 44: 273-254.

Soler M, Sala M, Gallart F (1994) Post fire evolution of runoff and erosion during an eighteen-month period in Sala, M & Rubio. Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires. 149-161. Geoforma, Logroño.

Stengel P, Douglas J, Guérif J, Goss M, Monnier G, Cannell R (1984) Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. Soil and Tillage Research, 4(1): 35-53.

Stocker T, Qin D, Plattner G, Tignor M, Allen S, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P (2014) Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change: 1535. United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9781107415324.

Strahler A (1952) Hypsometry (area-altitude) analysis of erosional topography. Bull. Geol. Soc. Am., 63: 1117-1142.

Strahler A (1968) Quantitative geomorphology. Geomorphology. Encyclopaedia of Earth Science. DOI: doi.org/10.1007/3-540-31060-6_304.

Strahler A N (1964) Part II. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Handbook of Applied Hydrology: McGraw-Hill, New York: 4-39.

Tackett J, Pearson R (1965). Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. Soil Science, 99(6) : 407-413.

Tassin C (2012) Chapitre 4 : Matorrals, pinèdes et steppes en Méditerranée. In Paysages végétaux du domaine méditerranéen : Bassin méditerranéen, Californie, Chili central, Afrique du Sud, Australie méridionale : 153-192. Marseille : IRD Éditions. DOI : https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9794.

Termier H (1936). Etudes géologiques sur le Maroc central et le moyen-Atlas septentrional. Notes et Mém, 33, 1566. Serv. géol. Maroc.

Terzaghi K, Peck R, Mesri G (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice. (I. John Wiley and Sons, Éd.) New York: Third Edition.

Thornthwaite C (1948) An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review: 55-94.

Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G (2015) DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. Earth Science Informatics, 8(3): 697-709.

Tobin G, Montz B (2004) Natural Hazards and Technology: Vulnerability, Risk, and Community Response in Hazardous Environments. (C. S. Brunn S.D., Éd.) Geography and Technology: 547-570. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2353-8_23.

Tramblay Y, Badi W, Driouech F, El Adlouni S, Neppel L, Servat E (2012) Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. Global and Planetary Change, 82 : 104-114.

Tripet J P (1972) Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Thèse de doctorat : 183. Neuchâtel Université de Neuchâtel-Centre d'Hydrogéologie.

Tscharntke T, Klein A, Kruess A, Steffan-Dewenter I, Thies C (2005) Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. Ecology letters, 8(8): 857-874. DOI: doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00782. x.

Tucker C (1979) Red and Photographic Infrared l,lnear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote sensing of Environment, 8(2): 127-150. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

Van der Knijff JM, Jones RJA, Montanarella L (2000) Soil erosion risk assessment in Europe. EUR 19044 EN., European Soil Bureau. Joint Research Center of the European Commission, 34.

Van Leeuwen WJD, Sammons G (2004) Vegetation dynamics and soil erosion modelling using remotely sensed data (MODIS) and GIS. Proceeding of the Tenth Biennial USDA Forest Service Remote Sensing Applications Conference, Salt Lake City 5-9 April 2004.

Walkley A, Black I (1934) Estimation of Soil Organic Carbon by the Chromic Acid Titration Method. Soil Science: 29-38.

William R (2011) Monitoring and modeling of soil from Southern Ontaroi basins during pre-development and development activities. Engineering thesis, 246, University of Guelph, Canada.

Willmott C, Robeson S, Feddema J (1994) Estimating continental and terrestrial precipitation averages from rain-gauge networks. International Journal of Climatology, 14(4): 403-414. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.3370140405.

Willward A, Mersey J (1999) Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed. Catena 2(38): 109-129.

Wischmeier W, Smith D (1958) Rainfall energy and its relationship to soil loss. Eos, Transactions American Geophysical Union, 39(2): 285-291.

Wischmeier W, Smith D (1978) Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science. U.S. Dept. Agriculture. Agric. Handbook 537: 60.

Wisner B, Blaikie P, Cannon T, Davis I (2003) At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. London: Routledge, 471.

Wong J, Li H (2008) Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multicriteria analysis of the selection of intelligent building systems. Building and Environment, 43(1): 108-125. DOI: doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.019.

Woodruff C (1948) Erosion in Relation to Rainfall, Crop Cover, and Slope on a Greenhouse Plot 1. Soil Science Society of America Journal, 12(C): 475-478.

Yurdakul M (2004) AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection. Journal of Materials Processing Technology, 146(3): 365-376. DOI: doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.026

Zêzere J, Garcia R, Oliveira S (2008) Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Libon (Portugal). Geomorphology, 94: 467-495.

Zingg A (1940) Degree and length of land slope as it affects soil loss in run-off. Agric. Engng., 21 : 59-64.

ANNEXES

Annexes

Tableau 68: Age, genre de nombre de personnes par famille de la population du bassin versant Allal Al Fassi

Provinces	Communes	Population					
		Structure d'âge			Genre		Nombre
		Moins de 14 ans	Plus de 60 ans	14 ans à 60	Masculin	Féminin	Nb. / F
Sefrou	Adrej	24,30	17,90	57,80	45,47	54,53	5,00
Sefrou	Aghbalou Aqorar	29,70	10,90	59,40	51,17	48,83	4,00
Sefrou	Ahl Sidi Lahcen	26,90	14,60	58,50	49,69	50,31	6,00
Sefrou	Ain Timguenai	27,30	11,50	61,20	49,15	50,85	5,00
Boulemane	Ait Bazza	30,00	12,20	57,80	50,42	49,58	5,00
Boulemane	Ait El Mane	26,40	17,40	56,20	46,03	53,97	3,00
Sefrou	Ait Sebaa Lajrouf	31,60	8,50	59,90	49,67	50,33	4,00
Boulemane	Almis Marmoucha	32,20	12,60	55,20	49,90	50,10	3,00
Sefrou	Azzaba	27,40	12,60	60,00	48,84	51,16	5,00
Taza	Barkine	34,50	10,10	55,40	49,95	50,05	4,00
Sefrou	Bir Tam Tam	24,20	13,50	62,30	49,64	50,36	5,00
Boulemane	Boulmane	25,20	10,90	63,90	47,09	52,91	3,00
Taza	Bouyablane	35,90	7,10	57,00	51,20	48,80	5,00
Sefrou	Dar El Hamra	27,40	15,60	57,00	47,04	52,96	5,00
Ifrane	Dayat Aoua	33,00	6,90	60,10	50,21	49,79	4,00
Sefrou	El Menzel	26,70	11,00	62,30	46,80	53,20	5,00
Boulemane	El Mers	27,80	14,30	57,90	49,44	50,56	4,00
Boulemane	Enjil	30,50	10,60	58,90	48,79	51,21	5,00
Boulemane	Guigou	29,25	9,35	61,40	43,24	56,76	4,00
Sefrou	Ighzrane	25,20	16,40	58,40	46,98	53,02	4,00
Boulemane	Imouzzer Marmoucha	28,20	9,80	62,00	47,37	52,63	5,00
Khenifra	Itzer	25,60	12,60	61,80	46,50	53,50	4,00
Sefrou	Laanoussar	29,80	10,40	59,80	50,99	49,01	5,00
Taza	Maghraoua	30,10	12,20	57,70	48,55	51,45	5,00
Sefrou	Mtarnagha	25,30	15,80	58,90	47,54	52,46	5,00
Boulemane	Oulad Ali Youssef	31,30	13,00	55,70	49,96	50,04	5,00
Sefrou	Oulad Mkoudou	26,80	15,50	57,70	47,29	52,71	4,00
Sefrou	Ribate el Kheir	28,30	10,60	61,10	46,41	53,59	4,00
Boulemane	Serghina	27,90	12,70	59,40	48,13	51,87	4,00
Ifrane	Sidi El Makhfi	28,70	9,80	61,50	49,92	50,08	4,00
Sefrou	Sidi Youssef Ben Ahmed	30,20	10,00	59,80	50,26	49,74	5,00
Boulemane	Skoura M'Daz	27,30	13,90	58,80	48,01	51,99	4,00
Sefrou	Tafajight	28,10	15,80	56,10	48,62	51,38	6,00
Boulemane	Talzemt	24,70	14,70	60,60	50,00	50,00	3,00
Taza	Tazarine	19,10	13,00	67,90	49,64	50,36	5,00
Sefrou	Tazouta	29,30	12,70	58,00	51,04	48,96	6,00
Ifrane	Timahdite	29,40	9,40	61,20	50,27	49,73	5,00
Taza	Zrarda	29,40	10,80	59,80	46,01	53,99	4,00

Tableau 69: Indice de perte selon l'âge le genre le nombre de personne par famille de la population du bassin versant Allal Al Fassi

		Population		
		Indices de pertes		
Provinces	**Communes**	**Structure d'âge**	**Genre**	**Nombre**
Sefrou	**Adrej**	0,98	0,96	0,83
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,88	0,85	0,67
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,93	0,88	1,00
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,86	0,89	0,83
Boulemane	**Ait Bazza**	0,92	0,87	0,83
Boulemane	**Ait El Mane**	1,00	0,95	0,50
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,85	0,88	0,67
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,97	0,87	0,50
Sefrou	**Azzaba**	0,89	0,89	0,83
Taza	**Barkine**	0,94	0,87	0,67
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,86	0,88	0,83
Boulemane	**Boulmane**	0,81	0,93	0,50
Taza	**Bouyablane**	0,88	0,85	0,83
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,97	0,93	0,83
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,83	0,87	0,67
Sefrou	**El Menzel**	0,83	0,93	0,83
Boulemane	**El Mers**	0,94	0,88	0,67
Boulemane	**Enjil**	0,88	0,89	0,83
Boulemane	**Guigou**	0,83	1,00	0,67
Sefrou	**Ighzrane**	0,95	0,93	0,67
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,83	0,92	0,83
Khenifra	**Itzer**	0,86	0,94	0,67
Sefrou	**Laanoussar**	0,87	0,86	0,83
Taza	**Maghraoua**	0,92	0,90	0,83
Sefrou	**Mtarnagha**	0,94	0,92	0,83
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,96	0,87	0,83
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,96	0,92	0,67
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,85	0,94	0,67
Boulemane	**Serghina**	0,90	0,91	0,67
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,83	0,87	0,67
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,86	0,87	0,83
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,92	0,91	0,67
Sefrou	**Tafajight**	0,98	0,90	1,00
Boulemane	**Talzemt**	0,90	0,87	0,50
Taza	**Tazarine**	0,77	0,88	0,83
Sefrou	**Tazouta**	0,92	0,85	1,00
Ifrane	**Timahdite**	0,83	0,87	0,83
Taza	**Zrarda**	0,87	0,95	0,67

Tableau 70: Indice de perte selon la qualité de vie de la population du bassin versant Allal Al Fassi

Vulnérabilité fonctionnelle selon la qualité de vie						
		Indices de pertes				
Provinces	**Communes**	**Indice de développement humain**	**Indice de développement social**	**Indice de pauvreté**	**Indice de vulnérabilité**	**Indice de perte de la qualité de vie**
Sefrou	**Adrej**	0,64	0,29	0,25	0,63	**0,51**
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,56	0,21	0,30	0,76	**0,51**
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,60	0,28	0,40	0,87	**0,60**
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,62	0,27	0,67	0,95	**0,70**
Boulemane	**Ait Bazza**	0,69	0,33	0,60	0,94	**0,71**
Boulemane	**Ait El Mane**	0,62	0,43	0,49	0,88	**0,67**
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,66	0,24	0,68	0,88	**0,69**
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,59	0,19	0,60	0,97	**0,65**
Sefrou	**Azzaba**	0,54	0,15	0,46	0,83	**0,55**
Taza	**Barkine**	0,79	0,84	0,47	1,00	**0,86**
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,64	0,19	0,49	0,88	**0,61**
Boulemane	**Boulmane**	0,50	0,27	0,24	0,66	**0,46**
Taza	**Bouyablane**	0,88	1,00	0,73	0,98	**1,00**
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,55	0,31	0,19	0,62	**0,47**
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,78	0,33	1,00	0,85	**0,82**
Sefrou	**El Menzel**	0,48	0,23	0,23	0,73	**0,46**
Boulemane	**El Mers**	0,62	0,42	0,56	0,94	**0,71**
Boulemane	**Enjil**	0,75	0,26	0,84	0,81	**0,74**
Boulemane	**Guigou**	0,69	0,24	0,54	0,88	**0,66**
Sefrou	**Ighzrane**	0,63	0,34	0,32	0,79	**0,58**
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,54	0,27	0,27	0,75	**0,51**
Khenifra	**Itzer**	0,60	0,31	0,24	0,66	**0,50**
Sefrou	**Laanoussar**	0,63	0,44	0,38	0,87	**0,64**
Taza	**Maghraoua**	0,71	0,62	0,75	0,89	**0,83**
Sefrou	**Mtarnagha**	0,56	0,28	0,25	0,70	**0,50**
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,78	0,49	0,52	0,95	**0,76**
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,53	0,21	0,34	0,81	**0,52**
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,58	0,23	0,54	0,94	**0,64**
Boulemane	**Serghina**	0,60	0,24	0,47	0,86	**0,60**
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,62	0,41	0,34	0,98	**0,65**
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,56	0,20	0,20	0,65	**0,45**
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,59	0,20	0,54	0,83	**0,60**
Sefrou	**Tafajight**	0,65	0,41	0,18	0,66	**0,53**
Boulemane	**Talzemt**	0,73	0,36	0,52	0,99	**0,72**
Taza	**Tazarine**	0,57	0,74	0,40	0,84	**0,71**
Sefrou	**Tazouta**	0,67	0,29	0,37	0,83	**0,60**
Ifrane	**Timahdite**	0,75	0,23	0,52	1,00	**0,69**
Taza	**Zrarda**	0,57	0,45	0,37	0,83	**0,62**

Tableau 71: Vulnérabilité fonctionnelle selon la méconnaissance

Provinces	Communes	Indices de pertes				
		Analphabétisme	Niveau de scolarité			Indice de perte de méconnaissance
			Primaire	Secondaire	Universitaire	
Sefrou	**Adrej**	0,69	0,74	0,18	0,16	**0,50**
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,69	0,86	0,32	0,38	**0,64**
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,66	0,89	0,28	0,36	**0,62**
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,54	0,92	0,14	0,11	**0,48**
Boulemane	**Ait Bazza**	0,86	0,72	0,74	0,42	**0,77**
Boulemane	**Ait El Mane**	0,83	0,73	0,41	0,28	**0,64**
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,66	0,83	0,22	0,36	**0,59**
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,75	0,77	0,40	0,24	**0,61**
Sefrou	**Azzaba**	0,59	0,93	0,19	0,31	**0,57**
Taza	**Barkine**	0,86	0,72	0,78	0,42	**0,79**
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,63	0,86	0,19	0,16	**0,52**
Boulemane	**Boulmane**	0,42	0,91	0,10	0,06	**0,42**
Taza	**Bouyablane**	0,94	0,59	1,00	1,00	**1,00**
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,82	0,75	0,42	0,63	**0,74**
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,75	0,80	0,42	0,56	**0,72**
Sefrou	**El Menzel**	0,37	1,00	0,11	0,06	**0,44**
Boulemane	**El Mers**	0,74	0,80	0,31	0,31	**0,61**
Boulemane	**Enjil**	0,75	0,72	0,22	0,22	**0,54**
Boulemane	**Guigou**	0,54	0,92	0,15	0,10	**0,49**
Sefrou	**Ighzrane**	0,85	0,66	0,33	0,38	**0,63**
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,51	0,87	0,12	0,07	**0,45**
Khenifra	**Itzer**	0,43	1,00	0,12	0,08	**0,46**
Sefrou	**Laanoussar**	0,86	0,72	0,74	0,50	**0,80**
Taza	**Maghraoua**	0,91	0,59	0,33	0,31	**0,61**
Sefrou	**Mtarnagha**	0,63	0,93	0,27	0,22	**0,58**
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,84	0,76	0,58	0,33	**0,71**
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,58	0,90	0,19	0,14	**0,51**
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,49	0,93	0,13	0,09	**0,46**
Boulemane	**Serghina**	0,67	0,77	0,18	0,19	**0,51**
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,75	0,74	0,22	0,24	**0,55**
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,66	0,88	0,27	0,29	**0,60**
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,65	0,83	0,19	0,14	**0,51**
Sefrou	**Tafajight**	1,00	0,50	0,32	0,56	**0,67**
Boulemane	**Talzemt**	0,94	0,61	0,56	0,56	**0,75**
Taza	**Tazarine**	0,81	0,74	0,54	0,50	**0,73**
Sefrou	**Tazouta**	0,80	0,78	0,56	0,71	**0,81**
Ifrane	**Timahdite**	0,69	0,83	0,25	0,19	**0,55**
Taza	**Zrarda**	0,46	0,92	0,11	0,11	**0,45**

Tableau 72: Indice de perte selon la qualité de vie

Provinces	Communes	Indices de pertes				
		Indice de développement humain	Indice de développement social	Indice de pauvreté	Indice de vulnérabilité	Indice de perte de la qualité de vie
Sefrou	**Adrej**	0,64	0,29	0,25	0,63	**0,51**
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,56	0,21	0,30	0,76	**0,51**
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,60	0,28	0,40	0,87	**0,60**
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,62	0,27	0,67	0,95	**0,70**
Boulemane	**Ait Bazza**	0,69	0,33	0,60	0,94	**0,71**
Boulemane	**Ait El Mane**	0,62	0,43	0,49	0,88	**0,67**
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,66	0,24	0,68	0,88	**0,69**
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,59	0,19	0,60	0,97	**0,65**
Sefrou	**Azzaba**	0,54	0,15	0,46	0,83	**0,55**
Taza	**Barkine**	0,79	0,84	0,47	1,00	**0,86**
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,64	0,19	0,49	0,88	**0,61**
Boulemane	**Boulmane**	0,50	0,27	0,24	0,66	**0,46**
Taza	**Bouyablane**	0,88	1,00	0,73	0,98	**1,00**
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,55	0,31	0,19	0,62	**0,47**
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,78	0,33	1,00	0,85	**0,82**
Sefrou	**El Menzel**	0,48	0,23	0,23	0,73	**0,46**
Boulemane	**El Mers**	0,62	0,42	0,56	0,94	**0,71**
Boulemane	**Enjil**	0,75	0,26	0,84	0,81	**0,74**
Boulemane	**Guigou**	0,69	0,24	0,54	0,88	**0,66**
Sefrou	**Ighzrane**	0,63	0,34	0,32	0,79	**0,58**
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,54	0,27	0,27	0,75	**0,51**
Khenifra	**Itzer**	0,60	0,31	0,24	0,66	**0,50**
Sefrou	**Laanoussar**	0,63	0,44	0,38	0,87	**0,64**
Taza	**Maghraoua**	0,71	0,62	0,75	0,89	**0,83**
Sefrou	**Mtarnagha**	0,56	0,28	0,25	0,70	**0,50**
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,78	0,49	0,52	0,95	**0,76**
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,53	0,21	0,34	0,81	**0,52**
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,58	0,23	0,54	0,94	**0,64**
Boulemane	**Serghina**	0,60	0,24	0,47	0,86	**0,60**
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,62	0,41	0,34	0,98	**0,65**
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,56	0,20	0,20	0,65	**0,45**
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,59	0,20	0,54	0,83	**0,60**
Sefrou	**Tafajight**	0,65	0,41	0,18	0,66	**0,53**
Boulemane	**Talzemt**	0,73	0,36	0,52	0,99	**0,72**
Taza	**Tazarine**	0,57	0,74	0,40	0,84	**0,71**
Sefrou	**Tazouta**	0,67	0,29	0,37	0,83	**0,60**
Ifrane	**Timahdite**	0,75	0,23	0,52	1,00	**0,69**
Taza	**Zrarda**	0,57	0,45	0,37	0,83	**0,62**

Tableau 73: Types de logement par communes

Province	Commune	Types de logement			
		Villa, Appartement, Maison marocaine	Logement de type rural	Habitat sommaire	Autres
Sefrou	**Adrej**	16,39	82,2	0,2	1,2
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	20,36	77,7	0,8	1,1
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	59,59	40,2	0,1	0,1
Sefrou	**Ain Timguenai**	44,10	51,8	3,4	0,7
Boulemane	**Ait Bazza**	12,03	87,8	0,0	0,2
Boulemane	**Ait El Mane**	3,33	96,4	0,0	0,2
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	32,96	60,9	5,4	0,8
Boulemane	**Almis Marmoucha**	13,47	84,0	1,1	1,5
Sefrou	**Azzaba**	84,29	15,0	0,3	0,4
Taza	**Barkine**	3,81	94,7	0,6	0,9
Sefrou	**Bir Tam Tam**	19,67	78,2	0,6	1,5
Boulemane	**Boulemane**	86,36	4,1	9,2	0,4
Taza	**Bouyablane**	2,73	96,72	0,00	0,55
Sefrou	**Dar El Hamra**	29,50	69,76	0,53	0,21
Ifrane	**Dayat Aoua**	89,75	7,91	1,76	0,59
Sefrou	**El Menzel**	94,01	1,31	3,98	0,70
Boulemane	**El Mers**	20,82	76,61	1,71	0,86
Boulemane	**Enjil**	22,22	75,84	0,61	1,34
Boulemane	**Guigou**	53,97	41,78	3,56	0,69
Sefrou	**Ighzrane**	53,51	45,02	1,08	0,39
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	93,67	0,39	5,36	0,58
Khénifra	**Itzer**	48,27	40,50	10,27	0,96
Sefrou	**Laanoussar**	21,86	75,44	0,88	1,82
Taza	**Maghraoua**	8,8	89,7	0,6	0,9
Sefrou	**Mtarnagha**	5,52	92,37	1,31	0,80
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	3,64	95,47	0,44	0,44
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	37,79	60,94	0,60	0,67
Sefrou	**Ribate El Kheir**	92,99	5,03	1,16	0,83
Boulemane	**Serghina**	22,13	77,0	0,0	0,9
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	44,47	47,4	7,0	1,1
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	96,16	2,2	0,9	0,7
Boulemane	**Skoura M'Daz**	53,03	45,4	1,0	0,6
Sefrou	**Tafajight**	4,62	93,5	1,8	0,0
Boulemane	**Talzemt**	29,13	70,4	0,0	0,5
Taza	**Tazarine**	5,78	93,1	0,2	0,9
Sefrou	**Tazouta**	14,40	82,0	3,0	0,7
Ifrane	**Timahdite**	51,64	40,9	4,5	2,9
Taza	**Zrarda**	74,78	23,9	0,7	0,6

Tableau 74: Indice de perte par matériaux de construction

Province	Commune	Indice de perte selon les matériaux de construction			Indice de perte f (type de matériaux)
		Béton	Pierres	Bois/métal/Autre	
Sefrou	**Adrej**	0,20	0,85	0,13	0,58
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,16	0,81	0,17	0,56
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,06	0,42	0,02	0,24
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,08	0,54	0,36	0,48
Boulemane	**Ait Bazza**	0,28	0,91	0,01	0,59
Boulemane	**Ait El Mane**	1,00	1,00	0,02	0,99
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,10	0,63	0,55	0,63
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,25	0,87	0,23	0,66
Sefrou	**Azzaba**	0,04	0,16	0,06	0,13
Taza	**Barkine**	0,87	0,98	0,13	0,97
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,17	0,81	0,19	0,57
Boulemane	**Boulemane**	0,04	0,04	0,85	0,46
Taza	**Bouyablane**	1,00	1,0	0,0	1,00
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,11	0,72	0,07	0,44
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,04	0,08	0,21	0,16
Sefrou	**El Menzel**	0,04	0,01	0,42	0,23
Boulemane	**El Mers**	0,16	0,79	0,23	0,58
Boulemane	**Enjil**	0,15	0,79	0,17	0,54
Boulemane	**Guigou**	0,06	0,43	0,38	0,43
Sefrou	**Ighzrane**	0,06	0,47	0,13	0,32
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,04	0,00	0,53	0,28
Khénifra	**Itzer**	0,07	0,42	1,00	0,73
Sefrou	**Laanoussar**	0,15	0,78	0,24	0,57
Sefrou	**Mtarnagha**	0,60	0,96	0,19	0,85
Taza	**Maghraoua**	0,31	0,9	0,1	0,67
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,75	1,0	0,1	0,89
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,09	0,63	0,11	0,41
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,04	0,05	0,18	0,13
Boulemane	**Serghina**	0,15	0,80	0,08	0,50
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,07	0,49	0,72	0,63
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,03	0,02	0,14	0,10
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,06	0,47	0,14	0,33
Sefrou	**Tafajight**	0,72	0,97	0,16	0,91
Boulemane	**Talzemt**	0,11	0,73	0,04	0,43
Taza	**Tazarine**	0,58	0,97	0,10	0,80
Sefrou	**Tazouta**	0,23	0,85	0,32	0,69
Ifrane	**Timahdite**	0,06	0,42	0,66	0,56
Taza	**Zrarda**	0,04	0,25	0,12	0,20

Tableau 75: Ages, étages et fonctions des constructions par communes

Province	Commune	Construction					
		Âge		Étages		Fonctions	
		Avant 1980	Après 1980	2 ou moins	Plus que 2	Résidentiel	Non résidentiel
Sefrou	**Adrej**	78,80	21,20	100,00	0,00	79,80	20,20
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	39,85	60,15	100,00	0,00	80,90	19,10
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	56,20	43,80	100,00	0,00	85,00	15,00
Sefrou	**Ain Timguenai**	35,65	64,35	100,00	0,00	82,60	17,40
Boulemane	**Ait Bazza**	62,55	37,45	100,00	0,00	91,30	8,70
Boulemane	**Ait El Mane**	73,85	26,15	99,60	0,40	86,10	13,90
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	31,65	68,35	100,00	0,00	77,40	22,60
Boulemane	**Almis Marmoucha**	65,70	34,30	99,80	0,20	87,50	12,50
Sefrou	**Azzaba**	48,70	51,30	99,80	0,20	88,00	12,00
Taza	**Barkine**	57,90	42,10	100,00	0,00	92,40	7,60
Sefrou	**Bir Tam Tam**	45,15	54,85	99,90	0,10	87,90	12,10
Boulemane	**Boulmane**	57,70	42,30	98,80	1,20	61,30	38,70
Taza	**Bouyablane**	68,05	31,95	100,00	0,00	92,60	7,40
Sefrou	**Dar El Hamra**	49,10	50,90	100,00	0,00	85,60	14,40
Ifrane	**Dayat Aoua**	21,55	78,45	100,00	0,00	85,30	14,70
Sefrou	**El Menzel**	42,60	57,40	98,60	1,40	66,30	33,70
Boulemane	**El Mers**	50,70	49,30	98,90	1,10	86,00	14,00
Boulemane	**Enjil**	54,85	45,15	98,40	1,60	82,20	17,80
Boulemane	**Guigou**	30,95	69,05	100,00	0,00	70,30	29,70
Sefrou	**Ighzrane**	53,25	46,75	99,90	0,10	90,80	9,20
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	38,35	61,65	98,70	1,30	63,80	36,20
Khenifra	**Itzer**	47,50	52,50	99,10	0,90	69,10	30,90
Sefrou	**Laanoussar**	33,00	67,00	99,90	0,10	84,00	16,00
Taza	**Maghraoua**	68,55	31,45	99,50	0,50	90,10	9,90
Sefrou	**Mtarnagha**	48,60	51,40	99,10	0,90	92,30	7,70
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	76,65	23,35	100,00	0,00	88,40	11,60
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	55,45	44,55	100,00	0,00	87,30	12,70
Sefrou	**Ribate el Kheir**	26,20	73,80	99,90	0,10	72,60	27,40
Boulemane	**Serghina**	51,75	48,25	100,00	0,00	81,10	18,90
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	36,70	63,30	100,00	0,00	63,50	36,50
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	31,70	68,30	99,50	0,50	80,80	19,20
Boulemane	**Skoura M'Daz**	46,30	53,70	98,70	1,30	77,90	22,10
Sefrou	**Tafajight**	77,40	22,60	100,00	0,00	94,40	5,60
Boulemane	**Talzemt**	67,55	32,45	100,00	0,00	94,40	5,60
Taza	**Tazarine**	69,50	30,50	100,00	0,00	94,00	6,00
Sefrou	**Tazouta**	53,65	46,35	99,90	0,10	91,10	8,90
Ifrane	**Timahdite**	38,50	61,50	99,50	0,50	68,70	31,30
Taza	**Zrarda**	36,85	63,15	100,00	0,00	68,50	31,50

Tableau 76: Indice de perte par âge, étages et fonctions des constructions

Province	Commune	Indice de perte f (âge, étages et fonctions des constructions)					
		Constructions					
		Age		Etages		Fonctions	
		Avant 1980	Après 1980	2 ou moins	Plus que 2	Résidentiel	Non résidentiel
Sefrou	**Adrej**	1,00	1,00	1,00	0,00	0,85	0,28
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,51	0,35	1,00	0,00	0,86	0,29
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,71	0,48	1,00	0,00	0,90	0,37
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,45	0,33	1,00	0,00	0,88	0,32
Boulemane	**Ait Bazza**	0,79	0,57	1,00	0,00	0,97	0,64
Boulemane	**Ait El Mane**	0,94	0,81	1,00	0,00	0,91	0,40
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,40	0,31	1,00	0,00	0,82	0,25
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,83	0,62	1,00	0,00	0,93	0,45
Sefrou	**Azzaba**	0,62	0,41	1,00	0,00	0,93	0,47
Taza	**Barkine**	0,73	0,50	1,00	0,00	0,98	0,74
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,57	0,39	1,00	0,00	0,93	0,46
Boulemane	**Boulmane**	0,73	0,50	0,99	0,01	0,65	0,14
Taza	**Bouyablane**	0,86	0,66	1,00	0,00	0,98	0,76
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,62	0,42	1,00	0,00	0,91	0,39
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,27	0,27	1,00	0,00	0,90	0,38
Sefrou	**El Menzel**	0,54	0,37	0,99	0,01	0,70	0,17
Boulemane	**El Mers**	0,64	0,43	0,99	0,01	0,91	0,40
Boulemane	**Enjil**	0,70	0,47	0,98	0,02	0,87	0,31
Boulemane	**Guigou**	0,39	0,31	1,00	0,00	0,74	0,19
Sefrou	**Ighzrane**	0,68	0,45	1,00	0,00	0,96	0,61
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,49	0,34	0,99	0,01	0,68	0,15
Khenifra	**Itzer**	0,60	0,40	0,99	0,01	0,73	0,18
Sefrou	**Laanoussar**	0,42	0,32	1,00	0,00	0,89	0,35
Taza	**Maghraoua**	0,87	0,67	1,00	0,01	0,95	0,57
Sefrou	**Mtarnagha**	0,62	0,41	0,99	0,01	0,98	0,73
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,97	0,91	1,00	0,00	0,94	0,48
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,70	0,48	1,00	0,00	0,92	0,44
Sefrou	**Ribate el Kheir**	0,33	0,29	1,00	0,00	0,77	0,20
Boulemane	**Serghina**	0,66	0,44	1,00	0,00	0,86	0,30
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,47	0,33	1,00	0,00	0,67	0,15
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,40	0,31	1,00	0,01	0,86	0,29
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,59	0,39	0,99	0,01	0,83	0,25
Sefrou	**Tafajight**	0,98	0,94	1,00	0,00	1,00	1,00
Boulemane	**Talzemt**	0,86	0,65	1,00	0,00	1,00	1,00
Taza	**Tazarine**	0,88	0,70	1,00	0,00	1,00	0,93
Sefrou	**Tazouta**	0,68	0,46	1,00	0,00	0,97	0,63
Ifrane	**Timahdite**	0,49	0,34	1,00	0,01	0,73	0,18
Taza	**Zrarda**	0,47	0,34	1,00	0,00	0,73	0,18

Tableau 77: Linéaire par catégorie de route dans le bassin versant Allal Al Fassi

Province	Commune	Linéaire par catégorie de route (Km)			
		RN	RR	RP	Pistes
Sefrou	Adrej	0,000	0,000	39,577	88,461
Sefrou	Aghbalou Aqorar	0,000	0,000	20,351	10,109
Sefrou	Ahl Sidi Lahcen	0,000	5,723	22,901	14,504
Sefrou	Ain Timguenai	0,000	5,881	0,837	0,900
Boulemane	Ait Bazza	0,000	19,669	14,613	48,736
Boulemane	Ait El Mane	8,971	2,661	26,602	83,296
Sefrou	Ait Sebaa Lajrouf	0,000	0,000	0,029	0,000
Boulemane	Almis Marmoucha	0,000	0,000	0,000	0,043
Sefrou	Azzaba	0,000	3,466	4,738	0,000
Taza	Barkine	1,034	0,000	0,000	8,819
Sefrou	Bir Tam Tam	0,000	0,000	8,732	5,664
Boulemane	Boulemane	0,000	0,000	2,357	3,887
Taza	Bouyablane	-	-	-	-
Sefrou	Dar El Hamra	0,000	0,000	28,255	58,345
Ifrane	Dayat Aoua	0,000	6,475	6,337	22,241
Sefrou	El Menzel	0,000	6,452	2,052	6,200
Boulemane	El Mers	0,000	0,000	29,437	106,553
Boulemane	Enjil	0,000	4,414	0,000	13,109
Boulemane	Guigou	0,000	55,950	60,087	163,447
Sefrou	Ighzrane	0,000	44,683	52,856	85,273
Boulemane	Imouzzer Marmoucha	2,815	0,000	0,000	3,596
Khénifra	Itzer	6,557	0,000	0,000	14,630
Sefrou	Laanoussar	0,000	24,480	35,665	88,637
Taza	Maghraoua	-	-	-	-
Sefrou	Mtarnagha	0,000	9,525	9,779	7,587
Boulemane	Oulad Ali Youssef	-	-	-	-
Sefrou	Oulad Mkoudou	0,000	0,000	19,601	54,403
Sefrou	Ribate El Kheir	0,000	3,360	6,120	12,650
Boulemane	Serghina	0,000	25,731	11,095	28,495
Ifrane	Sidi El Makhfi	0,000	0,000	11,580	9,160
Sefrou	Sidi Youssef Ben Ahmed	0,000	4,406	9,295	10,964
Boulemane	Skoura M'Daz	0,000	0,000	48,066	103,270
Sefrou	Tafajight	0,000	0,000	11,594	33,052
Boulemane	Talzemt	31,637	14,255	17,951	186,474
Taza	Tazarine	0,000	0,000	18,130	3,029
Sefrou	Tazouta	0,000	0,000	27,814	36,946
Ifrane	Timahdite	33,126	0,000	50,201	211,581
Taza	Zrarda	0,000	0,000	0,000	3,297

Tableau 78: Estimation du nombre de véhicule par jour

Province	Commune	Nombre de véhicule par catégorie de route (Km. veh. /J.)							
		RN	Nb. Veh.Km/j	RR	Nb. veh/j	RP	Nb. veh/j	Pistes	Nb. veh/j
Sefrou	**Adrej**	0,00	0,00	0,00	0,00	39,58	31581,66	88,46	-
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,00	0,00	0,00	0,00	20,35	16239,58	10,11	-
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,00	0,00	5,72	11987,97	22,90	18274,07	14,50	-
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,00	0,00	5,88	12320,87	0,84	667,73	0,90	-
Boulemane	**Ait Bazza**	0,00	0,00	19,67	41203,97	14,61	11660,64	48,74	-
Boulemane	**Ait El Mane**	8,97	35717,60	2,66	5575,35	26,60	21227,53	83,30	-
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	23,00	0,00	-
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	-
Sefrou	**Azzaba**	0,00	0,00	3,47	7261,71	4,74	3780,70	0,00	-
Taza	**Barkine**	1,03	4115,10	0,00	0,00	0,00	0,00	8,82	-
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,00	0,00	0,00	0,00	8,73	6968,14	5,66	-
Boulemane	**Boulemane**	0,00	0,00	0,00	0,00	2,36	1880,74	3,89	-
Taza	**Bouyablane**	-	-	-	-	-	-	-	-
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,00	0,00	0,00	0,00	28,26	22546,81	58,34	-
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,00	0,00	6,48	13565,08	6,34	5056,73	22,24	-
Sefrou	**El Menzel**	0,00	0,00	6,45	13515,38	2,05	1637,25	6,20	-
Boulemane	**El Mers**	0,00	0,00	0,00	0,00	29,44	23489,51	106,55	-
Boulemane	**Enjil**	0,00	0,00	4,41	9245,84	0,00	0,00	13,11	-
Boulemane	**Guigou**	0,00	0,00	55,95	117207,73	60,09	47947,85	163,45	-
Sefrou	**Ighzrane**	0,00	0,00	44,68	93605,07	52,86	42177,29	85,27	-
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	2,82	11209,78	0,00	0,00	0,00	0,00	3,60	-
Khénifra	**Itzer**	6,56	26108,76	0,00	0,00	0,00	0,00	14,63	-
Sefrou	**Laanoussar**	0,00	0,00	24,48	51281,66	35,66	28459,44	88,64	-
Taza	**Maghraoua**	-	-	-	-	-	-	-	-
Sefrou	**Mtarnagha**	0,00	0,00	9,52	19952,80	9,78	7803,04	7,59	-
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	-	-	-	-	-	-	-	-
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,00	0,00	0,00	0,00	19,60	15640,79	54,40	-
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,00	0,00	3,36	7038,70	6,12	4883,25	12,65	-
Boulemane	**Serghina**	0,00	0,00	25,73	53901,84	11,09	8853,41	28,49	-
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,00	0,00	0,00	0,00	11,58	9240,18	9,16	-
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,00	0,00	4,41	9229,85	9,30	7417,47	10,96	-
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,00	0,00	0,00	0,00	48,07	38355,02	103,27	-
Sefrou	**Tafajight**	0,00	0,00	0,00	0,00	11,59	9251,83	33,05	-
Boulemane	**Talzemt**	31,64	125961,36	14,26	29862,91	17,95	14324,10	186,47	-
Taza	**Tazarine**	0,00	0,00	0,00	0,00	18,13	14467,12	3,03	-
Sefrou	**Tazouta**	0,00	0,00	0,00	0,00	27,81	22194,76	36,95	-
Ifrane	**Timahdite**	33,13	131890,56	0,00	0,00	50,20	40058,96	211,58	-
Taza	**Zrarda**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	-

Tableau 79: Indice de perte par nombre de véhicules

Province	Commune	Indice de perte par nombre de véhicules Km/J. par catégorie de route			Indice de perte par nombre de véhicules
		RN	RR	RP	
Sefrou	**Adrej**	0,00	0,00	0,66	0,33
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,00	0,00	0,34	0,17
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,00	0,10	0,38	0,24
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,00	0,11	0,01	0,06
Boulemane	**Ait Bazza**	0,00	0,35	0,24	0,30
Boulemane	**Ait El Mane**	0,27	0,05	0,44	0,38
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,00	0,00	0,00	0,00
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,00	0,00	0,00	0,00
Sefrou	**Azzaba**	0,00	0,06	0,08	0,07
Taza	**Barkine**	0,03	0,00	0,00	0,02
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,00	0,00	0,15	0,07
Boulemane	**Boulemane**	0,00	0,00	0,04	0,02
Taza	**Bouyablane**	-	-	-	-
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,00	0,00	0,47	0,24
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,00	0,12	0,11	0,11
Sefrou	**El Menzel**	0,00	0,12	0,03	0,07
Boulemane	**El Mers**	0,00	0,00	0,49	0,24
Boulemane	**Enjil**	0,00	0,08	0,00	0,04
Boulemane	**Guigou**	0,00	1,00	1,00	1,00
Sefrou	**Ighzrane**	0,00	0,80	0,88	0,84
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,08	0,00	0,00	0,04
Khénifra	**Itzer**	0,20	0,00	0,00	0,10
Sefrou	**Laanoussar**	0,00	0,44	0,59	0,52
Taza	**Maghraoua**	-	-	-	-
Sefrou	**Mtarnagha**	0,00	0,17	0,16	0,17
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	-	-	-	-
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,00	0,00	0,33	0,16
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,00	0,06	0,10	0,08
Boulemane	**Serghina**	0,00	0,46	0,18	0,32
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,00	0,00	0,19	0,10
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,00	0,08	0,15	0,12
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,00	0,00	0,80	0,40
Sefrou	**Tafajight**	0,00	0,00	0,19	0,10
Boulemane	**Talzemt**	0,96	0,25	0,30	0,75
Taza	**Tazarine**	0,00	0,00	0,30	0,15
Sefrou	**Tazouta**	0,00	0,00	0,46	0,23
Ifrane	**Timahdite**	1,00	0,00	0,84	0,92
Taza	**Zrarda**	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 80: Estimation du Coût de réhabilitation par catégorie de route

Province	Commune	Coût de réhabilitation par catégorie de route (DH)							
		Linéaire RN	Coût	Linéaire RR	Coût	Linéaire RP	Coût	Linéaire Pistes	Coût
Sefrou	**Adrej**	0,00	0,00	0,00	0,00	39,58	29653697,68	88,46	14969854,27
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,00	0,00	0,00	0,00	20,35	15248206,69	10,11	1710764,95
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,00	0,00	5,72	4287670,41	22,90	17158491,63	14,50	2454429,36
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,00	0,00	5,88	4406734,73	0,84	626966,93	0,90	152288,57
Boulemane	**Ait Bazza**	0,00	0,00	19,67	14737192,50	14,61	10948793,63	48,74	8247453,77
Boulemane	**Ait El Mane**	8,97	6721479,84	2,66	1994103,15	26,60	19931650,39	83,30	14095914,82
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	21591,97	0,00	0,00
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	7267,05
Sefrou	**Azzaba**	0,00	0,00	3,47	2597254,29	4,74	3549902,53	0,00	0,00
Taza	**Barkine**	1,03	774395,69	0,00	0,00	0,00	0,00	8,82	1492446,84
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,00	0,00	0,00	0,00	8,73	6542756,76	5,66	958542,91
Boulemane	**Boulemane**	0,00	0,00	0,00	0,00	2,36	1765924,73	3,89	657850,10
Taza	**Bouyablane**	-	-	-	-	-	-	-	-
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,00	0,00	0,00	0,00	28,26	21170398,19	58,34	9873494,00
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,00	0,00	6,48	4851746,47	6,34	4748034,95	22,24	3763756,71
Sefrou	**El Menzel**	0,00	0,00	6,45	4833971,15	2,05	1537300,58	6,20	1049285,69
Boulemane	**El Mers**	0,00	0,00	0,00	0,00	29,44	22055543,25	106,55	18031479,78
Boulemane	**Enjil**	0,00	0,00	4,41	3306909,03	0,00	0,00	13,11	2218382,26
Boulemane	**Guigou**	0,00	0,00	55,95	41921029,63	60,09	45020782,12	163,45	27659435,48
Sefrou	**Ighzrane**	0,00	0,00	44,68	33479199,11	52,86	39602499,11	85,27	14430487,27
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	2,82	2109500,20	0,00	0,00	0,00	0,00	3,60	608503,67
Khénifra	**Itzer**	6,56	4913250,61	0,00	0,00	0,00	0,00	14,63	2475802,62
Sefrou	**Laanoussar**	0,00	0,00	24,48	18341622,54	35,66	26722081,25	88,64	14999622,24
Taza	**Maghraoua**	-	-	-	-	-	-	-	-
Sefrou	**Mtarnagha**	0,00	0,00	9,52	7136406,73	9,78	7326688,82	7,59	1283870,32
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	-	-	-	-	-	-	-	-
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,00	0,00	0,00	0,00	19,60	14685968,55	54,40	9206334,38
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,00	0,00	3,36	2517492,34	6,12	4585138,16	12,65	2140663,12
Boulemane	**Serghina**	0,00	0,00	25,73	19278768,49	11,09	8312935,57	28,49	4822071,19
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,00	0,00	0,00	0,00	11,58	8676095,20	9,16	1550059,76
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,00	0,00	4,41	3301188,39	9,30	6964654,91	10,96	1855421,59
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,00	0,00	0,00	0,00	48,07	36013560,76	103,27	17475893,46
Sefrou	**Tafajight**	0,00	0,00	0,00	0,00	11,59	8687035,17	33,05	5593296,13
Boulemane	**Talzemt**	31,64	23703909,26	14,26	10680900,30	17,95	13449661,96	186,47	31556343,32
Taza	**Tazarine**	0,00	0,00	0,00	0,00	18,13	13583942,93	3,03	512552,75
Sefrou	**Tazouta**	0,00	0,00	0,00	0,00	27,81	20839835,03	36,95	6252213,15
Ifrane	**Timahdite**	33,13	24819689,07	0,00	0,00	50,20	37613479,72	211,58	35805096,69
Taza	**Zrarda**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	557908,07

Tableau 81: Indice de perte de production agronomique et forestière

Province	Commune	Indice de perte de production agronomique et forestière			
		Agriculture	Elevage	Reboisement	Foret/matorral/alfa
Sefrou	**Adrej**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Ait Bazza**	0,107	0,001	0,001	0,962
Boulemane	**Ait El Mane**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Azzaba**	0,311	1,000	0,008	0,182
Taza	**Barkine**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Boulemane**	0,107	0,001	0,001	0,962
Taza	**Bouyablane**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,311	1,000	0,008	0,182
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,007	0,001	0,018	0,163
Sefrou	**El Menzel**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**El Mers**	0,107	0,001	0,001	0,962
Boulemane	**Enjil**	0,107	0,001	0,001	0,962
Boulemane	**Guigou**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Ighzrane**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,107	0,001	0,001	0,962
Khénifra	**Itzer**	1,000	0,002	1,000	1,000
Sefrou	**Laanoussar**	0,311	1,000	0,008	0,182
Taza	**Maghraoua**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Mtarnagha**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,311	1,000	0,008	0,182
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Serghina**	0,107	0,001	0,001	0,962
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,007	0,001	0,018	0,163
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,107	0,001	0,001	0,962
Sefrou	**Tafajight**	0,311	1,000	0,008	0,182
Boulemane	**Talzemt**	0,107	0,001	0,001	0,962
Taza	**Tazarine**	0,239	0,002	0,068	0,068
Sefrou	**Tazouta**	0,311	1,000	0,008	0,182
Ifrane	**Timahdite**	0,007	0,001	0,018	0,163
Taza	**Zrarda**	0,239	0,002	0,068	0,068

Tableau 82: Indice de perte par coût de réhabilitation des routes

Province	Commune	Indice de perte par coût de réhabilitation par catégorie de route (DH)			
		RN	RR	RP	Piste
Sefrou	**Adrej**	0,00	0,00	0,66	0,42
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	0,00	0,00	0,34	0,05
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	0,00	0,10	0,38	0,07
Sefrou	**Ain Timguenai**	0,00	0,11	0,01	0,00
Boulemane	**Ait Bazza**	0,00	0,35	0,24	0,23
Boulemane	**Ait El Mane**	0,27	0,05	0,44	0,39
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	0,00	0,00	0,00	0,00
Boulemane	**Almis Marmoucha**	0,00	0,00	0,00	0,00
Sefrou	**Azzaba**	0,00	0,06	0,08	0,00
Taza	**Barkine**	0,03	0,00	0,00	0,04
Sefrou	**Bir Tam Tam**	0,00	0,00	0,15	0,03
Boulemane	**Boulemane**	0,00	0,00	0,04	0,02
Taza	**Bouyablane**	-	-	-	-
Sefrou	**Dar El Hamra**	0,00	0,00	0,47	0,28
Ifrane	**Dayat Aoua**	0,00	0,12	0,11	0,11
Sefrou	**El Menzel**	0,00	0,12	0,03	0,03
Boulemane	**El Mers**	0,00	0,00	0,49	0,50
Boulemane	**Enjil**	0,00	0,08	0,00	0,06
Boulemane	**Guigou**	0,00	1,00	1,00	0,77
Sefrou	**Ighzrane**	0,00	0,80	0,88	0,40
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	0,08	0,00	0,00	0,02
Khénifra	**Itzer**	0,20	0,00	0,00	0,07
Sefrou	**Laanoussar**	0,00	0,44	0,59	0,42
Taza	**Maghraoua**	-	-	-	-
Sefrou	**Mtarnagha**	0,00	0,17	0,16	0,04
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	-	-	-	-
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	0,00	0,00	0,33	0,26
Sefrou	**Ribate El Kheir**	0,00	0,06	0,10	0,06
Boulemane	**Serghina**	0,00	0,46	0,18	0,13
Ifrane	**Sidi El Makhfi**	0,00	0,00	0,19	0,04
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	0,00	0,08	0,15	0,05
Boulemane	**Skoura M'Daz**	0,00	0,00	0,80	0,49
Sefrou	**Tafajight**	0,00	0,00	0,19	0,16
Boulemane	**Talzemt**	0,96	0,25	0,30	0,88
Taza	**Tazarine**	0,00	0,00	0,30	0,01
Sefrou	**Tazouta**	0,00	0,00	0,46	0,17
Ifrane	**Timahdite**	1,00	0,00	0,84	1,00
Taza	**Zrarda**	0,00	0,00	0,00	0,02

Tableau 83: Indice de perte selon le type de ménage

Provinces	Commune	Nombre de ménage	Type de ménage				Total ménages vulnérables	Nombre de familles à reloger	Indice de perte
			Béton	Pierres	Bois/métal	Autres			
Sefrou	**Adrej**	415,00	16,39	82,17	0,24	1,20	83,61	347,00	0,144
Sefrou	**Aghbalou Aqorar**	2102,00	20,36	77,74	0,81	1,09	79,64	1674,00	0,696
Sefrou	**Ahl Sidi Lahcen**	923,00	59,59	40,20	0,11	0,11	40,41	373,00	0,155
Sefrou	**Ain Timguenai**	1399,00	44,10	51,82	3,36	0,71	55,90	782,00	0,325
Boulemane	**Ait Bazza**	615,00	12,03	87,80	0,00	0,16	87,97	541,00	0,225
Boulemane	**Ait El Mane**	422,00	3,33	96,44	0,00	0,24	96,67	407,97	0,170
Sefrou	**Ait Sebaa Lajrouf**	3589,00	32,96	60,85	5,38	0,81	67,04	2406,00	1,000
Boulemane	**Almis Marmoucha**	475,00	13,47	84,00	1,05	1,47	86,53	411,00	0,171
Sefrou	**Azzaba**	1451,00	84,29	15,02	0,28	0,41	15,71	228,00	0,095
Taza	**Barkine**	1522,00	3,81	94,74	0,59	0,85	96,19	1464,00	0,608
Sefrou	**Bir Tam Tam**	2049,00	19,67	78,23	0,63	1,46	80,33	1646,00	0,684
Boulemane	**Boulmane**	1803,00	86,36	4,10	9,15	0,39	13,64	246,00	0,102
Taza	**Bouyablane**	381,00	2,73	96,72	0,00	0,55	97,27	370,59	0,154
Sefrou	**Dar El Hamra**	949,00	29,50	69,76	0,53	0,21	70,50	669,00	0,278
Ifrane	**Dayet Aoua**	2048,00	89,75	7,91	1,76	0,59	10,25	210,00	0,087
Sefrou	**El Menzel**	3142,00	94,01	1,31	3,98	0,70	5,99	188,06	0,078
Boulemane	**El Mers**	1167,00	20,82	76,61	1,71	0,86	79,18	924,00	0,384
Boulemane	**Enjil**	1796,00	22,22	75,84	0,61	1,34	77,78	1397,00	0,581
Boulemane	**Guigou**	4610,00	53,97	41,78	3,56	0,69	46,03	2122,00	0,882
Sefrou	**Ighzrane**	2039,00	53,51	45,02	1,08	0,39	46,49	948,00	0,394
Boulemane	**Imouzzer Marmoucha**	1027,00	93,67	0,39	5,36	0,58	6,33	65,00	0,027
Khenifra	**Itzer**	2518,00	48,27	40,50	10,27	0,96	51,73	1302,62	0,541
Sefrou	**Laanoussar**	1706,00	21,86	75,44	0,88	1,82	78,14	1333,00	0,554
Taza	**Maghraoua**	1409,00	8,80	89,71	0,57	0,92	91,20	1285,00	0,534
Sefrou	**Mtarnagha**	996,00	5,52	92,37	1,31	0,80	94,48	941,00	0,391
Boulemane	**Oulad Ali Youssef**	906,00	3,64	95,47	0,44	0,44	96,36	873,00	0,363
Sefrou	**Oulad Mkoudou**	1504,00	37,79	60,94	0,60	0,67	62,21	935,62	0,389
Sefrou	**Ribate El Kheir**	3979,00	92,99	5,03	1,16	0,83	7,01	279,07	0,116
Boulemane	**Serghina**	800,00	22,13	77,00	0,00	0,88	77,88	623,00	0,259
Ifrane	**Sidi EL Makhfi**	3710,00	44,47	47,41	7,04	1,08	55,53	2060,00	0,856
Sefrou	**Sidi Youssef Ben Ahmed**	2696,00	96,16	2,22	0,90	0,72	3,84	103,40	0,043
Boulemane	**Skoura M'Daz**	2082,00	53,03	45,39	1,01	0,58	46,97	978,00	0,406
Sefrou	**Tafajight**	325,00	4,62	93,54	1,85	0,00	95,38	310,00	0,129
Boulemane	**Talzemt**	618,00	29,13	70,39	0,00	0,49	70,87	438,00	0,182
Taza	**Tazarine**	467,00	5,78	93,15	0,21	0,86	94,22	440,00	0,183
Sefrou	**Tazouta**	1354,00	14,40	81,98	2,95	0,66	85,60	1159,00	0,482
Ifrane	**Timahdite**	2223,00	51,64	40,94	4,50	2,92	48,36	1075,00	0,447
Taza	**Zrarda**	2014,00	74,78	23,88	0,74	0,60	25,22	508,00	0,211

Tableau 84: Production agricole par province dans le bassin versant Allal Al Fassi

Provinces	SAU (ha)	Production agricole (en milliers de Quintaux)				
		Céréales	Légumineuses	Cultures fourragères	Cultures Maraîchères	Plantations fruitières
Boulemane	80926,00	173,80	4,45	828,00	604,85	575,88
Sefrou	93770,00	1602,28	161,68	4660,00	423,00	615,58
Ifrane	82044,00	49,55	1,10	11,70	0,81	11,00
Taza	190795,00	1000,00	130,00	20,00	128,00	1480, 6
Khénifra	320455,00	1 407,00	65 060,00	26 346,38	3 199,88	2 974,77

Tableau 85: Production de l'élevage par province dans le bassin versant Allal Al Fa

Provinces	Elevage (en millier de têtes)		
	Caprins	Ovins	Bovins
Boulemane	224,20	655,00	12,81
Sefrou	142000,00	395000,00	24200,00
Ifrane	100,00	900,00	22,00
Taza	161,15	378,60	77,73
Khénifra	196,30	1053,50	42,80

Tableau 86: Forêts reboisées et naturelles dans le bassin versant Allal Al Fassi

Province	Superficie des forêts reboisées et naturelles (ha)					
	Reboisement	Feuillues naturelles	Résineuses naturelles	Matorral	Alfa	Autres
Boulemane	466,00	21302,70	62422,90	6058,00	528311,40	29281, 06
Sefrou	5449,40	56172,02	60752,16	218,95	0,00	28 963,4 8
Ifrane	11558,00	43618,00	46224,00		14600,00	
Taza	43382,00	43619,00	105142,00		27634,00	
Khénifra	642300	301000	341300		-	