

République du Niger

MEMS/RS



UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY

Faculté des Lettres et Sciences Humaines

Département de Géographie

Changements d'usage des sols et érosion dans l'aire « *ayi noma* » à la périphérie du parc national du W du Niger



THESE UNIQUE DE DOCTORAT DE GEOGRAPHIE

Présentée par :

ABBA Bachir

Membres du Jury :

Président du jury :

Professeur Emérite MOREL Alain,
Université Joseph Fourier Grenoble I,
France

Directeur :

Professeur BOUZOU MOUSSA Ibrahim,
Université de Maradi, Niger,

Examineurs :

Dr. DA DAPOLA Evariste, HDR, Maître de conférences, Université de Ouagadougou

Professeur MALAN ISSA Oumarou,
Université de Reims, chercheur à l'IRD,
Niamey

Professeur MOTCHO KOKOU Henri,
Université Abdou Moumoui de Niamey, Niger

République du Niger

MEMS/RS



UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY

Faculté des Lettres et Sciences Humaines

Département de Géographie

**Changements d'usage des sols et érosion dans l'aire « *ayi noma* » à la
périphérie du parc national du W du Niger**

THESE UNIQUE DE DOCTORAT DE GEOGRAPHIE

Présentée par :

ABBA Bachir

Membres du Jury :

Président du jury :

Professeur Emérite MOREL Alain,
Université Joseph Fourier Grenoble I,
France

Directeur :

Professeur BOUZOU MOUSSA Ibrahim,
Université de Maradi, Niger

Examineurs :

**Dr. DA DAPOLA Evariste, HDR, Maître de
conférences,** Université de Ouagadougou

Professeur MALAN ISSA Oumarou,
Université de Reims, chercheur à l'IRD,
Niamey

Professeur MOTCHO KOKOU Henri,
Université Abdou Moumoui de Niamey, Niger

Table des matières

Sigles et abréviations	8
Liste des figures.....	9
Liste des photos	12
Liste des tableaux.....	14
Remerciements	15
Résumé.....	17
Abstract.....	18
Introduction générale	19
Chapitre 1 : le cadre théorique et méthodologique	22
1.1.Le contexte de l'étude.....	22
1.1.1. La problématique de l'étude.....	22
1.1.2. La revue de la littérature.....	27
1.1.2.1. Démographie, changements d'usage des sols et dynamique actuelle.....	28
1.1.2.2. L'encroûtement et le comportement hydro-dynamique des sols	30
1.1.2.3. Instabilité des versants et risques érosifs	31
1.1.2.4. La dynamique des cônes	31
1.1.2.5. Quantification de l'érosion	32
1.1.2.6. Les Pratiques antiérosives.....	33
1.1.3. Définition des concepts clés	34
1.1.3.1. Le concept de dégradation des sols.....	34
1.1.3.2. Le concept d'érosion.....	35
1.1.3.3. Le changement d'usage des sols	37
1.1.3.4. Le concept des états de surface	38
1.1.3.5. Les modèles et la modélisation.....	39

1.1.4.	L'originalité de l'étude	41
1.1.5.	Les Objectifs de l'étude.....	43
1.1.6.	Les hypothèses	43
1.2.	Matériels et méthodes	45
1.2.1.	Le suivi des ravines	45
1.2.1.1.	Le suivi aux repères	45
1.2.1.2.	Le suivi au GPS	47
1.2.2.	Suivi de l'hydrodynamique sédimentaire des cônes de déjection.....	47
1.2.3.	Cubage du cône du kori Tyala.....	48
1.2.4.	Protocole de suivi de la pluviométrie.....	49
1.2.5.	Protocole de suivi du ruissellement et de l'érosion sur parcelles expérimentales	50
1.2.5.1.	Les parcelles d'érosion et les fûts	50
1.2.5.2.	Le traitement des parcelles.....	54
1.2.5.3.	Méthodes de prélèvement sur les parcelles expérimentales.....	55
1.2.5.4.	Méthode de calcul du taux de ruissellement	56
1.2.5.5.	Méthode de calcul du taux d'érosion	57
1.2.5.5.1.	Traitement des échantillons au laboratoire	57
1.2.5.5.2.	Le taux d'érosion	57
1.2.6.	Mesure de turbidité dans le Goroubi	58
1.2.7.	Cartographie : dynamique d'occupation des sols, modélisation et spatialisation	58
1.2.7.1.	L'interprétation des images satellitaires	59
1.2.7.2.	La Modélisation et la spatialisation	60
1.2.7.3.	Limites et intérêt du modèle <i>RUSLE</i>	65
1.2.7.3.1.	Les limites du modèle <i>RUSLE</i>	65
1.2.7.3.2.	Les intérêts du modèle <i>RUSLE</i>	65

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude	66
2.1. Les aspects physiques	66
2.1.1. Le Contexte géographique.....	66
2.1.2. Contexte climatique.....	69
2.1.2.1. La circulation atmosphérique en Afrique de l'ouest.....	69
2.1.2.2. La pluviométrie dans la zone d'étude	70
2.1.3. Contexte géologique.....	74
2.1.4. Géomorphologie et <i>ensembles morphodynamiques</i>	75
2.1.4.1. Les sommets des plateaux.....	78
2.1.4.2. Les talus	79
2.1.4.3. Les glacis	82
2.1.5. Les dunes	83
2.1.5.1. La terrasse	84
2.1.5.2. Les bas-fonds	84
2.1.6. Contexte pédologique.....	85
2.1.7. Végétation	87
2.1.8. Contexte hydrologique	89
2.2. Le milieu humain.....	92
2.2.1. Une population à diversité ethnique.....	92
2.2.2. Évolution de la population dans la commune rurale de Tamou.....	93
2.2.3. Les activités socio-économiques.....	95
Chapitre 3 : Occupation des sols et dynamique actuelle dans l'aire « ayi noma »..	97
3.1. Dynamique de l'occupation dans l'aire « ayi noma »	97
3.1.1. Un rapide changement sur une quarantaine d'années	98
3.1.2. Les facteurs déterminants.....	104

3.2. La morphogénèse récente dans l'aire « <i>ayi noma</i> » : instabilité des versants du goroubi et de ses affluents	108
3.2.1. Les facteurs de l'instabilité des versants	108
3.2.1.1. Les formations superficielles	109
3.2.1.2. Les conditions climatiques actuelles.....	111
3.2.2. Les manifestations de la dynamique actuelle.....	112
3.2.2.1. Continuité et discontinuité des processus d'érosion dans l'espace et dans le temps	112
3.2.2.2. Les processus communs.....	115
3.2.2.3. Les processus spécifiques	126
Chapitre 4 : Étude expérimentale du ruissellement et de l'érosion à l'échelle des parcelles et effet de la lutte antiérosive biologique	135
4.1. Présentation du bassin expérimental : le bassin du « <i>Gorou Izé</i> »	135
4.2. Ruissellement et érosion potentiels	138
4.2.1. Ruissellement et érosion sur la croûte d'érosion.....	139
4.2.2. Ruissellement et érosion sur le champ de mil	144
4.2.3. Ruissellement et érosion sur la parcelle standard dite de Wischmeier.....	146
4.2.4. Ruissellement et érosion sur la croûte gravillonnaire du sommet du plateau ..	148
4.3. Effet de la BE sur les différentes parcelles.....	150
4.3.1. Sur le nombre de pluies ruisselantes	150
4.3.2. Sur les états de surface	150
4.3.3. Sur le ruissellement et l'érosion.....	151
4.4. Les facteurs de ruissellement et d'érosion.....	154
4.4.1. Les événements pluvieux (durée, hauteur et intensité)	155
4.4.2. L'humidité des sols avant la pluie.....	159
4.4.3. La topographie.....	160

4.4.4.	L'homme	161
	Chapitre 5 : Cartographie des risques érosifs de l'aire « ayi noma »	162
5.1.	Détermination des différents facteurs du modèle	163
5.1.1.	Le facteur R : agressivité des précipitations.....	163
5.1.2.	Le facteur k : érodibilité des sols	165
5.1.3.	Le facteur topographique LS.....	169
5.1.4.	Le facteur d'occupation du sol (C).....	175
5.1.5.	Le facteur P : influence des pratiques antiérosives	178
5.2.	Estimation des risques érosifs.....	180
5.3.	Réalisations des scénarios de simulation.....	184
5.3.1.	Sur le facteur d'agressivité de pluies.....	185
5.3.2.	Sur le facteur d'occupation du sol.....	189
5.3.3.	Sur le facteur des pratiques antiérosives	189
5.3.4.	Propositions d'aménagement	194
5.3.4.1.	Aménagements sur le plateau	195
5.3.4.2.	Les aménagements sur les talus	196
5.3.4.3.	Les aménagements sur les glacis	196
5.3.4.4.	Les aménagements dans les bas-fonds.....	197
	Conclusion générale.....	199
	Références bibliographiques.....	203

Sigles et abréviations

BE : bande enherbée

CE : parcelle de croûte d'érosion

CG : croûte gravillonnaire

Ct3 : derniers dépôts du continental terminal (grès argileux du moyen Niger)

CT : Croûte d'érosion traitée en bande enherbée d'*Andropogon gayanus*

CTFT Centre Technique Forestier Tropical

FLSH : Faculté des Lettres et Sciences Humaines

HH:MN:SS Heure minutes secondes

INS : Institut national de la statistique

KR : Coefficient de ruissellement annuel moyen

KRAM : Coefficient de ruissellement

KRMAX : Coefficient de ruissellement maximal

M : parcelle sur champ de mil

MT : parcelle sur champ de mil traitée en bande enherbée

PW : Parcelle de Wischmeier

RUSLE revised universal soil loss equation

UAM: université Abdou Moumouni

Liste des figures

Figure 1 : Modèle de fonctionnement du système géomorphologique de l'aire « <i>ayi noma</i> »	27
Figure 2: Localisation des dispositifs de mesure	51
Figure 3: Etapes suivies de la cartographie du risque érosif	62
Figure 4 : Localisation de la commune rurale de Tamou (Source Département de Géographie modifié)	67
Figure 5: localisation de la zone d'étude.....	68
Figure 6: Position saisonnière des masses d'air ; (source : Alain Morel, 1980)	69
Figure 7 : Evolution des isohyètes et des anomalies pluviométriques au cours des 6 dernières décennies au Sahel (Lebel et Ali, 2009).....	71
Figure 8 : Évolution des précipitations à Say de 1960 à 2010 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique de Lamb (1985). Source : données DMN complétées	72
Figure 9: Evolution de la pluviométrie à Say de 1960 à 2010 (Source : données DMN complétées).....	73
Figure 10: Coupe schématique simplifiée de la zone d'étude.....	75
Figure 11: Topographie de la zone d'étude.....	77
Figure 12: Coupe schématique des unités paysagères (extrait de la carte topographique au 1 : 50.000 feuille de Kirtachi 3d)	78
Figure 13 : Coupe schématique du versant type 1 : le talus est fossilisé par le dépôt sableux	80
Figure 14: Coupe schématique du versant type 3.....	81
Figure 15: Coupe schématique représentant le quatrième type de versant	82
Figure 16: Evolution de la population dans la commune rurale de Tamou de 1970 à 2001 (RGP/H, Souley 2010)	94
Figure 17: évolution de la densité d'occupation humaine de 1972 à 2001 (Source recensements généraux de la population au Niger).....	94
Figure 18: Evolution des unités d'occupation des sols (superficies en ha et valeur relative) de 1987 et 2010	99
Figure 19: Carte d'occupation des sols de l'aire « <i>ayi noma</i> » en 1987	101
Figure 20: Carte d'occupation des sols de l'aire « <i>ayi noma</i> » en 1999	102
Figure 21: Carte d'occupation des sols de l'aire « <i>ayi noma</i> » en 2010	103
Figure 22: Evolution des unités d'occupation des sols entre 1987-1999.....	104
Figure 23 : Evolution des unités d'occupation des sols entre 1999-2010.....	105
Figure 24: Hyétogramme de la pluie du 28 août 2010.....	112

Figure 25 : Discontinuité des problèmes d'érosion dans l'espace (Source : Roose 1994).....	114
Figure 26: Evolution des ravines dans l'aire « <i>ayi noma</i> » de 2009-2011	118
Figure 27: Evolution de quelques ravines à Banizoumbou (Source : Malam Abdou, 2007).	119
Figure 28: Carte géomorphologique et géodynamique de l'aire « <i>ayi noma</i> » en 1987	120
Figure 29 : Carte géomorphologique et géodynamique de l'aire « <i>ayi noma</i> » en 1999	121
Figure 30: Carte géomorphologique et géodynamique de l'aire « <i>ayi noma</i> » en 2010	122
Figure 31: Dynamique du kori Tyala de 1987-2010	125
Figure 32: Carte géodynamique du bassin du kori Tyala (2010) Souleymane Salaou 2010 modifié	127
Figure 33: Dynamique topo sédimentaire du cône du kori Tyala en 2010.	130
Figure 34 : Dynamique topo sédimentaire du cône du kori Tyala en 2011.	130
Figure 35 : Bilan sédimentaire du cône du kori Tyala entre 2010-2011.....	131
Figure 36: Numérisation du cône de kori Tyala.....	132
Figure 37: Evolution des flux des MES dans le goroubi en 2009.....	133
Figure 38: Evolution des flux des MES dans le Goroubi en 2010.....	133
Figure 39 : Carte de localisation du bassin du « <i>Gorou Izé</i> »	137
Figure 40: Comparaison entre hauteur des pluies et les coefficients de ruissellement des parcelles de la croûte d'érosion de l'année 2010	140
Figure 41: Corrélation linéaire de hauteurs de pluies et de coefficient de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle de croûte d'érosion (2010).....	142
Figure 42: Corrélation linéaire entre coefficient de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle CT (2010).	143
Figure 43: Corrélation linéaire de hauteurs de pluies et pertes en terre dans la parcelle CT (2010).	143
Figure 44 : Evolution du coefficient de ruissellement annuel moyen et moyenne sur trois ans (2009 à 2011) sur le champ cultivée.	145
Figure 45 : Corrélation linéaire de hauteurs de pluies et de coefficient de ruissellement et perte terre dans la parcelle de mil (2010)	145
Figure 46: Corrélation linéaire entre coefficient de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle MT (2011).....	146
Figure 47: Corrélation entre hauteurs de pluies et coefficients de ruissellement / hauteurs de pluies et pertes en terre dans la parcelle PW (2011)	147

Figure 48: Corrélacion entre coefficients de ruissellement et pertes terre dans la parcelle PW (2011).	147
Figure 49: Evolution du taux du ruissellement dans la parcelle CG.	148
Figure 50 : Corrélacion entre coefficients de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle CG	149
Figure 51: Effet de la BE sur le taux de ruissellement de 2009 et 2011	152
Figure 52: Evolution du taux de réduction du ruissellement de 2009 à 2011	153
Figure 53: Evolution de l'infiltrabilité du sol dans le temps dans le cas d'une pluie uniforme (source : Peugeot 1995).	156
Figure 54: Exemple de calcul de la pluie potentielle au ruissellement pour l'averse du 26 juillet 2010.	157
Figure 55: Seuil d'intensité et pluie d'imbibition dans la parcelle croûte.	158
Figure 56: Seuil d'intensité et pluie d'imbibition sur les parcelles mil.	158
Figure 57: Evolution de l'infiltration	166
Figure 58: Répartition du facteur K	170
Figure 59: Longueur de pente	172
Figure 60: Inclinaison de pente	173
Figure 61: Répartition du facteur LS.	174
Figure 62: Histogramme représentant la distribution des valeurs de LS	175
Figure 63: Répartition du facteur C.	177
Figure 64: Répartition du facteur P	179
Figure 65 : Croisement des couches pour l'obtention de la carte des risques d'érosion.	180
Figure 66: Carte de risques érosifs de l'aire « <i>ayi noma</i> » en utilisant uniformément le facteur <i>R</i>	181
Figure 67: Histogramme représentant la distribution des valeurs de risque érosif	183
Figure 68: représentation graphique de la corrélation entre l'érosion et le facteur C.	184
Figure 69: Variabilité spatiale de la pluviométrie en Août 2009	185
Figure 70: Répartition du facteur de l'agressivité climatique en 2009	187
Figure 71: Carte des risques érosifs de l'aire « <i>ayi noma</i> » en utilisant la répartition du facteur <i>R</i> en 2009.	188
Figure 72: Carte des risques érosifs par simulation du facteur C.	190
Figure 73: Répartition du facteur P obtenu par simulation	192
Figure 74: Carte des risques érosifs par simulation du facteur C.	193

Liste des photos

Photo 1 : Dispositif de mesure de la vitesse de ravinement	46
Photo 2 : Recul de tête de la ravine engendré par la pluie du 5 juillet 2011	47
Photo 3 : Sondage de l'épaisseur des alluvions récentes sur la surface du cône du kori Tyala. Il se fait en creusant des fosses en différents points de la surface du cône et a permis par la suite d'estimer le volume des alluvions à la surface du cône.....	48
Photo 4 : Pluviographe installé non loin des parcelles expérimentales : il informe sur les caractéristiques (durée et intensité) des averses.....	49
Photo 5 : Pluviomètre à lecture directe installé dans la partie amont du kori Tyala.....	49
Photo 6 : Parcelle nue type Wischmeier travaillée juste après la pluie du 31/08/2009.....	52
Photo 7 : Parcelle mil au stade de tallage.....	53
Photo 8 : Parcelles de 1 m ² installées sur les croûtes gravillonnaires du sommet du plateau. Les fûts sont coupés de moitié du fait de la difficulté à creuser les fosses compte tenu de la dalle de cuirasse se trouvant sur un sol gravillonnaire mince environ 20 cm d'épaisseur.....	53
Photo 9 : Parcelle croûte d'érosion avec traitement (bande enherbée d' <i>Andropogon gayanus</i> placée en aval de la parcelle dans le but de réduire les taux de ruissellement et d'érosion)....	54
Photos 10 et 11 : Ouvrages antiérosifs : à gauche demi-lunes et à droite banquettes sur le plateau de Dyabou	64
Photo 12 : Plateau ensablé de Dyabou	79
Photo 13: Versant type 2 où le talus apparaît recouvert d'éboulis issus de l'altération du socle et du grès du Continental terminal.	80
Photo 14: Glacis raviné formé sur matériaux argileux le long du goroubi	83
Photo 15 : Dune ravinée dans la partie aval du bassin du kori Tyala (photo Souleymane Salaou).....	83
Photo 16 : Terrasse alluviale du fleuve Niger	84
Photo 17 : Culture de manioc en bordure du fleuve Niger (confluence gorou izé et fleuve Niger)	85
Photo 18 : Sédimentation dans la partie aval du bassin du kori Tyala.....	85
Photo 19 : Savane arbustive dense en bordure du plateau	88
Photo 20 : Savane arbustive dégradée sur le sommet du plateau.....	88
photo 21 : Vaste surface dénudée sur le sommet du plateau avec des micro-reliefs dûs à l'érosion en nappe	88

Photo 22: mare formée dans une dépression fermée sur le faciès sableux du plateau.....	90
Photo 23 : Au premier plan affleurement de la cuirasse ferrugineuse, au second plan mare de plateau formée sur le faciès cuirassé	90
Photos 24 et 25 : Sources liées à la nouvelle dynamique de l'occupation du sol, l'érosion régressive et aux caractéristiques des formations superficielles : celles-ci soutiennent l'écoulement dans le <i>Gorou Izé</i> , sur la photographie de droite, (1) a 7 ans et (2) a 6 ans. Source : (Abba, 2007)	91
Photo 26: Nouveau défrichement opéré en 2011 en amont du bassin du kori Tyala.....	106
Photo 27: Ravine d'origine anthropique « <i>ravines pistes</i> » dans la partie amont du bassin de Tyala. Elle met en évidence l'impact des passages répétitifs de tracteurs.....	108
Photo 28: Processus de ravinement sur des formations sableuses fossilisant le plateau.....	110
Photo 29 : Bad-lands sur matériel argileux en aval du bassin versant de « gorouizé »	110
Photo 30 : Sédimentation sur le lit du kori Tyala dans la partie médiane (ces alluvions ont été déposées lors de la crue du 18 au 19 août 2011).....	115
Photo 31: Surface de déflation dans la partie amont du kori Tyala ; cette surface constitue un vaste impluvium aux eaux de ruissellement.....	116
Photo 32 : Nebkhas et surface de déflation sur le faciès sableux du plateau	116
Photo 33 : Ravinement en amont du bassin du kori Tyala : profondeur moyenne 4 à 6 m. ..	117
Photo 34 : Déchaussement de racine	117
Photo 35 : cuirasse ferrugineuse exhumée par érosion régressive et continue remontant le sommet du plateau.....	119
Photo 36 : Phénomène de suffosion et ravinement en tunnel en aval du bassin versant du « <i>Gorou Ize</i> »	123
Photo 37: pavage gravillonnaire sur le faciès cuirassé du plateau lié à la fragmentation de la cuirasse	126
Photo 38 : Talus d'éboulis.....	126
Photo 39 : Importante sédimentation sur le cône de déjection à la confluence du kori Tyala-goroubi (plus de 2 m d'épaisseur pour ce dépôt de la crue du 19 août 2011).....	128
Photo 40 : Front du cône de déjection à la confluence « <i>Gorou Ize</i> »-goroubi/fleuve Niger (mars 2011) épaisseur dépôt 1,55 m.....	128
Photo 41: Formation d'une griffe liée à l'effet du cumul vers l'aval de la lame d'eau ruisselée	141
Photo 42 : Formation d'un tapis herbacé favorisé par la sédimentation en amont de la BE..	151

Liste des tableaux

Tableau 1 : Rappel du cadre théorique.....	44
Tableau 2 : Répartition des parcelles en fonction des états de surface ou d'occupation des sols et de leur superficie.	55
Tableau 3 : Fiche de relevé ruissellement-érosion.....	56
Tableau 4 : Quelques caractéristiques granulométriques des sols dans l'aire « <i>ayi noma</i> »....	86
Tableau 5: Estimation du cheptel de la commune de Tamou en 2009 (Source : Plan de développement communal de Tamou, 2009 cité par Souley, 2010).	95
Tableau 6 : Texture et matière organique.....	109
Tableau 7 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de « <i>Gorou Izé</i> »	136
Tableau 8: Distinctions entre les processus de génération du ruissellement (Wotling, 2000)	138
Tableau 9: Récapitulatif des réponses des parcelles (2009 à 2011).....	149
Tableau 10 : Effet de la BE sur le ruissellement et le taux d'érosion.	152
Tableau 11: Effet de la BE sur le taux d'érosion	153
Tableau 12 : seuils d'intensité et pluies d'imbibition par parcelles	157
Tableau 13 : influence de l'humidité du sol sur la production du ruissellement.....	160
Tableau 14: Valeur du facteur en fonction de quelques formules de substitution.	165
Tableau 15 : distribution de l'érodibilité et de la matière organique en fonction des formations superficielles de l'aire « <i>ayi noma</i> ».....	168
Tableau 16: Classes d'érodibilité des sols de l'aire « <i>ayi noma</i> ».....	168
Tableau 17 : Les valeurs du facteur C par types d'occupation du sol.....	176
Tableau 18: Pratiques antiérosives (répartition du facteur P sur le plateau de Dyabou).....	178
Tableau 19 : essai de classification de risque d'érosion dans l'aire « <i>ayi noma</i> »	182
Tableau 20: répartition de la pluviométrie et de l'agressivité dans la zone d'étude en 2009.	186

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté les appuis.

Je tiens à remercier très chaleureusement les initiateurs de ce travail Professeur Bouzou Moussa Ibrahim et Dr. Faran Maïga Oumarou. Le premier pour m'avoir trouvé une subvention dans le programme « dynamique et gestion des bas-fonds sahéliens » et pour m'avoir encadré. Il a su se montrer disponible tant pour parler des différents aspects de ce travail que pour exprimer son affection et sa solidarité durant les moments difficiles sur le terrain. Le second, pour avoir participé à la proposition de ce sujet et m'aidé dans la mise en place du dispositif expérimental, ainsi que pour ses judicieux conseils et ses pertinentes remarques.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du jury qui ont bien voulu accepter examiner ce travail : Professeur émérite Morel Alain, Professeur Motcho Kokou Henri, Professeur Malan Issa Oumarou, Dr. Da Dapola Evariste, qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.

C'est le lieu aussi de remercier Monsieur Descroix Luc, et à travers lui l'Institut de recherche pour le développement (IRD), pour avoir équipé ma zone d'étude d'un dispositif de suivie de la pluviométrie et m'initié à des techniques en hydro-géomorphologie.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à :

- Messieurs Waziri Mato Maman, Ali Magagi et leurs familles pour les encouragements et les appuis multiformes tout au long de mon cycle universitaire, qu'ils trouvent ici mes sincères remerciements et toute ma reconnaissance,
- Monsieur Souley Kabirou et Madame pour leur appui inestimable, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude,
- Messieurs Bahari Ibrahim Mahamadou doctorant au Département de Géographie pour m'avoir aidé sur le terrain et dans les travaux cartographiques. Toute ma reconnaissance aux autorités de l'Université de Zinder et Monsieur Souley Kabirou et mes autres collègues du Département de Géographie, pour avoir bien voulu me laisser plus du temps pour finaliser ce travail,
- Messieurs Hamadou, Seyni et leurs familles, pour avoir accepté de laisser une partie de leurs champs pour l'expérimentation et pour l'appui qu'ils ont apporté dans l'aboutissement de ce travail.

Je remercie très sincèrement Monsieur Souleymane Salaou Minckaéla et mademoiselle Issoufou Mamane Halila, dont l'apport a été d'une grande importance, Madame Mahamadou née Abdou Fati, Messieurs Hamadou Boureima, Youssouf Ousmane, Souley Hamadou, Sama Abdoul Aziz, Issa Gado pour avoir relevé les données des pluviomètres.

Et enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Il s'agit de Messieurs Guillaume Quantin, Ben Taher Vanessa, Illo Sabo, Abba Halilou, Abdoulaye Koné, Malam Abdou Moussa, Moussa Adamou, Issoufou Maman, Abdoulaye Tahirou, Issa Ousmane, Assouman Hamidou, Ibrahim, Amadou... Je m'excuse pour ceux dont les noms n'apparaissent pas ici qu'ils trouvent mes sincères remerciements.

Résumé

Alors que de nombreuses études traitent de la dynamique foncière ou des impacts de la migration sur les ressources, il n'existe pas d'études portant sur la quantification de l'érosion ou de la cartographie des risques érosifs depuis le déclassement et la mise en culture de la zone. Cependant l'étude des changements d'usages des sols constitue un enjeu important pour comprendre la dynamique actuelle de l'aire « *ayi noma*¹ ». Notre intérêt s'est donc porté sur l'étude diachronique de l'occupation du sol, l'étude expérimentale et la cartographie des risques dans le but de comprendre le rôle et les implications de la colonisation agricole et de la pression démographique sur la dégradation des sols et l'instabilité des versants à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ».

Dans un premier temps, une approche géomorphologique a été appliquée afin de comprendre et caractériser l'instabilité des versants. Il en résulte que divers facteurs tels le climat, l'homme la géomorphologie ... concourent à l'instabilité des versants. La démographie joue un rôle déterminant dans l'explication de la dynamique actuelle.

L'étude du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles expérimentales montre une variabilité des réponses suivant les états de surface ou d'occupation du sol ou le type d'aménagement. Ces résultats montrent que les bandes enherbées peuvent jouer un rôle important en matière d'aménagement de cette zone puisque l'*Andropogon gayanus* se développe facilement.

Et enfin l'application du modèle RUSLE donne d'intéressants résultats sur le risque d'érosion dans l'aire « *ayi noma* » et met en évidence le rôle de la mise en culture dans l'explication de la dynamique actuelle en justifiant 88 % des variations de pertes en terre prédites par le modèle.

Mots clés : instabilité des versants, cartographie des risques, aire « *ayi noma* » érosion hydrique, lutte antiérosive biologique

¹ Terme haoussa qui veut dire "travailler la terre"

Abstract

While many studies deal with the land dynamics or the impacts of the migration on the resources, there are no studies related to the quantification of the erosion or the mapping erosion risks since the downgrading and the agricultural exploitation of the area. However the study of the land use changes constitutes a mattering stake to understand the current dynamics of "ayi noma" area. Our interest thus concerns the diachronic study of the land use, the experimental study and the mapping erosion risks with the aim of understanding the role and the implications of the agricultural colonization and the demographic pressure on the land degradation and the slope instability on the "ayi noma" area scale.

First of all, a geomorphologic approach has been applied in order to understand and characterize the slope instability. It comes out that diverse factors such as climate, man, geomorphology ... contribute to the slope instability. Demography plays an important part in this current dynamics.

The runoff and soil loss study on the experimental plots of land shows a variability of the answers following the state of surface or of land use or the management type. These results show that grass strips can play an important role with regard to development of this zone area because *Andropogon gayanus* sets up easily.

And finally the application of the RUSLE model gives interesting results on the erosion risk on "ayi noma" area and highlights the role of the agricultural exploitation in the explanation of the current dynamics justifying 88 % of the variations of soil loss predicted by the model.

Key words: Slope instability, risk mapping, « ayi noma » area, Water erosion, biologic techniques of soil defense and restoration

Introduction générale

Pays sahélien, le Niger est occupé dans sa plus grande proportion par le désert. Ce qui n'est pas sans conséquence sur la répartition des ressources naturelles conditionnant du coup l'occupation humaine. En effet, celle-ci se calque sur la distribution des ressources naturelles. Depuis la fin des années 1960, le Sahel a connu une baisse drastique de la pluviométrie (installation d'une période de sécheresse) qui s'est traduite par d'importantes mutations socio-environnementales. Cette situation a entraîné au Niger et principalement dans l'ouest nigérien, d'importants mouvements de la population vers la périphérie du parc national du W où il existe encore des terres « vierges » (Sidikou, 1977 ; Mounkaila, 1999 et 2005...). La dégradation du potentiel productif des régions situées beaucoup plus au Nord (Zarmaganda, Kourfey) ainsi que les mouvements de population vers les centres urbains comme Niamey ont poussé le gouvernement à envisager le transfert de ces populations vers le sud. Ayant connu une faible densité d'occupation humaine (4 habitants/km² jusqu'en 1975 (Amadou, 1995), cette région devient un pôle d'attraction des populations venues du nord de la région de Tillabéri. Devant l'ampleur de ce flux vers la périphérie du parc, et à l'issue de l'éradication des maladies endémiques (l'onchocercose, la cécité etc), le gouvernement, par le décret n° 76/141/PLMS/MDR du 22 Août 1976, a déclassé une partie de la réserve totale de faune de Tamou (70 000 ha) pour sa mise en culture par les populations sinistrées venues du nord Tillabéri. Cette opération dénommée « *ayi noma* » avait pour but l'accroissement de la production vivrière afin d'atteindre l'autosuffisance alimentaire et au mieux dégager des surplus commercialisables (Amadou, 1995).

La région de Goroubi est depuis lors soumise à un changement d'usage des sols lié à une forte pression démographique (liée à un taux de croissance naturel élevé, mais aussi à la migration).

Avant le déclassement de cette zone, les cultures sont localisées autour des villages de Dyabou et Tyala Goungoundi (cf. figure 1) qui constituent les plus anciens sites d'occupation humaine. Cette zone a connu entre 1956 et 1988 une dégradation de sa végétation naturelle au profit des zones de culture qui ont progressé de plus de 60 % (Amadou, 1995). La forte croissance démographique conduit à un déséquilibre du système

hydrogéomorphologique de l'aire « *ayi noma* » et à une instabilité croissante de versants du Goroubi et de ses affluents.

Nos investigations ont montré que cette zone est aujourd'hui soumise à une dynamique de dégradation continue qui menace gravement les potentialités en eau et en sol. En effet, on assiste à une généralisation de l'érosion et une instabilité croissante des versants dans l'ensemble de la zone d'étude. Devant l'ampleur de cette dynamique, une intervention s'impose. Dans cette étude, nous accordons un intérêt particulier à la cartographie des risques érosifs afin d'identifier les secteurs les plus touchés et qui peuvent faire l'objet d'éventuelles interventions. S'il est possible de réduire considérablement l'érosion hydrique par le biais de techniques adaptées, comme l'implantation d'une bande enherbée, il est d'abord nécessaire de cibler les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire (Morschel et Fox, 2004).

La démarche générale de cette thèse s'intéresse à la caractérisation de l'état de dégradation cette zone dans le but de mettre en place un outil d'aide à la décision qu'est la carte des risques érosifs. L'ensemble de ces travaux a été conduit sur deux sous-bassins du Goroubi localisés sur le plateau sableux de Dyabou. En effet, c'est dans ces deux bassins que l'essentiel des défrichements pour la mise en culture a été opéré.

Ce travail s'inscrit dans la compréhension de la dynamique environnementale dans un contexte de changements d'usage des sols. Les données issues de cette étude seront comparées à d'autres résultats afin de mieux comprendre les impacts des changements d'usage des sols dans la dynamique de dégradation des ressources naturelles et particulièrement sur l'ensablement du fleuve Niger. Cela constituera une base de données environnementale pouvant orienter les interventions futures.

Le travail est structuré en cinq (5) chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la contextualisation de la dynamique actuelle dans l'aire « *ayi noma* ». Il s'agit de justifier le contexte de ce travail, mais aussi de décrire le cadre méthodologique.

- Un deuxième chapitre place la zone de l'étude dans le contexte régional et local. Il s'agit ici, de la description du cadre physique et des aspects humains.
- Le troisième chapitre traite de la dynamique d'occupation des sols. il porte sur une analyse diachronique. Cette analyse concerne trois situations allant de 1987 à 2010. Une étude détaillée des processus a permis de caractériser les différentes unités géomorphologiques et de comprendre le niveau d'instabilité des versants du Goroubi et de ses affluents dans l'aire « *ayi noma* ».
- Ensuite, l'étude du ruissellement et de l'érosion sur parcelles expérimentales a permis de quantifier les pertes en terre annuelles sur la croûte d'érosion et sur le champ de mil avec ou sans traitement. Ce chapitre vise à estimer la contribution au ruissellement et à l'érosion des surfaces nues ainsi que l'effet des bandes enherbées (chapitre 4).
- Le cinquième chapitre porte sur la cartographie des risques érosifs. Différents scénarios de l'évolution de certains paramètres contrôlant l'érosion seront proposés.
-

Chapitre 1 : le cadre théorique et méthodologique

Ce chapitre pose le problème étudié dans l'aire « *ayi noma* ». Il traite d'abord du contexte et de la justification de l'étude et de la revue de la littérature qui ont permis la définition du modèle d'analyse. Deuxièmement, il définit les objectifs, les hypothèses et la méthodologie.

1.1. Le contexte de l'étude

1.1.1. La problématique de l'étude

Le Sahel est manifestement un domaine géographique où la question de la dégradation des ressources naturelles reste préoccupante d'autant plus que ce milieu subit les effets multiples de la variabilité climatique et la forte pression démographique. Cette zone est gravement affectée par le déficit pluviométrique le plus important, tant dans son intensité que dans sa durée, jamais enregistré au cours du 20^{ème} siècle (Hulme, 1996), (Morel, 1998 ; Dai *et al.*, 1998) cités par Ozer *et al.* (2004). A ces contraintes climatiques s'ajoute une augmentation de la pression démographique. Cela entraîne une panoplie d'impacts sur un environnement déjà fragilisé.

De nombreuses études ont montré une forte corrélation entre la croissance démographique et la dégradation des terres surtout quand il s'agit de l'érosion hydrique. Planchon et Valentin (1999) estiment une progression de la superficie des terres dégradées à 13 % suivant un modèle (appliqué à une projection sur 30 ans). Ce modèle a été mis en œuvre en croisant des cartes de densité de population et celles de dégradation des sols en Afrique de l'Ouest. Parmi ces terres dégradées, les superficies cultivables gravement dégradées progresseraient de 16 %. Laouina (1995), Laouina *et al.* (1993) et Coelho *et al.* (2004) mettent en évidence qu'avec une démographie croissante, des évolutions qui affectent les secteurs ravinés avec élargissement, allongement, approfondissement des ravins, accompagnés de sapement des berges.

Ces contraintes se traduisent par de profondes mutations environnementales et socio-économiques. Sur un autre plan, l'action perverse du climat conjuguée aux activités anthropiques a pour conséquence la dégradation voire même la destruction des

écosystèmes. Cela engendre une rupture des équilibres écologiques, accélérant ainsi les phénomènes érosifs. Cette dynamique diminue la possibilité de production des écosystèmes poussant ainsi à une surexploitation de ressources naturelles qui fragilise à son tour le milieu physique.

Le Niger, à l'instar des autres pays sahéliens et avec un taux de croissance de 3,1 % en 2001 (RGP 2001), est confronté à une poussée démographique sans précédent ; Ce qui contribue fortement à la dégradation de son environnement physique. Face à ces contraintes environnementales couplées à la fréquence des sécheresses, les populations ont cherché à s'adapter. Si dans certaines régions, elles font recours à l'extension de zones cultivées ou à des cultures de contre saison, dans d'autres régions, la mobilité spatiale a été adoptée comme stratégie pour faire face à ces contraintes et à la sécurité alimentaire.

Dans un tel contexte, Sidikou (1991 et 1977), Amadou (1995) Mounkaïla (2005, 2002, et 1999, etc.), ont montré que la région de Tillabéri caractérisée par une insécurité alimentaire quasi permanente depuis le début des années 1970 a été la région la plus concernée par les migrations. Les populations ont migré vers le sud jouissant d'un climat beaucoup plus clément et de diverses potentialités. Dans cette région, le département de Say est devenu alors un pôle d'attraction depuis la fin des années 1960 au moment où les sécheresses successives ont durement frappé les pays sahéliens. La commune rurale de Tamou qui recelait jusque-là d'importantes ressources forestières et des « terres vierges » et qui possède l'un des plus denses réseaux hydrographiques du pays est apparu comme un milieu-refuge. Ce fut donc le point de départ du processus d'installation des populations venues d'horizons divers.

L'accentuation des risques de sécheresses, l'éradication de certaines maladies endémiques dans les années 1980 (l'onchocercose) et le souci d'atteindre l'autosuffisance alimentaire ont amené l'Etat à envisager le transfert des populations vers le sud où existent encore des « terres vierges ». Ainsi, le décret n°76/141/PLMS/MDR du 22 Août 1976 consacre le déclassement d'une partie de la réserve totale de faune de Tamou pour son exploitation agricole par les populations sans terre du nord de la région de Tillabéri (Zarmaganda et Kourfey) victimes de la sécheresse des années 1973-1974. Ce processus s'appelle « opération « *ayi noma* ». Les populations se sont laissées alors attirer par les multiples potentialités qu'offre la zone périphérique du parc national du W du Niger.

Ainsi, la partie située entre le Goroubi et le Diamangou est devenue le lieu d'activités diverses, comme l'agriculture, la pêche, l'élevage, l'exploitation du bois etc.

Cependant, après quelques années de production, la majorité des immigrants a regagné sa zone d'origine. Après le départ des immigrants, et précisément au début des années 1980, des officiers, hauts fonctionnaires et grands commerçants de Niamey ont commencé à manifester leur intérêt pour cette zone qu'ils finissent d'ailleurs par occuper au détriment des populations sinistrées. Cette nouvelle catégorie d'exploitants a mis en place une exploitation minière. Le défrichement a été mené par la méthode la plus anarchique. Au lieu de 50 ha le maximum autorisé, certains exploitants ont défriché 200 à 500 ha. Il faut aussi signaler qu'aucune disposition n'a été respectée par cette catégorie d'exploitants à l'exemple du contrat de culture qui était de deux (2) à trois (3) ans renouvelables qui dans le fait n'a jamais été renouvelé jusqu'à aujourd'hui.

Cette zone est devenue le théâtre des divers enjeux environnementaux et socio-économiques. L'opération « *ayi noma* » qui s'est fixée comme objectif l'autosuffisance alimentaire et au mieux dégager des surplus commercialisables, s'est soldée par de rapides changements au niveau de l'usage des sols. L'évolution de l'occupation des sols a entraîné la diminution et la forte dégradation des formations végétales naturelles. La mise en culture se traduit par la mise en place de couvertures végétales peu protectrices vis à vis du ruissellement et de l'érosion. Les bouleversements intervenus dans le paysage et le transfert des pratiques agricoles induits par l'intensification de l'agriculture, ont contribué à une dégradation continue des ressources et à l'ensablement du fleuve Niger.

Divers auteurs (Amadou, 1991, 1995 ; Bénoit 1998, 1999 ; Boubacar, 2004 ; Abba, 2007) soulignent qu'avec la mise en culture de cette région, on assiste à une transformation continue des ressources naturelles liée à la croissance démographique durant ces dernières années. Avec un taux d'accroissement de 3,3% par an (INS, 2007), la densité d'occupation humaine dans la commune rurale de Tamou a atteint respectivement plus de 19 et 24,72 hab*km⁻² en 2001 et 2010 (ME/F, 2006, 2010) alors qu'elle n'était que 4 hab*km⁻² jusqu'en 1975. Les formations végétales naturelles disparaissent progressivement au profit des cultures et des zones nues. Les zones de cultures ont progressé de plus de 60 % entre 1956 et 1988 sur le plateau sableux de Dyabou où se sont installés beaucoup de migrants (Amadou, 1995) et continuent de progresser puisque actuellement le défrichement se

poursuit. Ainsi, ce plateau qui servait d'espace de pâturage a connu une mise en valeur presque complète de sa superficie. Cela a entraîné par la suite une dynamique de dégradation des terres et de l'érosion. Sur un autre plan, il s'agit aussi des conflits entre divers acteurs présents sur place, mais aussi de la pression sur la partie centrale de la réserve de la biosphère, et la dégradation de l'environnement physique (disparition quasi-totale de la végétation naturelle, des sols ...). Cette dynamique est un facteur de déséquilibre aussi bien pour un écosystème fragile et sensible que pour les populations autochtones. On assiste donc à des rapides transformations en relation avec l'augmentation de la population due à l'importance de la migration et au système d'exploitation mise en œuvre.

Cette étude s'intéresse à la compréhension de la dynamique des changements d'usage des sols et à la mise en évidence de ses impacts sur les ressources naturelles. En effet, les changements d'occupation et d'utilisation des sols occupent une place centrale dans le fonctionnement du système terrestre et leur suivi représente un enjeu particulièrement important dans les régions agricoles (Lecerf, 2008). Quelles sont alors les implications de changements d'usage des sols sur la dynamique actuelle dans l'aire « *ayi noma* »?

Récemment mise en culture, cette zone donne l'image d'un milieu perturbé avec d'importants dommages en aval. La dynamique érosive (ravinement, déflation éolienne) se généralise et les versants fragilisés par l'absence d'une couverture végétale conséquente deviennent alors de plus en plus instables. En effet, on relève des signes de dégradation du milieu physique tels que la disparition de la végétation naturelle au profit des cultures et des espaces nus dégradés, la baisse de la capacité d'infiltration et de la productivité des sols avec une pression humaine croissante sur les terres occupées, ainsi que l'important ravinement observé sur l'ensemble de la zone d'étude. Il faut aussi noter l'apparition des nouvelles formes d'érosion par ravinement ou dépôt. Roose (1994) souligne que l'érosion augmente en fonction de la densité de la population. Planchon et Valentin (1999) ont mis en évidence, pour le cas de l'érosion hydrique, une forte relation entre la dégradation et la population en croisant des cartes de densité de population et de dégradation des sols en Afrique de l'Ouest. Cependant, Souley (2010) souligne que dans la commune rurale de Tamou les espaces de culture passent de 10 % de la superficie totale en 1975 à environ 35 % en 2007. Devant l'ampleur de cette dynamique, on assiste à une prolifération des vastes superficies incultes sous forme de regs, d'où leur abandon puisque les paysans les

qualifient d'impropres aux cultures et disent que les « cailloux poussent » sur ces superficies. Cette dynamique n'est-elle pas à l'origine de l'instabilité croissante des versants du Goroubi et de ses affluents sur lesquels l'essentiel du défrichage y a été opéré ?

Le changement d'usage des sols dans l'aire '*ayi noma*' durant ces dernières années s'est soldé par une intensification et une généralisation de l'érosion se traduisant par les diverses formes de ravinement observées sur les versants. Les conséquences sont le plus souvent néfastes. Il s'agit de la formation des nombreux cônes à la confluence des cours d'eau principaux. Ces îlots de sable provoquent le comblement du lit du cours d'eau réduisant sa capacité de stockage et de drainage et l'engloutissement du peu de la végétation (Amoukou, 2009). Concernant les cônes, Souleymane Salaou (2012) a montré un ensablement des fonds des koris par des formes de construction que sont les cônes latéraux à la confluence des nombreuses ravines qui s'y jettent ainsi que la formation d'un large cône de déjection à l'entrée du Goroubi. Ces formes qui constituent des zones transitoires de dépôts sont en perpétuel remaniement lors des différentes crues.

Eu égard à tous ces processus, la problématique dans cette zone peut se résumer par un schéma constituant un modèle de fonctionnement de son système géomorphologique (figure 1). Ce modèle se structure autour des trois idées clés : il s'agit des contraintes climatiques, de l'éradication des maladies endémiques et du déclassement de la partie nord de la réserve totale de faune de Tamou. Ces trois paramètres sont le point de départ de la dynamique récente des versants du Goroubi et de ses affluents à l'échelle de cette entité anthropisée dénommée aire « *ayi noma* ». Bref, ce modèle montre comment le système géomorphologique de cette aire a évolué depuis le processus d'installation des populations via la mise en culture et au niveau actuel de dégradation. Il a aussi permis de distinguer les facteurs d'instabilité des versants et de comprendre comment se manifeste cette instabilité.

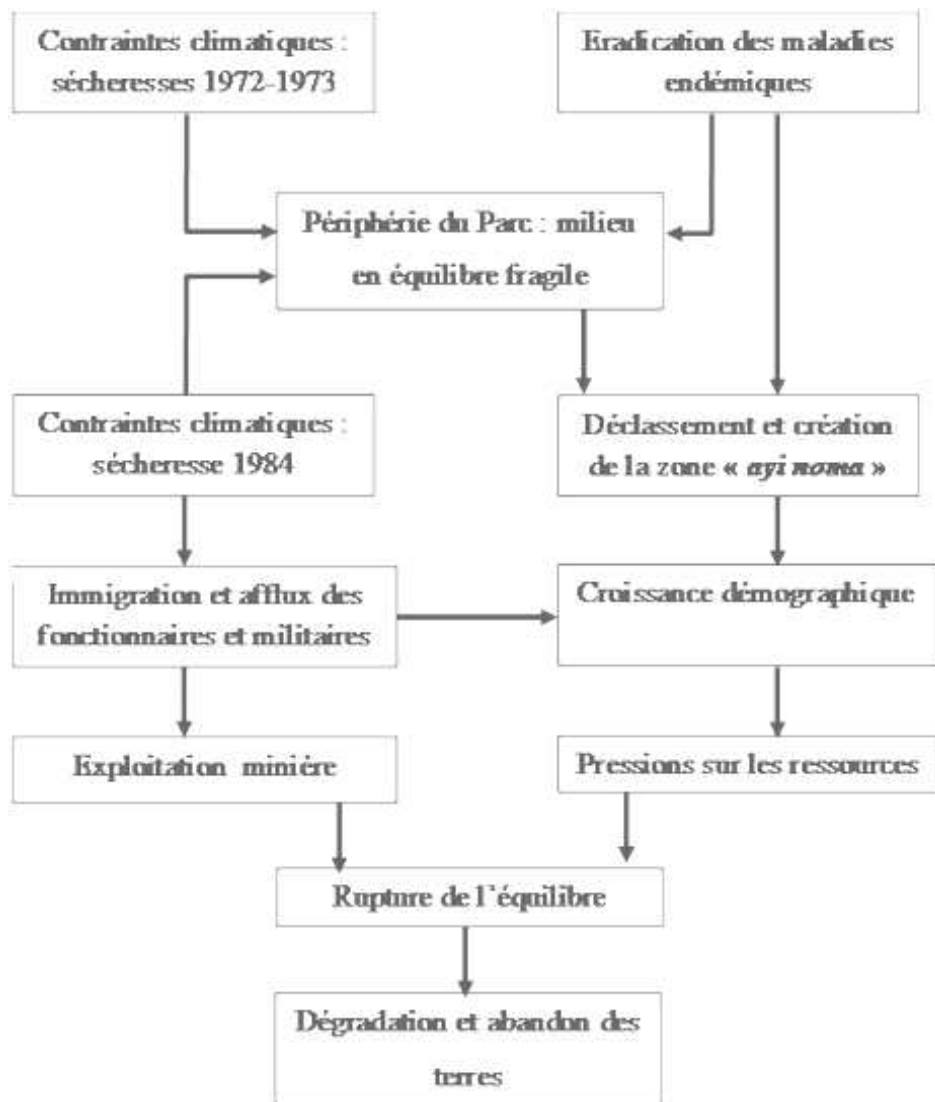


Figure 1 : Modèle de fonctionnement du système géomorphologique de l'aire « ayi noma »

1.1.2. La revue de la littérature

Nous proposons ici une synthèse de quelques connaissances relative aux changements d'usage des terre et ses implication sur la dynamique actuelle dans la zone « ayi noma » ou ailleurs. Cet état de connaissances est présenté par thématiques qui permettent de mieux appréhender le rôle de la colonisation agricole sur la dynamique actuelle à l'échelle de cette zone anthropisée.

1.1.2.1. Démographie, changements d'usage des sols et dynamique actuelle

Divers travaux d'études et de recherche ont établi le lien entre la dynamique actuelle et la croissance démographique. La dynamique hydroérosive et des écoulements du kori Mountséka relève de la profonde mutation de l'occupation du sol qu'a subi son bassin (Bouzou Moussa et *al.* ; 2009). La forte pression sur ce bassin de Sama Dey a conduit à un changement radical de leur comportement hydro-géomorphologique (Bouzou Moussa et *al.* ; 2011). Elle se manifeste pour l'essentiel par une dégradation du couvert végétal, et une augmentation des surfaces encroûtées génératrices de ruissellement et d'érosion sur des sols sableux éoliens très fragiles. Bouzou Moussa et *al.* (1996) ont montré que la dégradation d'un environnement physique se marque sur trois de ces composantes : la végétation, les sols et les formes d'érosion. On assiste donc à une concentration des écoulements; les ravins qui emportent les fractions importantes de sol se forment, les koris s'approfondissent. Cette évolution se traduit par la dégradation de la couverture végétale, la dénudation, l'encroûtement puis le décap. des sols, l'augmentation du ruissellement, le ravinement des versants, le changement du régime des rivières, la baisse du niveau de nappe et finalement l'aridification du microclimat régional (Roose; 1988 cité par Bouzou Moussa ; 1998). Difumier (1994) cité par Fournier et Durand, (2002) a montré une rupture des grands équilibres écologiques avec la pression démographique. On passe en quelques années des systèmes de cultures traditionnels utilisant de mise en valeur de jachères à un système d'exploitation quasi continue des parcelles.

Laouina (1995) démontre le développement de l'érosion régressive ainsi que le sapement de berges alluviales en rapport avec la croissance démographique dans le rif marocain. Cela résulte des changements d'usage du sol qui ont augmenté les besoins en bois et en combustible des populations locales (Laouina et *al.*, 1993). En outre, l'introduction de moyens techniques inadaptés et le manque de concertation entre les différents acteurs sont autant de facteurs qui contribuent à l'augmentation de la vulnérabilité ce qui déclenche une érosion sélective particulièrement dangereuse (Benabdeli, 2000, Azontondé, 1995); certaines activités humaines (défrichage des versants, surpâturage et techniques culturales) semblent responsables de risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie depuis plus d'une trentaine d'années (Morsli et *al.* ; 2004, Meterfi et *al.* ; 2011). Ben Cheikha et *al.* (2008) ont montré que la régression du couvert végétal en au profit de la céréaliculture en

penne a rendu les versants du bassin du lac Jannet très vulnérables à l'action érosive de la pluie ; une situation qui s'est traduite par un accroissement du taux de ruissellement et une intensification de l'érosion hydrique dont l'aboutissement a été la formation de *badlands*, la réduction de la superficie des terres cultivables, tandis qu'en à l'aval, on observe l'envasement du lac.

Tsayem Demaze (1995) souligne que l'action conjuguée de facteurs physiques et humains se traduit par une accentuation des processus morphogénétiques. En superposant la carte des densités humaines sur celle du milieu physique, il met en évidence une *anthropomorphogénèse* dont la dégradation latente ou accélérée des sols n'est qu'un aspect même si par ailleurs il s'avère difficile de classer par ordre d'importance la part de chaque facteur de dégradation.

Desse (2002) souligne que l'évolution de la démographie sur le littoral est un facteur de déséquilibre aussi bien pour des écosystèmes sensibles que pour les populations préalablement installées. Au Laos, cette dynamique a été démontrée où l'érosion subit d'importantes variations lors des transitions rapides d'un système de culture à un autre. L'augmentation de population, le regroupement de villages et la réforme foncière ont entraîné en moins de dix ans une réduction très sensible des périodes de jachères (http://www.ambafrance-laos.org/france_laos/spip.php?rubrique115)

Lahousse (1996) souligne le rôle des mutations récentes subies l'économie rurale, ainsi que la dégénérescence de certaines pratiques culturelles et des nouvelles infrastructures dans l'accélération voire le déclenchement de l'instabilité des versants dans la vallée de la Guisane. (Calcagni et *al.*, 1982), ont montré que l'instabilité des versants est liés en partie des facteurs humains dont la mise en culture des terres marginales, ainsi que les nombreux parcours. La dégradation de l'écosystème s'exprime à travers une érosion hydrique résultant d'un ruissellement généralisé (Perez et Sene, 1995). En somme, l'érosion est devenue essentiellement une conséquence directe de l'activité humaine qui représente maintenant le principal facteur de la dégradation des sols. L'action de l'homme a provoqué une accélération notable de l'érosion dans ce milieu naturellement fragile qui se manifeste par un ravinement généralisé (badland).

Tavares-Filho J. Tessier (1998) soulignent qu'au Paraná (Brésil), en 35 ans de mise en culture, les sols présentent des problèmes de dégradation principalement liés à leur tassement et à la disparition d'une partie de leur macroporosité.

L'impact de la pression anthropique sur la dynamique actuelle de l'aire « *ayi noma* » se traduit par une accélération des phénomènes érosifs (développement des cônes latéraux, encroûtement, développement des bad-lands etc.) qui dans certains cas entraînent l'abandon des grands domaines (Souleymane Salaou ; 2012, Issoufou Mamane ; 2010, Abba ; 2007, Amadou ; 1995, Amadou ; 1991, Boubacar ; 2004).

1.1.2.2.L'encroûtement et le comportement hydro-dynamique des sols

De nombreuses études ayant fait le lien entre la faible couverture végétale, l'évolution de la pluviométrie et le comportement hydro-dynamique des sols, ont montré que malgré la baisse de la pluviométrie observée durant la décennie 1980, on enregistre une augmentation des ruissellements sur les versants. Selon Mahé (2002), la diminution des pluies a entraîné une modification de la répartition de la végétation, accélérée par la pression anthropique sur l'environnement : coupes pour le bois de chauffe, défrichements des nouvelles terres cultivables, et dégradation croissante des terres cultivées ou surpâturées. Abdourahmane (1995) et Anonyme (2000, Amani et Nguetora, 2002, Mahé, 2009) menant respectivement des études hydrologiques sur le bassin du Goroubi et sur les affluents de la rive droite du fleuve Niger ont observé une augmentation de ruissellement sur les versants. L'augmentation des ruissellements est liée à la diminution du couvert végétal ainsi qu'à l'encroûtement des sols qui diminuent la capacité d'infiltration. Albergel *et al.* (1986), Albergel (1987) attribuent ce phénomène à la baisse de la capacité de rétention en eau suite à la mise à nu des sols par les cultures. D'autres études lient ce phénomène à la multiplication des surfaces nues encroûtées.

Desconnets *et al.* (1996), Peugeot (1995) montrent le rôle de l'encroûtement dans la genèse du ruissellement. En fonction des états de surface, il démontre l'influence des croûtes sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant sahélien. Il souligne que le degré de l'encroûtement et la pluviométrie sont les deux variables explicatives du ruissellement. Ambouta (1994) a distingué les paramètres internes (granulométrique, chimique, et

minéralogique) des paramètres externes qui sont d'ordre climatique (l'intensité de la pluie et donc l'énergie cinétique de la pluie). Il souligne que ce sont ces paramètres qui influencent le déclenchement des ruissellements et de l'encroûtement.

1.1.2.3. Instabilité des versants et risques érosifs

Lahousse (1996), Calcagni *et al.* (1982), Cheikha Lilia et Moncef (2008) s'appuient sur la répartition des formations superficielles pour expliquer l'instabilité des versants. En outre selon ces auteurs, le climat joue aussi un rôle primordial dans l'explication de l'instabilité des versants. Pour Valentin *et al.* (2004) souligne que c'est la faiblesse de la matière organique qui en réduisant la stabilité structurale du sol déclenche ou accélère l'instabilité des versants. (Valentin *et al.*, 2005) soulignent que les changements d'usage des sols sont à l'origine de l'augmentation du ruissellement d'une part et qu'ils ont un impact bien plus important sur l'érosion par les ravines. Mamadou *et al.* (2009) ont montré que les ravines se développent d'une année à l'autre ce qui augmente la dégradation des sols. Il ya donc nécessité de caractériser le bassin ou le terroir pour toute action d'aménagement. Sadiki, *et al.* (2004), Ben cheikha et Gueddari (2008), Monschel et Fox (2004), ont montré le rôle de la RUSLE dans la cartographie des risques érosifs. Elle permet évidemment de localiser les secteurs nécessitant une intervention prioritaire. Même si par ailleurs ils sont unanimes que le modèle empirique de Wischmeier et Smith (1978) présente plusieurs limites à son applicabilité dans des conditions différentes de celles où il a été élaboré. Initialement ce modèle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et que les quantités de pertes estimées n'incluent pas les pertes par les autres types d'érosion (linéaire, solifluxion, ...). C'est pourquoi, ils ont intégré un facteur correctif permettant d'estimer les pertes en terre par ravinement qui est la forme la plus dangereuse et la spectaculaire de dégradation des terres dans l'aire « *ayi noma* ».

1.1.2.4. La dynamique des cônes

Concernant les cônes, Souleymane Salaou (2012) a montré un ensablement des fonds des koris par des formes de construction que sont les cônes latéraux à la confluence des

nombreuses ravines qui s'y jettent ainsi que la formation d'un large cône de déjection à l'entrée du Goroubi. Mamadou (2006) Le Breton (2004) se sont intéressés à la dynamique des cônes dans les bassins versants de Wankama et Tondi-kiboro. Ils montrent que les cônes se forment dans les secteurs de rupture de pente et sont en perpétuel remaniement lors des différentes crues. Ils forment des verrous et obstruent les réseaux hydrographiques (Moussa Mahamadou, 2005) et provoquent le comblement du lit du cours d'eau réduisant sa capacité de stockage et de drainage et l'engloutissement du peu de la végétation Amoukou (2009). Mamadou (2012) a montré le rôle des cônes des koris exoréiques de la région de Niamey dans l'ensablement du fleuve Niger.

1.1.2.5. Quantification de l'érosion

Ce sont entre autre des études menées dans l'Adar-Maggia par Vuillaume (1968, 1969) qui estime à 10 à 13,2 t/ha/an les pertes en terre sur les glacis limoneux et à 0.6 t/ha/an sur les sols dunaires et celle menée par Delwaille (1973) qui a étudié sur 6 ans d'observation, de mesure de ruissellement et d'érosion sur des parcelles de 100 m². Il a enregistré une érosion de 7,5 t/ha/an sur les versants caillouteux et 5,7 t/ha/an sur les glacis cuirassés. D'autres études (Schenher, 1973 ; Bouzou Moussa, 1988) ont été respectivement menées à la station du CTFT dans la vallée de l'Adar à Allokoto (Madaoua) sur glacis à pente de 3% et dans la vallée de Keita (Adar, Niger) sur des parcelles de 100 m² et 1000 m².

Par ailleurs, d'autres études abordant cette thématique sont conduites dans l'Ouest du Niger. Elles concernent le ruissellement, l'érosion et l'ensablement (Le-Breton, 2004 et 2012 ; Mamadou, 2006 et 2012, El hadj Moussa, 2007 ; Aboubacar, 2007 ; Ambouta *et al.*, 2000 ; Descroix *et al.*, 2009 ; Moussa Noma, 2010; ...), la dynamique actuelle et l'érosion éolienne (Faran Maïga, 2000, 2004 ; Abdourahamane, 2011 ; Tidjani, 2008 ; Bouzou Moussa, 2000 ; ...). Ces études ont montré des rapports entre la dynamique récente à l'échelle des bassins versants et l'évolution de la pluviométrie ainsi que la pression démographique.

1.1.2.6. Les Pratiques antiérosives

Des nombreuses techniques de récupération des terres dégradées allant des techniques mécaniques (cordons pierreux, diguettes murets...) ou encore biologiques ont été développées. Dans le présent travail nous avons testé les effets de lutte biologique bandes enherbées. En effet, la végétation protège les sols de l'ablation par réduction de l'énergie des agents érosifs et maintien des sols (Rey et al, 2004). Zougmoré et al. (2004) ont mis en évidence le rôle de bandes enherbées avec *Andropogon gayanus* dans la réduction du ruissellement (45%) et de l'érosion (35%). Ces techniques n'ont pas seulement pour objet de réduire l'érosion, elle favorisent la rétention d'eau dans le sol et par là même améliorer la productivité. Mathieu et Lhomme (2002) montre le rôle, des bandes enherbées dans la lutte contre l'érosion hydrique et la pollution des eaux de surface.

Bilgo et al. (2002) montre que les bandes d'absorption sous forme de jachère naturelle herbacée ou améliorée par l'introduction de graminées pérennes (*Andropogon gayanus*) permettent de maximiser l'infiltrabilité. Ils ajoutent que des jachères gérées, même de faibles dimensions, disposées adroitement, pourraient être utiles dans les aménagements des terroirs pour limiter le ruissellement et l'érosion des sols à longue distance.

Roose (1998) a montré qu'en matière de lutte contre l'érosion la révégétalisation joue un rôle important puis que l'arbre est le facteur le plus puissant pour réduire le risque d'érosion. Dugue (1998) souligne l'importance d'associer les aménagements en cordons pierreux et du traitement de petites ravines avec des digues ou des murets en pierres. L'implantation de graminées (*Andropogon gayanus*) en amont des ouvrages vise à ralentir le ruissellement avant qu'il ne les atteigne. Les touffes de graminées ont aussi pour fonction de retenir les sédiments fins et le sable.

Au Niger, quelques des réalisations de type biologique en matière de lutte contre l'érosion éolienne dans le Sud-est du Niger (Tidjani, 2008) ou dans le cadre de la lutte contre l'érosion des berges (Bender et Ousseini, 2000) ...

1.1.3. Définition des concepts clés

1.1.3.1. Le concept de dégradation des sols

Selon la définition donnée dans le dictionnaire de la science (Lozet et Mathieu, 1990) la dégradation est la transformation d'un sol par lessivage ou altération aboutissant à un sol dans lequel les propriétés sont moins favorables pour l'utilisation agricole... Elle peut être naturelle ou provoquée par une intensification culturale ou par des techniques non appropriées. Il en résulte généralement une perte des qualités physico-chimiques telles que structure, rétention en eau, porosité, acidification, etc.». Barrow (1991) définit la dégradation des sols comme un processus qui réduit le potentiel de production des sols ou de l'utilité des ressources naturelles ; c'est également un changement de tous les aspects naturels ou biophysiques de l'environnement par une activité anthropique au détriment de la végétation, des sols, de l'état de surface, des eaux de surface et souterraines ainsi que des écosystèmes (Conacher et Sala, 1998). Autrement dit, la dégradation est une évolution différente de l'évolution naturelle liée au climat et à la végétation ; elle est provoquée par le remplacement de la végétation primitive (climax) par une végétation secondaire, ce qui modifie l'humus et la formation du sol.

La dégradation des sols est un processus qui décrit les phénomènes dus à l'homme et/ou à l'agressivité climatique qui abaisse la capacité actuelle et/ou future à supporter la vie humaine. C'est en quelque sorte une situation où l'équilibre entre l'agressivité climatique et le potentiel de résistance du sol a été rompue par l'action de l'homme².

Selon la convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, la dégradation des terres est la diminution ou disparition, dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches, de la productivité biologique ou économique des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts, ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement, tels que (i) l'érosion des sols causée par le vent et / ou l'eau; (ii) la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économiques des sols; (iii) la disparition à long

² <http://www.bf.refer.org/toure/pageweb/degrasols.htm>

terme de la végétation naturelle (PNUE / CCD, 1995). Elle a pour cause la déforestation pour des fins agricoles. Plus de 220 millions d'hectares de forêts tropicales ont été détruits de 1975 à 1990, essentiellement pour faire place à la production vivrière. Parmi ses causes, il faut souligner le surpâturage, la Consommation de bois de feu, la mauvaise gestion des terres agricoles et l'Industrie et l'urbanisation (FAO, 1996).

Dans notre zone d'étude, la dégradation des sols est surtout liée à la forte croissance démographique provoquant ainsi une surexploitation et un épuisement des terres qui conduit à leur abandon puisque devenues incultes. Les causes sont entre autres le déboisement anarchique utilisant des gros engins (bulldozers), l'exploitation minière, ainsi qu'un système de cultures extensif sans apport de fumier pratiqué par les populations venues du nord. La dégradation des sols s'exprime par la disparition du couvert végétal naturel, la baisse de la fertilité des sols, l'encroûtement des sols et l'intense érosion hydrique qui se manifeste par les formes de décap., le ravinement et l'accumulation.

1.1.3.2. Le concept d'érosion

Étymologiquement, le mot érosion vient du verbe éroder (mot latin erodere) emprunté au dictionnaire médical qui signifie ronger (Neboit, 1982). L'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un os. D'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi (Roose ; 1999). Employé dans le champ d'étude des sciences de la Terre, ce terme désigne la perte de substance que subit une portion de la surface terrestre. Elle se produit quand une partie du matériel constituant le sol, ou parfois le sol entier, est déplacée hors du site sur une distance variable, par l'eau, le vent, la gravité ou les outils utilisés pour le travail du sol (Brabant, 2008). Pour Neboit 1982), ce terme qui recouvre un ensemble complexe d'opérations, amorce une évolution du modelé, qui résulte de l'enchaînement de trois processus que sont le décap., le transport et le dépôt. Cela rejoint la définition donnée dans le dictionnaire géologique (éd. 1980), c'est "*l'ensemble des phénomènes externes qui à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient ainsi le relief*". L'érosion est un problème vieux comme le monde : elle a sculpté nos paysages, mais aussi construit les deltas fertiles (Roose, 2004). C'est un processus de

dégradation et de transformation du relief, et donc des roches, qui est causé par tout agent externe (donc autre que la tectonique) (Hudson, 1981 cité par Diallo, 2000).

Une typologie de l'érosion peut être faite en fonction des facteurs actifs c'est-à-dire la source d'énergie (eau, vent, glace ou gravité) (Diallo, 2000), ou même en fonction de l'échelle temporelle. Selon le second critère, on distingue l'érosion normale et l'érosion accélérée (qui fait intervenir une immixtion de l'homme dans la morphogénèse actuelle).

L'érosion normale ou géologique (morphogénèse) qui façonne lentement les versants (0,1 à 1 t/ha/an) tout en permettant le développement d'une couverture pédologique issue de l'altération des roches en place et des apports alluviaux et colluviaux (pédogénèse). Dans ce cas, les paysages sont stables quand il y a équilibre entre la pédogénèse (vitesse d'altération des roches) et la morphogénèse (érosion, dénudation) (Kilian et Bertrand, 1974 cité par Roose ; 1994). Elle est de l'ordre de quelques tonnes par km² et par an sauf en cas des soubresauts catastrophiques (glissements de terrain par exemple). Quant à "l'érosion accélérée" ou anthropique qui apparaît souvent sous l'effet de l'homme, lorsque la pression démographique dépasse certains seuils (20 à 40 habitants par km² en Afrique de l'ouest) (Roose, 2003). Elle rappelle selon Neboit (1982, 1991) *un trait marquant de la morphogénèse anthropique, la rapidité avec laquelle elle se déroule. En effet, l'homme imprime sa marque aux sols et au modelé à un rythme qui est celui de l'histoire, ce qui suppose, dans la majorité des cas une accélération formidable de la dynamique des formes*. L'érosion est devenue essentiellement une conséquence directe de l'activité humaine qui représente maintenant le principal facteur de dégradation des sols (Georges, 2008). Pour Roose (2004), l'érosion accélérée a pris de l'ampleur avec le développement exponentiel de la population. Selon lui, l'homme modifie profondément et rapidement l'évolution des sols par le défrichement, les coupes rases abusives, le surpâturage (y compris en forêt), le ratissage des litières, le labour, l'usage intensif d'engrais chimiques et de pesticides. Des chiffres impressionnants sont avancés en guise de comparaison. « L'érosion moyenne à l'est des montagnes rocheuses a été chiffrée à 100 t/km²/an sous couvert forestier, à 400 t/km²/an et à 1100 t/km²/an sous cultures » (Neboit 1991).

Il faut cependant distinguer les types d'érosion dont l'érosion en nappe qui s'applique à toute la surface du sol. Sa cause est l'énergie de la battance des gouttes de pluies sur les sols nus (Roose, 1999). L'érosion en nappe dépend de : l'intensité maximale des pluies qui

déclenchent le ruissellement ; celle-ci est variable suivant les auteurs : I_{max} en 30 mn, 7 mn ou 15 mn et 5 mn respectivement pour Wischmeier et Smith (1978), Lal (1975), Bouzou Moussa (1988); de l'énergie et de la durée des pluies. L'érosion aréolaire est grave à long terme, car elle écrème la partie du sol la plus fertile et elle couvre de grandes superficies Bravant (2008).

Quant à l'érosion linéaire, elle s'effectue avec l'augmentation de la pente sur les versants. Ce type d'érosion ou ravinement se fait d'aval vers l'amont d'où l'expression de l'érosion régressive. Celle-ci érode le sol sur des profondeurs variables et elle délaye ainsi la couche la plus fertile. On parle de l'érosion en ravin quand le ravinement atteint le stade suprême. La terre devient ainsi inexploitable quand les ravins sont nombreux et profonds de plusieurs mètres. Dans l'aire « *ayi noma* », ce dernier stade de l'érosion tend se généraliser sur toutes les unités topographiques y compris le faciès sableux du plateau.

1.1.3.3. Le changement d'usage des sols

Le concept d'usage ou d'utilisation des sols est le plus souvent confondu avec le concept d'occupation des sols. L'occupation du sol fait référence à la couverture physique de la surface terrestre, tandis que l'utilisation du sol fait référence à l'anthropisation des surfaces terrestres et plus particulièrement à la fonction socio-économique des surfaces (Lecerf, 2008). Selon lui, les surfaces terrestres évoluent continuellement, soit sous l'action de l'homme, soit naturellement en fonction du cadre physique constitué par le climat, les sols, la végétation, l'eau, l'air. Il distingue deux types de changements d'occupation ou d'utilisation des sols : les conversions et les modifications. Les premières correspondent au basculement d'une classe à l'autre. Trois cas de figures peuvent se présenter : des « modifications » et des « conversions » de ces unités qui s'opposent aux situations « sans changement ».

Sarr (2010) définit la modification comme les changements intervenus à l'intérieur d'une même catégorie d'occupation du sol comme par exemple savanes arbustives qui deviennent savanes arbustives dégradées ou très dégradées. Tandis que la « conversion » est le passage d'une catégorie à une autre comme par les savanes qui deviennent surfaces

cultivées ou sol nu. Le dernier terme étant rapporté à l'ensemble des classes restées intactes.

Ainsi sous l'angle du changement global, la compréhension des conséquences des changements d'usage des sols tient une place de choix quand on sait que ces changements expliquent un quart des échanges radiatifs à l'échelle globale (Forster et *al.*, 2007 cité par Lecerf, 2008) et constitue un enjeu important pour les années à venir dans le contexte actuel de variabilité climatique.

En parlant des changements d'usage, Loireau (1998) s'appesantit sur l'ensemble des pratiques et usages qui se font autour des ressources naturelles. Elle insiste en effet sur l'utilisation dont les ressources font l'objet.

Dans le cas de cette étude, le concept de changement d'usage des sols est plutôt perçu sous l'angle de l'évolution des surfaces sous l'action de l'homme. Il s'agit particulièrement de la transformation des formations végétales naturelles en un domaine agricole, c'est-à-dire la conversion telle qu'elle est définie par les deux auteurs. En effet, en déclassant la zone pour sa mise en valeur, l'on passe d'une formation végétale naturelle (réserve totale) à une surface cultivée avec tout ce que cela implique sur la dynamique environnementale socio-économique.

1.1.3.4. Le concept des états de surface

Dans la zone semi-aride essentiellement sableuse, le comportement hydrodynamique des sols est tributaire de la répartition des organisations pelliculaires de surface. La formation des croûtes superficielles joue un rôle primordial sur le déclenchement du ruissellement et de l'érosion. Casenave et valentin (1989) proposent une typologie morphogénétique des principales croutes sahéniennes, fondée sur le nombre de micro-horizons et sur la structure du micro-horizon affleurant. Cette typologie permet de distinguer neuf (9) types principaux de croûtes qui définissent la surface élémentaire. Le terme « surface élémentaire » désigne, à un instant donné, un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivants : le couvert végétal, la surface du sol et les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs

météorologiques, fauniques ou anthropiques : les croûtes (Casenave et Valentin, 1989). Par contre, le terme « état de surface » peut désigner : une seule surface élémentaire, la juxtaposition d'un ou de plusieurs systèmes de surfaces élémentaires au sein duquel jouent des interactions.

L'importance des états de surface sur l'infiltration et le ruissellement décroît quand la pluviosité (total de pluie précipité) augmente, jusqu'à devenir nulle en zone forestière (Casenave *et al.*, 1994).

1.1.3.5. Les modèles et la modélisation

Les modèles constituent toujours une représentation simplifiée de la réalité. Selon Musy (1998), un modèle est une représentation schématique d'un phénomène physique, réalisée dans le but de mieux l'étudier ou d'analyser l'influence qu'il exerce. La représentation peut être mathématique (résultat d'expressions analytiques de la complexité observée ou supposée et se présente généralement sous la forme d'un ensemble d'équation) ou physique (dans ce cas, le modèle est une maquette reproduite à une échelle adéquate). Musy (1998) continue en précisant qu'il est facile de distinguer dans les modèles mathématiques, les modèles mécanistes (qui se basent sur des équations simulant le comportement précis du système étudié) des modèles fonctionnels qui simulent le fonctionnement global du système.

Peugeot (1995) a proposé une classification des modèles selon trois catégories : un modèle est dit mécaniste, ou a des bases physiques, si la conceptualisation du milieu physique et des processus est fondée sur les lois de la physique, de la thermodynamique ou de la biologie ; si le modèle s'appuie sur une représentation conceptuelle du système qui n'a pas de lien avec un processus au sens mécaniste, mais qui conserve un sens physique, on parle de modèle conceptuel ; enfin, un modèle empirique ne s'intéresse pas à la structure interne d'un système mais utilise une relation directe entre les entrées et les sorties du système.

Les modèles permettent d'analyser des systèmes complexes, servent de complément aux mesures, permettent une extrapolation dans le temps et dans l'espace et sont susceptibles de combiner différents facteurs Géorges (2008). Comme par exemple le

modèle RUSLE qui intègre cinq (5) facteurs à savoir : l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité des sols (K), la topographie (LS), l'occupation du sol (C) et la protection des sols par les pratiques antiérosives.

Le terme modélisation employé dans diverses disciplines (mathématiques appliquées, en chimie, en météorologie ou en sciences de la vie et de la terre) permet d'analyser des phénomènes réels et de prévoir des résultats à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné, ... (<http://fr.wikipedia.org>)

Différents modèles ont été utilisés dans la cartographie des risques érosifs ou en hydrologie. Wischmeier et Smith 1978 ont sur la base de plusieurs années de mesure d'érosion établi un modèle empirique connu sous le nom de l'Equation universelle de perte en terre (USLE). Ce modèle permet d'estimer l'érosion sur des parcelles agricoles.

1. Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle développé par le Département d'Agriculture des États-Unis (Desautels, inédit). Il s'agit d'un modèle continu dans le temps avec un pas de temps journalier et conçu pour être utilisé sur des bassins versants non jaugés. Il est capable de gérer l'hétérogénéité du territoire puisqu'il le divise en unités homogènes de réponse hydrologique. Le modèle SWAT utilise l'équation universelle de perte en sol modifiée (MUSLE) (Arnold et al, 1998). Les données d'entrée dans le modèle SWAT sont de trois (3) catégories :
 - le modèle numérique de terrain (MNT) à partir duquel le modèle SWAT découpe le bassin versant en sous bassins versants ;
 - la pédologie qui permet de connaître la fragilité d'un sol à l'érosion en intégrant des paramètres tels que la granulométrie, le facteur d'érodabilité de l'équation universelle de perte de sol (USLE) et la densité apparente etc ;
 - la classification de l'utilisation du sol.
2. Le modèle LEAM (Land Erodibility Assessment Methodology) développé par Manrique (1988) est un modèle simple conçu pour les pays en voie de développement manquant de données pédologiques et climatiques complètes et correctes. Ce modèle convient bien pour des études à l'échelle régionale et de bassin versant (1/500 000 - 1/20 000). Il permet de

faire un diagnostic simple et rapide de l'érosion potentielle. Il compte parmi ses facteurs : l'érodibilité des sols, l'inclinaison des versants, et l'érosivité des pluies.

Mais le point faible de ce modèle est qu'il ne prend pas en considération la répartition du couvert végétal. Elboukdahui et *al.* (2005) ont introduit ce facteur qui s'avère déterminant pour évaluer le risque d'érosion.

3. Le modèle SEAGIS (DHI, 1999 cité par Cheikha Lilia et Moncef, 2008) calcule le transport solide pour chaque pixel en se basant sur le modèle USLE (universal soil loss equation) combiné avec RUSLE. Comme ce modèle utilise les mêmes facteurs que la RUSLE (agressivité du climat, érodibilité des sols, topographie, couverture végétale et ouvrages antiérosifs), la combinaison de toutes les couches d'information obtenues donne une carte du risque érosif renseignée pour chaque pixel d'une valeur d'érosion exprimée en t/ha/an.

Ainsi le modèle RUSLE a été choisi pour ses facilités d'utilisation. Elle prend en compte l'érosion linéaire qui est la forme la plus dévastatrice en matière de perte en terre et qu'est la plus spectaculaire dans notre zone d'étude.

1.1.4. L'originalité de l'étude

Ce travail s'inscrit dans la compréhension de la dynamique environnementale dans un contexte de variabilité climatique et de changement d'usage des sols. Son intérêt réside dans la mise en évidence des conséquences de la colonisation agricole de l'aire « *ayi noma* » à la périphérie du parc national du W du Niger, et la mise au point d'un outil pour une éventuelle action d'aménagement. Cet outil qui doit fournir des bases de l'évaluation des causes, de l'état actuel, de l'intensité et des tendances de l'érosion (PAP/CAR, 1998 cité par El Garouani et *al.*, 2005). Il ressort de la synthèse de la littérature existante que les études menées dans cette zone se sont intéressées aux conséquences de la mise en culture aussi bien sur le plan spatial que sur le plan socio-économique comme la création des nouveaux villages, les pratiques au tour du foncier ..., d'une part et à caractériser ou même à décrire le processus d'autre part.

Dans ces études, nulle part il n'a été question de la modélisation et encore moins de la spatialisation de l'érosion. Or, la spatialisation s'avère être particulièrement utile en ce qui concerne l'aide à la décision. La carte des risques érosifs apparaît comme un élément clé dans une démarche de lutte contre l'érosion hydrique. Elle permet de localiser les secteurs nécessitant une intervention prioritaire (Morschel et Fox, 2004). La prise en compte de cet outil permettra une gestion durable des ressources naturelles. C'est pourquoi, depuis le DEA, nous nous intéressons à cette question de dégradation des sols en proposant une approche méthodologique pour la constitution d'une base de données pour la surveillance du système hydrogéomorphologique de l'aire « *ayi noma* ». Etant donné qu'un système est défini comme un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but (De Rosnay, 1977), cette base permettrait de comprendre les interactions entre les différents éléments. En effet, Loireau (1998) souligne que tout changement endogène ou exogène, déterminant des changements d'états à l'intérieur de l'un des systèmes, a des répercussions sur le fonctionnement de l'autre système.

Les corollaires de la dégradation de terre sous l'effet de la pression démographique place la question de l'aménagement et de la gestion au cœur de la problématique dans l'aire « *ayi noma* ». C'est pourquoi, l'étude du ruissellement et de l'érosion potentiels sur différents états de surface a été couplée à l'expérimentation des techniques biologiques de la lutte antiérosive (bandes enherbées d'*Andropogon gayanus*). C'est donc une recherche appliquée permettant aux paysans non seulement de récupérer les terres dégradées mais aussi de se procurer des revenus puisque l'espèce utilisée (*Andropogon gayanus*) fait l'objet de convoitise. La technique proposée est facile à prendre en charge par les paysans, puisque simple ; par ailleurs l'espèce est disponible sur place ; en ce sens elle ne pose aucun problème d'adaptation aux conditions climatiques locales. En outre, les andropogonées, contribuent à entretenir la fertilité du sol et constituent à la fois une ressource fourragère de qualité et un matériau de construction (Dugue, 1998).

Les données issues des expérimentations seront utilisées pour la cartographie des risques érosifs. C'est dans cette optique que la cartographie des risques érosifs est admise comme un des objectifs majeurs de l'étude.

1.1.5. Les Objectifs de l'étude

Cette thèse vise deux objectifs généraux :

- la compréhension des conséquences des changements d'usage des sols suite au déclassement à des fins agricoles de la zone « *ayi noma* »,
- la cartographie des risques érosifs pouvant fournir un outil d'aide à la décision.

De ces objectifs généraux, découlent deux objectifs spécifiques :

- la quantification du ruissellement et des pertes en terre sur parcelles expérimentales pour comprendre le rôle des différents états de surface ainsi que la dynamique d'ensablement du fleuve Niger.
- Le test des effets antiérosifs d'*Andropogon gayanus*.

Depuis le projet de déclassement pour la mise en culture de cette zone, l'évolution des ressources naturelles est accompagnée par diverses transformations environnementales. La variabilité climatique et la pression démographique se sont traduites par de nouvelles contraintes telles que la pression foncière, la disparition de la végétation naturelle, la baisse de la fertilité des sols, l'apparition d'espaces nus dégradés pour ne citer que ceux là.

1.1.6. Les hypothèses

Pour atteindre ces objectifs, nous formulons les hypothèses suivantes :

- 1) la forte pression démographique sur les ressources sans mesures conservatoires et l'agressivité des pluies qui tombent sur des sols mal protégés expliqueraient la morphogenèse intense actuelle ;
- 2) les méthodes de la lutte antiérosive biologique (BE d'*Andropogon gayanus*) établies à permettront de réduire considérablement le ruissellement et les pertes en terre.

Le tableau 1 présente un récapitulatif du cadre théorique.

Tableau 1 : Rappel du cadre théorique

Questions de recherche	Hypothèses	Objectifs	Indicateurs vérifiables
Comment se manifeste la dynamique actuelle dans l'aire « <i>ayi noma</i> »	La morphogenèse actuelle se traduit par une intense érosion aussi bien hydrique qu'éolienne, l'ensablement des bas-fonds	Caractériser l'instabilité des versants dans l'aire « <i>ayi noma</i> », cartographier les risques érosifs.	Volumes de sédiments mobilisés par les koris, taux du risque érosif, vitesse de ravinement
Quels sont les facteurs de la dynamique actuelle ?	L'instabilité des versants est liée au climat, à la pression démographique et la nature des formations superficielles	Analyser l'évolution de l'occupation du sol, suivre l'évolution de la pluviométrie et étudier les caractéristiques des formations superficielles	Taux d'évolution des unités d'occupation du sol, intensité des pluies, texture des sols, taux de matière organique,
Quels sont les apports en sédiments par états de surface vers le fleuve Niger ?	Les états de surface contribuent différemment à l'ensablement	Étudier le ruissellement et l'érosion sur différents états de surface.	Taux de ruissellement, taux d'érosion
Quels sont les effets des pratiques antiérosives biologiques sur le ruissellement et l'érosion ?	La lutte antiérosive biologique réduit considérablement le ruissellement et les pertes en terre	Étudier l'effet des pratiques antiérosives biologiques sur le ruissellement et l'érosion dans les parcelles expérimentales	Taux de ruissellement, taux d'érosion, le nombre de pluies ruisselantes sur les parcelles aménagées

1.2. Matériels et méthodes

1.2.1. Le suivi des ravines

S'agissant de l'érosion, Bender et Ousseini (2000) ont souligné que l'érosion linéaire par recul de tête de griffe d'érosion est la forme la plus dévastatrice et qu'elle est en général irréversible à moyen terme sans intervention extérieure. Deux types de suivi ont été appliqués :

- le suivi grâce aux repères placés en amont des têtes de ravines ;
- le suivi au GPS qui consiste à relever les coordonnées et à tracer les contours qui permettent par la suite de cartographier l'évolution spatiale des koris. Cette méthode a été appliquée pour suivre l'extension du cône en aval.

1.2.1.1. Le suivi aux repères

Le ravinement est un processus qui se fait de l'aval vers l'amont d'où l'expression d'érosion régressive, responsable de l'allongement et de la ramification des ravines. Il résulte de la dynamique actuelle très active des versants. L'érosion régressive ou recul de ravines est mesurable à l'échelle d'une averse, d'une année ou de plusieurs années. Suivre une ravine aux repères pose d'énormes problèmes. Il faut savoir où placer les repères puisque le recul pouvant être latéral et longitudinal, le nombre de repères à placer (Mietton, 1980). Pour ce faire, nous avons privilégié le sens longitudinal et nos repères sont pour l'essentiel des témoins naturels, notamment des arbres situés en amont de têtes des ravines. Le dispositif mis en œuvre a permis de mesurer uniquement la vitesse de ravinement (cf. Photo 1). Le recul est variable d'une ravine à une autre en fonction des caractéristiques du sol (texture, structure...) et de la pluie (hauteur, intensité).



Photo 1 : Dispositif de mesure de la vitesse de ravinement

Pour une pluie donnée, le recul de tête d'une ravine est exprimé par la formule suivante :

$$R1 = L0 - L1$$

R1 correspond au recul de tête vers l'amont de la ravine pendant la pluie considérée.

L₀ correspond à la distance initiale entre le repère et la tête de la ravine

L₁ correspond à la distance entre le repère et la tête de la ravine après la pluie considérée

Pour n pluies, le recul serait :

$$Rn = L0 - (Ln + Rn - 1)$$

Le recul annuel (R_{an}) peut s'obtenir par la différence des longueurs L₀ (longueur initiale).

L_n (longueur mesurée lors de la dernière pluie de la saison) :

$$Ran = L0 - Ln \text{ ou } Ran = \sum Ri = R1 + R2 + R3 + \dots Rn.$$

Ce type de suivi donne aussi des résultats probants quand il s'agit de la vitesse de ravinement. La photo qui suit montre le recul enregistré au niveau de la ravine T2 lors de l'averse survenue le 5 juillet 2011. Le recul mesuré est de 2,36 m pour une pluie de 50,5 m. la distance entre l'arbre témoin (repère naturel) est passée de 32,36 à 30 m (photo 2).



Photo 2 : Recul de tête de la ravine engendré par la pluie du 5 juillet 2011

1.2.1.2. Le suivi au GPS

Le suivi au GPS concerne le suivi du ravinement du bassin versant du kori Tyala notamment dans sa partie amont mais aussi dans sa partie aval (au niveau du cône). Ce protocole est mis en place à défaut d'installer une station de mesure (parcelles d'érosion) du fait de l'éloignement de ce site par rapport au site équipé mais surtout faute de moyens financiers nous permettant de faire le relevé après chaque pluie. Par la suite, nous avons laissé tomber ce type de suivi compte tenu des nombreuses ramifications du réseau difficiles à suivre. Enfin, grâce à ce suivi nous avons relevé le contour du cône de déjection du kori Tyala.

1.2.2. Suivi de l'hydrodynamique sédimentaire des cônes de déjection

La dynamique hydro-sédimentaire de cônes s'est fait par un levé topographique au théodolite (cf. photo3). Il a permis de produire des modèles numériques de terrain des cônes de déjection et de suivre leur évolution quand on sait que ces formes alluviales sont des zones de transit des sédiments. Deux séries de mesure ont été menées avant et après la campagne hydrologique 2011. La méthode par rayonnement a été utilisée. Celle-ci consiste à installer une station à partir de laquelle, divers points sont levés.

1.2.3. Cubage du cône du kori Tyala

Le principe de l'expérimentation est de mesurer l'épaisseur du dépôt alluvial au niveau du cône du kori Tyala afin d'estimer le volume des sédiments transportés et déposés à sa surface. Le sondage se fait en application d'une méthode simple qui consiste à creuser des fosses (cf. photo 3) à différents points de la surface à cuber c'est-à-dire la surface du cône. La surface du cône a ainsi été recouverte par un maillage de fosses qui ont permis de mesurer, sur un total de 48 points, l'épaisseur des alluvions récentes. Celles-ci se distinguent par la présence des tâches argileuses dans le profil de la fosse à chaque point de mesure. Pour chacune des fosses, les coordonnées ainsi que l'épaisseur des alluvions sont systématiquement relevées. Ces données sont par la suite intégrées et traitées dans le logiciel surfur 8.



Photo 3 : Sondage de l'épaisseur des alluvions récentes sur la surface du cône du kori Tyala. Il se fait en creusant des fosses en différents points de la surface du cône et a permis par la suite d'estimer le volume des alluvions à la surface du cône.

1.2.4. Protocole de suivi de la pluviométrie

Dans le souci de suivre la pluviométrie, six (6) pluviomètres à lecture directe (d'une contenance maximale de 150 mm) ont été utilisés. Sur le site de mesure du ruissellement et de l'érosion a été installé un pluviographe (photo 4) à auget basculant muni d'un enregistreur automatique « Hobo » réglé à un basculement pour chaque 0.5 mm de pluie. Ce pluviographe sert à évaluer les courbes intensités-durées des pluies. Le dispositif expérimental est réparti sur deux bassins versants tributaires du Goroubi et dont la dynamique nous semble représentative de l'ensemble de l'aire « *ayi noma* ». Trois (3) sont installés le long du kori « gorou izé » selon une disposition médiane et aval. Un autre au village de Dyabou et les deux autres le long du kori de Tyala notamment dans les parties amont et médiane (photo 5). Pour éviter tout vandalisme, aucun pluviomètre n'a été installé dans la partie aval. La figure 2 illustre la répartition des installations (pluviomètres, pluviographe, parcelles, d'érosion) dans les deux bassins versants, ainsi le site de prélèvement des échantillons pour l'estimation des matières en suspension dans le Goroubi.



Photo 4 : Pluviographe installé non loin des parcelles expérimentales : il informe sur les caractéristiques (durée et intensité) des averses.



Photo 5 : Pluviomètre à lecture directe installé dans la partie amont du kori Tyala

L'objectif ici est de suivre l'évolution des précipitations afin d'avoir une série de données pluviométriques et à plus grande échelle, afin de mettre en évidence le rôle hydro-érosif des pluies exceptionnelles et la dynamique actuelle des paysages.

1.2.5. Protocole de suivi du ruissellement et de l'érosion sur parcelles expérimentales

La mise en place du dispositif expérimental (figure 2) s'inspire des méthodes utilisées dans les études antérieures, des chercheurs pédologues, agronomes mais aussi hydrologues et géographes. Il s'agit des Américains (Wischmeier et Smith 1960) ayant travaillé sur des milliers de parcelles, des chercheurs de l'ORSTOM Roose (1978), et bien d'autres Mietton (1980), Heusch (1970), Bouzou Moussa (1988),

C'est à partir de ces études que Wischmeier et Smith (1978) ont mis au point un modèle de prévision de perte en terre. Ce modèle s'est progressivement étendu à l'ensemble du monde et consiste en l'installation de parcelles recevant différents traitements. Ce sont des parcelles standard clôturées sur tous les côtés avec généralement une surface de 100 à 200 m² (20 à 25 m de longueur et un optimum de 22,2 m et 4 à 8 m de largeur).

1.2.5.1. Les parcelles d'érosion et les fûts

Toutes les parcelles de 10 m² sont situées sur le glacis dans la partie médiane du bassin versant du "Gorou Izé". Elles sont installées sur différents états de surface (croûte d'érosion, croûte gravillonnaire et champs de mil) qui nous paraissent les plus représentatifs à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ». Elles ont des pentes homogènes et comparables. Au cours de la première année de mesure (2009), pour chaque état de surface, a été installé un couple de parcelles dont une parcelle avec traitement. En 2010, un deuxième couple de parcelles a été installé tel que préconisée par Nouvelot (1993). A côté de ces parcelles, il y en a une 9^{ème} qui est une parcelle nue ou parcelle de type Wischmeier installée sur la croûte d'érosion. Cette parcelle est sarclée après chaque ruisselante (Cf. photo 6).

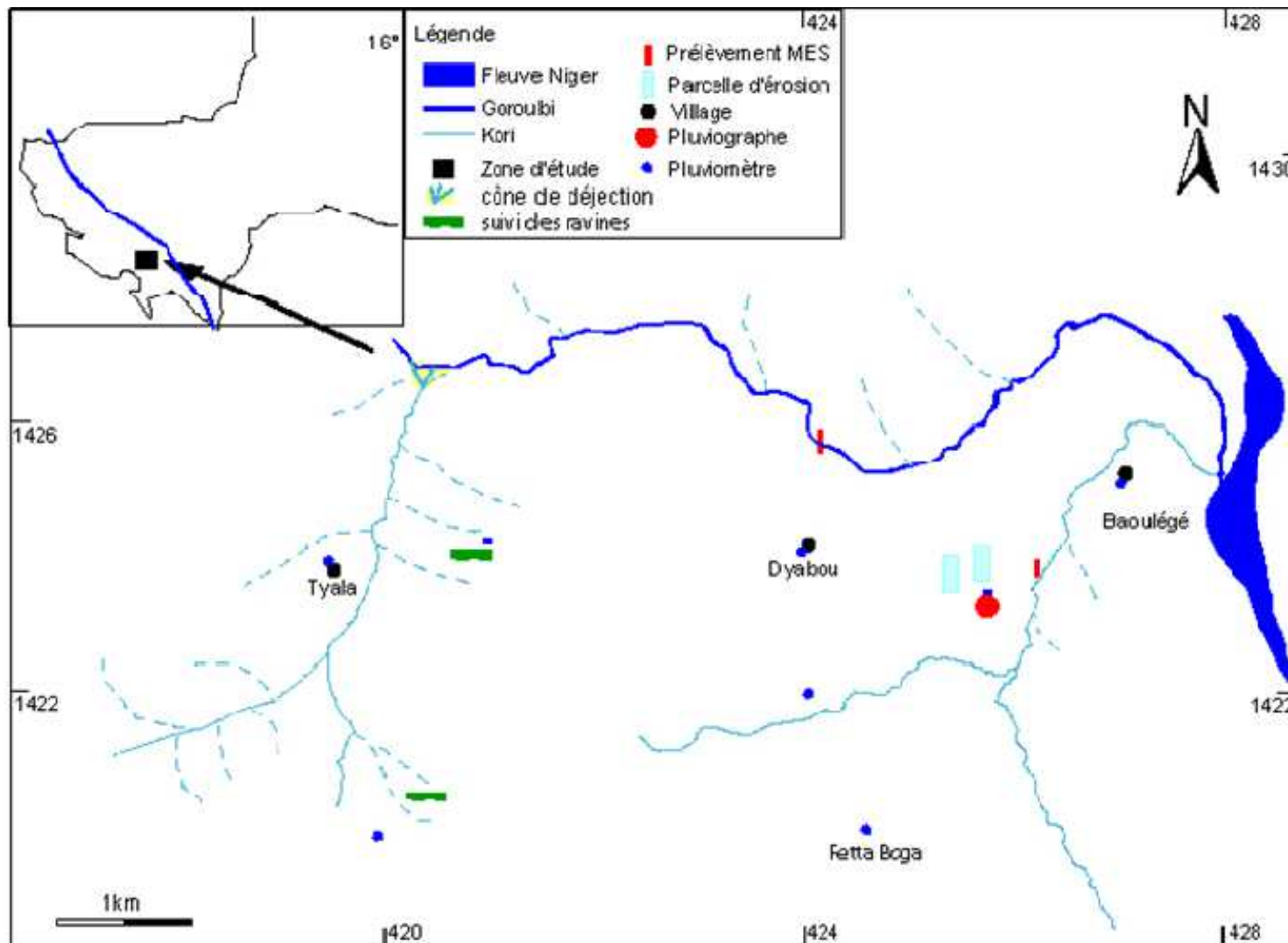


Figure 2: Localisation des dispositifs de mesure



Photo 6 : Parcelle nue type Wischmeier travaillée juste après la pluie du 31/08/2009

Les parcelles sont bordées par un muret en ciment afin de l'isoler des apports extérieurs. Les eaux de ruissellement sont ainsi collectées dans une gouttière appelée goulotte, placée en aval des parcelles. Celles-là sont par la suite évacuées vers un système de stockage composé des fûts à l'aide d'un tuyau PVC (63 mm de diamètre).

Les fûts ont une capacité de 200 litres et sont montés en série (deux pour le champ de mil et quatre pour la croûte d'érosion) de façon à ce qu'en cas de grosse averse, le volume d'eau ruisselé qui déborde soit recueilli dans le deuxième fût et ainsi de suite.

- Deux fûts montés en série ont été utilisés pour les parcelles sur champ de mil (photo 7).
- Les parcelles sur croûte d'érosion ainsi que la parcelle dite de Wischmeier ont fonctionné la première année de mesure avec trois (3) fûts ; la seconde année un quatrième fût a été ajouté à la parcelle Croûte d'érosion témoin et celle aménagée, car la première année une pluie de 68 mm a provoqué un débordement et n'a pu être utilisée.
- Inversement, sur les plages nues du plateau, deux petites parcelles d'un mètre carré (1 m²) ont été installées en 2010 avec comme collecteur un demi fût (voir photo 8).



Photo 7 : Parcelle mil au stade de tallage



Photo 8 : Parcelles de 1 m² installées sur les croûtes gravillonnaires du sommet du plateau. Les fûts sont coupés de moitié du fait de la difficulté à creuser les fosses compte tenu de la dalle de cuirasse se trouvant sur un sol gravillonnaire mince environ 20 cm d'épaisseur.

1.2.5.2. Le traitement des parcelles

Le traitement a consisté à mettre sur pied une bande enherbée à base de *Andropogon gayanus* (une espèce locale qui se régénère facilement) (photo 9), le choix de l'espèce a été guidé par les raisons suivantes : la régénération rapide de part sa vitesse de croissance et de multiplication ; mais aussi et surtout son importance capitale pour les paysans qui en font plusieurs usages. Elle est utilisée pour la clôture de maisons et la confection des cases ou comme fourrage. L'objectif recherché en utilisant cette espèce, est de tester l'effet de la bande enherbée sur le ruissellement et l'érosion sur le plateau sableux de Dyabou afin de permettre aux paysans de se l'approprier. La bande enherbée est placée dans la partie aval de la parcelle à quelques centimètres (cm) de la gouttière. Le traitement a consisté aussi en un travail continu sur la parcelle dite de Wischmeier. Il s'est agi de labourer après chaque pluie ruisselante afin de détruire la pellicule de battance et maintenir son état de surface toujours nu. Ainsi, pour casser la croûte, nous avons utilisé le même outil de travail que le paysan, c'est-à-dire la hilaire (cf. photo 6).



Photo 9 : Parcelle croûte d'érosion avec traitement (bande enherbée d'*Andropogon gayanus* placée en aval de la parcelle dans le but de réduire les taux de ruissellement et d'érosion)

Le tableau 2 précise la répartition des parcelles et leurs caractéristiques en fonction des états de surface ou d'occupation des sols de la première à la dernière année de mesure.

Tableau 2 : Répartition des parcelles en fonction des états de surface ou d'occupation des sols et de leur superficie.

Parcelles et état de surface	Dimension (m)	Surface (m ²)	Pente (%)	Nombre
Parcelle croûte d'érosion	5x2	10	3,65	4 dont 2 avec traitement
Parcelle sur le champ de mil	5x2	10	6,46	4 dont 2 avec traitement
Parcelle nue type Wischmeier sur croûte d'érosion	5x2	10	3.65	1
croûte gravillonnaire sur sommet du plateau	1x1	1	0,95	2

1.2.5.3.Méthodes de prélèvement sur les parcelles expérimentales

Sachant que le ruissellement et l'érosion sont estimés à partir des eaux recueillies en aval dans les fûts, toutes les pluies ayant ruisselé ont fait l'objet d'un prélèvement qui a nécessité sept opérations.

- Relever la hauteur de pluie enregistrée au pluviomètre installé à côté de parcelles,
- Mesurer la hauteur (cm) d'eau contenue dans les fûts avec un mètre métallique.
- Agiter sérieusement le contenu de la cuve jusqu'à ce que tous les dépôts soient mélangés ; cela permet de pouvoir prélever les différentes granulométries de sédiments déposés.
- Prélever deux (2) bidons juste près l'agitation ; ces bidons doivent au moins être numérotés afin de pouvoir distinguer plus tard les échantillons.
- Vider tout le contenu des fûts.
- Essuyer bien les fûts.
- Refermer hermétiquement les fûts.

À l'issue de toute cette procédure, une fiche dite « fiche de ruissellement-érosion » est remplie après chaque pluie (tableau 3). Ainsi, l'estimation des taux de ruissellement et d'érosion est sans doute basée sur la qualité des informations contenues dans cette fiche. Le nombre de cellules remplies dans la colonne 3 (Hauteur d'eau mesurée dans les fûts) est fonction du nombre de fûts que comporte une parcelle.

Tableau 3 : Fiche de relevé ruissellement-érosion

Date	Hauteur (mm)	Hauteur d'eau mesurée dans les fûts (cm)				Numéros des échantillons		Observation
22.06.2010	28	10.5				38	41	Fût fermé
18.08.2010	64.5	72	61			50	55	Fût fermé
20.08.2009	68	75.4	75	56		130	131	Fût fermé
18.08.2010	64.5	77.5	75	40	0	72	74	Fût fermé

Par contre, si au niveau de la cellule d'observation, il est marqué fût ouvert, lors du calcul du coefficient de ruissellement il faut enlever la quantité d'eau tombée directement dans le fût.

1.2.5.4.Méthode de calcul du taux de ruissellement

Les informations recueillies dans la fiche de ruissellement-érosion permettent d'estimer pour chaque événement pluvieux d'une part le taux de ruissellement et d'autre part le taux d'érosion. Sachant que le refus d'infiltration est recueilli dans les fûts en aval de la parcelle, pour chaque averse ruisselante, le volume d'eau ruisselé est évalué en mesurant la hauteur recueillie dans les fûts. Il correspond au rapport entre la somme des lames d'eau ruisselée et la hauteur totale de la pluie. La lame ruisselée pour une pluie donnée L_r correspond au volume ruisselé par la surface de la parcelle.

$$L_r = V/S$$

V (m³) volume total d'eau ruisselée dans la parcelle et S (m²) correspond à la surface de la parcelle.

Le coefficient de ruissellement noté Kr exprimé en pourcentage représente la proportion de la pluie qui ne s'est pas infiltrée dans le sol.

$$Kr = (Lr/P)*100$$

Lr correspond à la lame d'eau ruisselée et P à la pluie relevé au pluviomètre.

Pour une meilleure lisibilité des résultats, nous avons défini le ruissellement par le coefficient de ruissellement annuel moyen (Kram %), ainsi que le coefficient de ruissellement par averse.

1.2.5.5.Méthode de calcul du taux d'érosion

1.2.5.5.1. Traitement des échantillons au laboratoire

Les échantillons prélevés sur le terrain sont traités au laboratoire afin d'estimer le poids des matières solides érodées et transportées par les eaux de ruissellement. L'analyse des échantillons a lieu au laboratoire de géomorphologie du Département de Géographie. Les échantillons ont été décantés, le dépôt de sédiments est par la suite mis dans un bécher en aluminium qui doit passer à l'étuve (réglée à 105° c) pendant vingt quatre heures (24) pour séchage. Ensuite le sédiment est pesé et cette masse correspond à la concentration par litre pour chacun des échantillons (C/l).

1.2.5.5.2. Le taux d'érosion

Comme précisé plus haut, les informations notées sur la fiche ruissellement-érosion (numéros des échantillons) permettent après le traitement au laboratoire d'estimer le taux d'érosion pluie par pluie et annuellement. Les pertes en terre correspondent au poids de sédiment décapé et recueilli dans les fûts. Elles concernent aussi bien les charges de fond que les matières en suspension. En effet, en échantillonnant, l'eau contenue dans les fûts

est d'abord homogénéisée. Les pertes en terre par pluie ont été calculées par pesée des sédiments contenus dans les bidons prélevés après la décantation et le séchage. Le poids total de sédiments est obtenu en rapportant le poids recueilli dans le bidon au volume d'eau total d'eau ruisselé. Les pertes en terre annuelles correspondent ainsi à la somme des poids totaux de sédiments des différentes pluies ayant provoqué une érosion. Ces pertes en terre concernent à la fois l'action combinée de la pluie et du ruissellement.

1.2.6. Mesure de turbidité dans le Goroubi

La mesure de turbidité consiste à caractériser le flux de Matières en Suspension (MES) dans le Goroubi. Elle m'a permis de mettre en évidence la variabilité de flux des matières en suspension à l'échelle journalière et en fonction de l'événement pluvieux. Cependant, la connaissance des flux nécessite la mise en place d'un dispositif expérimental de haute précision : un turbidimètre calé à un pas de temps régulier (Poirel, 2004) ; elle nécessite aussi d'effectuer des mesures de concentration des MES, en continu, événementielles ou ponctuelles dans le temps (Fiandino, 2004) mais aussi les données sur les débits. Faute d'avoir ce dispositif et les débits à la station de Diongoré, nous nous sommes contentés des prélèvements journaliers et ponctuels à l'aide de bidon d'un litre. Ainsi, des échantillons d'un litre ont été prélevés manuellement en amont du pont-barrage pendant les deux premières années de ce travail.

1.2.7. Cartographie : dynamique d'occupation des sols, modélisation et spatialisation

Cette partie de la méthodologie concerne la cartographie de l'occupation des sols et la spatialisation des risques érosifs qui consiste en l'intégration et en la représentation des informations cartographiques et descriptives des composantes du milieu dans un SIG afin de spatialiser les risques érosifs. Nous avons voulu utiliser une situation d'avant le déclassement de cette zone afin de mieux comprendre l'évolution de l'occupation des sols. Mais faute de disposer l'ensemble des photographies aériennes couvrant la zone d'étude, l'analyse diachronique de l'occupation des sols a concerné trois jugées importantes. Il s'agit de deux images HVR de spot (prises le 23-02-1987 et le 26-09-2010 avec une résolution 10

m) et une image Landsat du 9 novembre 1999 résolution 28 m prise le 9-11-1999. En outre, la cartographie a consisté à la modélisation et la spatialisation de risques érosifs en utilisant le modèle de Wischmeier. Il s'agit de l'intégration des différents facteurs du modèle empirique de Wischmeier dans un SIG.

1.2.7.1.L'interprétation des images satellitaires

Cette étape procède d'une part de la conception qui consiste à inventorier les éléments ou les unités que l'on désire cartographier. Ces unités cartographiques sont par la suite hiérarchisées suivant des classes thématiques. La classification est faite en se basant sur la Nomenclature d'Occupation des Sols du Niger (République du Niger, Ministère de l'environnement et de la lutte contre la désertification, 2001). D'autre part, l'interprétation intègre l'identification qui suppose la discrimination et la distinction des unités à cartographier. Elle se base pour l'essentiel sur les caractéristiques des objets (leur forme, leur texture, leur tonalité), du sol, de la végétation et de l'utilisation agricole. En fonction de tous ces critères, des thèmes ont été identifiés :

- la végétation reconnaissable sur les images satellitaires fausse couleur par une gamme de couleur rougeâtre caractéristique de la réponse spectrale des végétaux dans le proche infrarouge. Plusieurs classes ont été identifiées en fonction des caractéristiques citées haut et de la densité de recouvrement (savane, broussailles, cordons ripicoles, ...),
- les zones de culture (cultures pluviales, jachères) identifiables par leur forme surtout géométrique,
- l'hydrographie (fleuve, koris, mares, ravines) reconnaissable par leur couleur et leur forme linéaire,
- les établissements humains (villages, hameaux) caractérisés par une couleur composite allant du rouge foncé au marron du fait de la présence d'arbres. Elle s'identifie par la présence d'auréoles de zones de culture et la convergence de divers voies de communication (routes, pistes rurales, etc.),

- les voies de communication (route non revêtue) de forme linéaire et mince, assurent la liaison entre plusieurs gros centres ou villages, elles apparaissent sous une couleur gris verdâtre (latérite) ou blanchâtre (routes rurales),
- les sols nus de forme très variable (linéaire, sinusoïdale, en bloc etc.) apparaissent généralement en vert foncé sur les bordures de plateaux dénudés sur les talus ou partout ailleurs sous forme de larges bombements (terrains rocheux) ou alors de couleur blanchâtre lisse localisés entre les talus et les bas fonds (glacis érodés) ou sur les plateaux (vastes surfaces dénudées).

L'agencement de différents thèmes permet d'avoir des cartes d'occupation des sols à l'aide des données spatiales. La cartographie de l'occupation des sols est basée essentiellement sur une analyse diachronique de l'évolution de l'occupation des sols et donc de l'évolution des états de surface. Ainsi, le taux d'évolution des différentes unités d'occupation des sols ont été calculés ce qui a permis de déceler le comportement (progression ou recul) de chaque élément de l'occupation des sols entre les intervalles de temps considérés (Wafo Tabopda et Huynh 2009). Le taux d'évolution d'une unité d'occupation donnée entre deux années A et B correspond à :

$$T_x = [((S_b - S_a) / S_a) * 100] / I$$

S_a est la superficie en année a ; S_b est la superficie en année b, I est le nombre d'années entre a et b.

Ceci permet par la suite la mise en évidence de l'influence des changements d'usage des sols sur la dynamique actuelle et donc sur les risques érosifs.

1.2.7.2. La Modélisation et la spatialisation

La modélisation et la cartographie des risques érosifs ont nécessité l'évaluation et l'intégration dans le SIG des différents facteurs de la RUSLE. Ce modèle a été établi d'après les travaux de Wischmeir et Smith (1965) (Morschel et fox, 2004) et qui intègre l'érosion linéaire. C'est un modèle empirique dans lequel, l'érosion est une fonction

multiplicatrice de cinq facteurs qui contrôle l'érosion hydrique et s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe (Sadiki 2004). Il s'agit de l'agressivité des pluies, de l'érodibilité des sols, de la topographie (inclinaison et longueur de pente), de l'occupation des sols et leur protection par les pratiques antiérosives.

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

A = taux de perte en sol (t.ha-1.an-1), R = érosivité de la pluie, K = érodibilité du sol, LS= facteur topographique, C= facteur de protection du sol par la couverture végétale et P= la protection du sol par les pratiques agricoles.

La cartographie des risques nécessite l'utilisation de ces données.

Notre démarche repose donc sur l'utilisation des données de la télédétection pour la connaissance spatialisée des facteurs de différenciation de l'érosion (occupation du sol, topographie, érodibilité des sols, ...) ainsi que l'utilisation d'un SIG pour l'analyse et la modélisation des processus d'érosion. La figure 3 qui suit présente la démarche méthodologique adoptée en s'inspirant des études menées par El Garouani et *al.* (2008) Bonn (1998).

1. La RUSLE s'appuie en premier lieu sur les conditions climatiques responsables de l'érosion (Morschel et Fox, 2004). Le climat est un facteur de l'érosion d'une importance extrême en zone tropicale Fournier (1960-1962). Le facteur R intègre dans son calcul l'intensité. Cela nécessite la connaissance de la pluie totale et des intensités maximales en 30 mn sur une période de 30 ans. Cependant, il est difficile de posséder les données sur une aussi longue série, et c'est pourquoi des mesures alternatives ont été proposées par divers auteurs (Roose, 1994 et 1979 ; Renard et Freimund, 1994, ...).

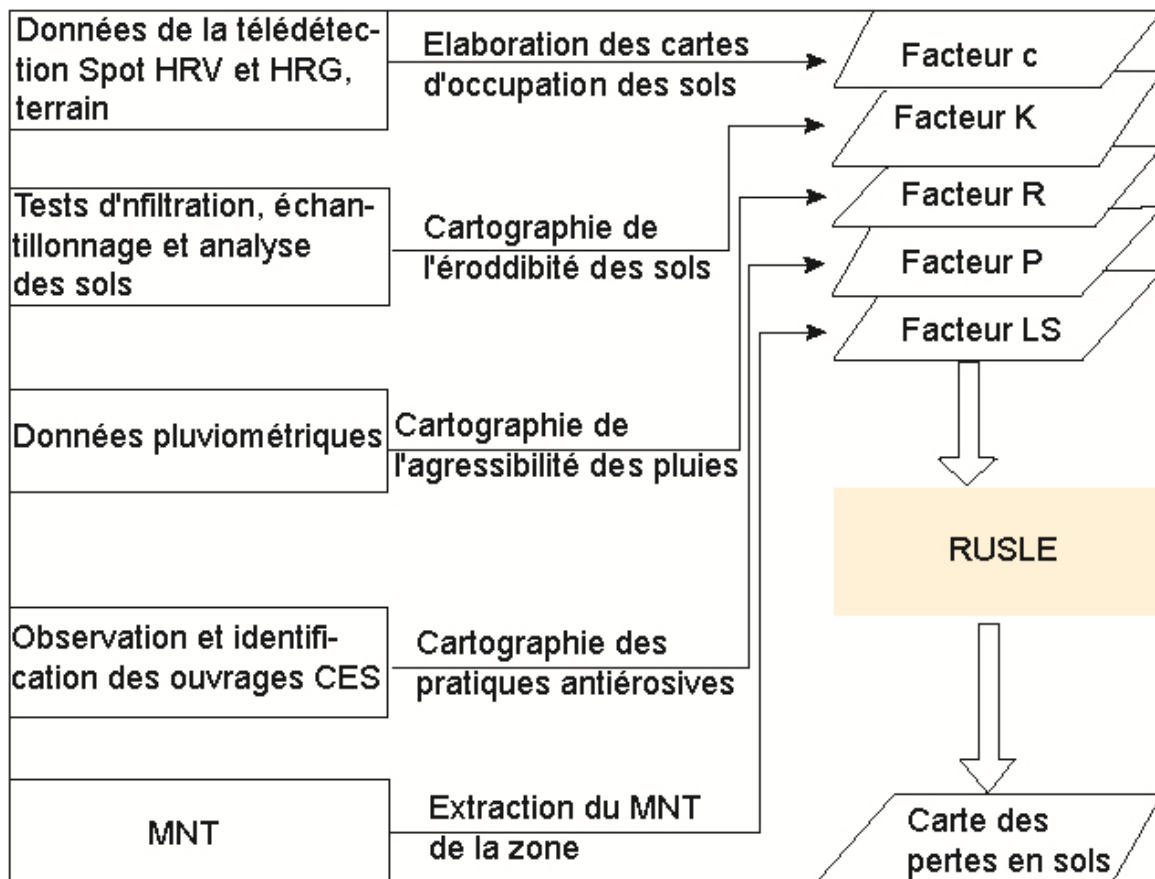


Figure 3: Etapes suivies de la cartographie du risque érosif

2. Le facteur K représente l'érodibilité des sols qui est la propriété spécifique du sol qui peut être évaluée quantitativement comme la vulnérabilité du sol à l'érosion dans des circonstances précises (Lozet et Mathieu, 1986, cité par Diallo 2000). Selon Roose, l'érodibilité d'un sol en tant que matériau plus ou moins cohérent est sa résistance à deux sources d'énergie, d'une part la battance des gouttes à la surface et d'autre part l'entaille du ruissellement entre les mottes, dans les griffes ou les rigoles. Elle est considérée comme une caractéristique intrinsèque du sol liée à ses propriétés chimiques et physiques, elle est susceptible d'évoluer au cours du temps en fonction des traitements qu'on fait subir au sol (Roose, 1977). Ce facteur dépend de la texture, du taux de la matière organique, de la perméabilité et de la structure du profil pédologiques. Wischmeier et Smith (1978) ont déterminé ce facteur par la formule suivante :

$$K = E/R*LS*C*P^{2,24}$$

La détermination du facteur K sur le terrain a nécessité une série de tests d'infiltration sur divers types de formations superficielles.

$$100K = 2,1 * M^{1,14} (10^{-4})(12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

M est un paramètre de texture et s'obtient par le calcul :

$$M = (\text{pourcentage de limons} + \text{pourcentage de sables}) * (100 - \text{pourcentage d'argiles}).$$

MO est le taux de matière organique (en %), b est la structure du sol et varie de 1 pour les sols compacts à 4 pour les sols très aérés, c est la perméabilité du sol qui varie de 1 pour les sols à bonne capacité d'infiltration à 6 pour les sols les moins perméables (Fox et Morschel, 2004).

3. Le facteur topographique : l'effet du relief est caractérisé par la longueur de la pente et l'inclinaison. Le calcul du facteur topographique par le modèle RUSLE est géré à partir du modèle numérique du terrain pas de 30 m. Ce calcul est effectué à l'aide du logiciel Idrisi. Ce dernier utilise le MNT (Module Numérique de Terrain) pour calculer de degré de la pente, l'orientation et la longueur cumulative de la pente et enfin calculer le facteur LS proprement dit.
4. C = facteur de protection du sol par la couverture végétale, constitue un facteur important qui contrôle le risque d'érosion des sols. Il permet de tenir compte du fait que les pluies agissent plus sur un sol nu que sur un sol couvert³. Il est défini comme un ratio de la perte en sol sur des terrains cultivés sous des conditions spécifiques par rapport à la perte en sol correspondante sur un terrain en jachère (Wischmeier et Smith, 1978, cité par El Garouani et *al.*, 2008).

La répartition spatiale de ce paramètre est déduite de la cartographie multi dates d'occupation des sols. Nous nous sommes inspirés des études d'El Garouani et *al.* (2008), Cheikha Lilia et Moncef (2008) et Jabbar Mushtak et Xiaoling (2005), Morschel et Fox (2004), Roose (1994, 1977),

³ <http://www.bf.refer.org/toure/pageweb/erohydry.htm>.

<http://www.bf.refer.org/toure/p.web/erohydriy.htm>) pour attribuer les différents au facteur C.

5. Facteur P, exprimant la protection du sol par les pratiques agricoles : il tient compte des pratiques purement antiérosives comme le labour en courbe de niveau ou le buttage, ou le billonnage en courbe de niveau. Il varie entre 1 sur un sol nu sans aucun aménagement antiérosif à 0,1 environ, lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage cloisonné (Roose, 1996 cité par El Garouani et *al.* 2008). Dans la zone « *ayi noma* », quelques travaux de conservation des eaux et des sols ont été réalisés entre 2003 et 2011 dont les principaux sont les demi-lunes et des banquettes et les sur dans les secteurs de Dyabou et Baoulégé (photos 10 et 11). Le contour de ces aménagements a été relevé à l'aide d'un GPS afin de spatialiser le facteur de pratiques antiérosives.



Photos 10 et 11 : Ouvrages antiérosifs : à gauche demi-lunes et à droite banquettes sur le plateau de Dyabou

Appliqué à des profils topographiques, ce modèle permet d'estimer l'érosion en nappe à l'échelle des parcelles, il est ainsi revu en RUSLE afin de prendre en compte dans le calcul de l'érosion le processus de ravinement.

Les différents paramètres ont été croisés dans Idrisi Andes.

1.2.7.3.Limites et intérêt du modèle *RUSLE*

1.2.7.3.1. Les limites du modèle *RUSLE*

Parmi les limites de ce modèle on peut citer entre autres la non prise en compte des interactions entre les différents facteurs de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers 0 (Auzet, 1987 ; Roose, 1994). Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente. L'inaptitude à estimer les pertes en terre sur une courte période (saison ou épisode pluvieux isolé) (Mounirou, inédit). L'équation empirique exige l'exploitation de nombreux résultats. Il est donc nécessaire, pour fixer les valeurs des différents facteurs, de posséder un grand nombre de résultats expérimentaux (Roose, 1994). Au tout début de l'utilisation de cette équation, les résultats obtenus sur parcelles expérimentales ne peuvent être transposés sur des vastes surfaces dans le cadre des programmes généraux de lutte contre l'érosion.

1.2.7.3.2. Les intérêts du modèle *RUSLE*

L'équation de Wischmeier permet de juger de l'intérêt des actions à mener en matière de conservation des eaux et des sols et de bien les localiser. En effet, les actions doivent être conçues en et orientées en fonction du degré des risques d'érosion. Selon Roose (1999) pour diminuer l'érosion (A),

- (i) une action peut être menée pour réduire l'indice d'érodibilité (K) en améliorant la structure et la perméabilité par apport de la matière organique. Cette action sera d'une importance capitale surtout que c'est une zone où l'utilisation de la fumure organique est limitée malgré que ce soit une zone pastorale.
- (ii) On peut agir sur le facteur C en faisant en sorte que le sol soit couvert pendant les périodes critiques (fortes pluies).
- (iii) On peut agir sur le facteur P en préconisant des cultures en courbes de niveau ou en bandes alternées.

A ce propos, Roose (1999) pense que c'est seulement lorsqu'on aura épuisé ces trois possibilités de lutte qu'il sera nécessaire d'agir sur les facteurs de pente, par des travaux antiérosifs appropriés.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

La zone objet de cette étude se situe dans la partie aval du bassin de goroubi, sur le plateau sableux de Dyabou compris entre 2°15' et 2°25' de longitude Est, et 12°45' et 12°55' de latitude Nord. Elle constitue une entité marquée par une anthropisation croissante. Avec une géologie formée du socle et de sa couverture sédimentaire, et un climat sahélien, cette zone connaît une pression anthropique à l'origine d'une rupture d'équilibre de son milieu biophysique. Avec des formations superficielles à dominance sableuses, il constitue un milieu propice au développement des diverses activités érosives. Dans un tel contexte, il est indispensable avant d'entamer l'étude de la dynamique actuelle de dresser un bref aperçu des composantes du milieu physique. C'est dans cette optique que ce chapitre qui porte sur la description du cadre de l'étude s'articule autour de deux points. Le premier présente le cadre physique, tandis que le second est consacré à la dynamique de la population dans la commune rurale de Tamou.

2.1. Les aspects physiques

2.1.1. Le Contexte géographique

Située dans la partie méridionale du Niger, la commune rurale de Tamou correspond à la partie sud du département de Say, Elle est limitée au Nord par la commune urbaine de Say, au Sud par le Burkina Faso et le Bénin, à l'Ouest par la commune rurale de Guéladjo, et à l'Est par la commune rurale de Kirtachi (département de Kollo) (cf. figure 4). Elle couvre une superficie de 2832 km² et représente 25 % de la superficie totale du département de Say. D'un point de vue bioclimatique, Elle abrite la réserve de biosphère du W qui représente environ 80 % de la biodiversité et dispose d'un climat favorable au développement des diverses activités rurales. La figure 5 montre la localisation de la zone d'étude au sein de la commune rurale de Tamou.

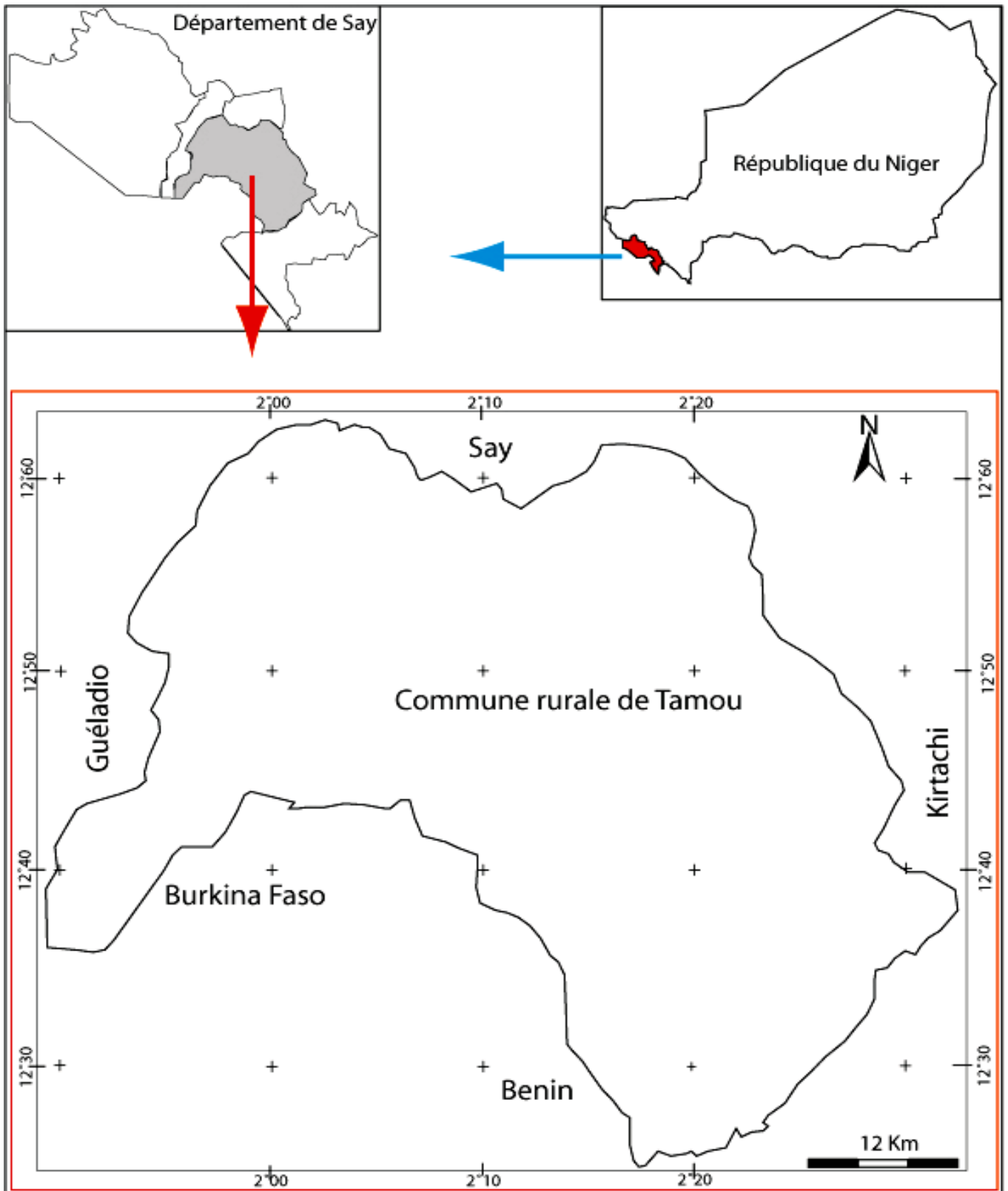


Figure 4 : Localisation de la commune rurale de Tamou (Source Département de Géographie modifié)

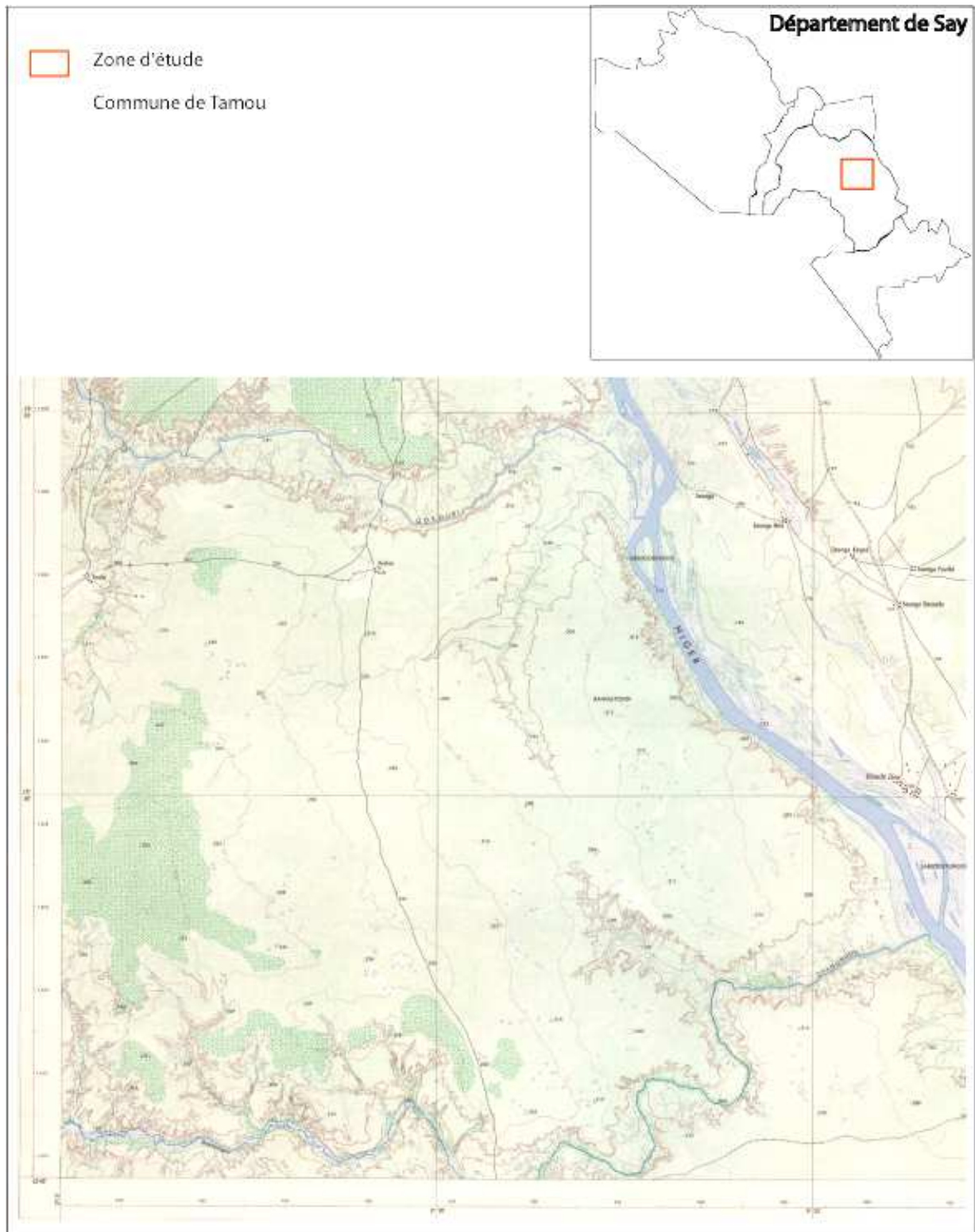


Figure 5: localisation de la zone d'étude

Source : Extrait de la carte topographique au 1 : 50.000 feuille de Kirtachi 3d (1964).

2.1.2. Contexte climatique

2.1.2.1. La circulation atmosphérique en Afrique de l'ouest

Selon Leroux (1983), la zone intertropicale est un espace encadré au nord et au sud par des zones de hautes pressions atmosphériques à partir desquelles s'organisent les flux atmosphériques à l'origine du climat actuel en Afrique de l'ouest et plus particulièrement le régime pluviométrique au Niger. Le climat est donc influencé par l'activité de deux masses d'air dont le plan de rencontre est appelé front intertropical (FIT). Il s'agit de la masse d'air tropical sec poussé par l'anticyclones des Açores et du Sahara se déplaçant vers le sud et la masse d'air humide provenant de l'Atlantique sous la poussée des anticyclones de Saint Hélène. Morel (1980) présente avec plus de détail le schéma de la circulation atmosphérique générale du Niger (figure 6).

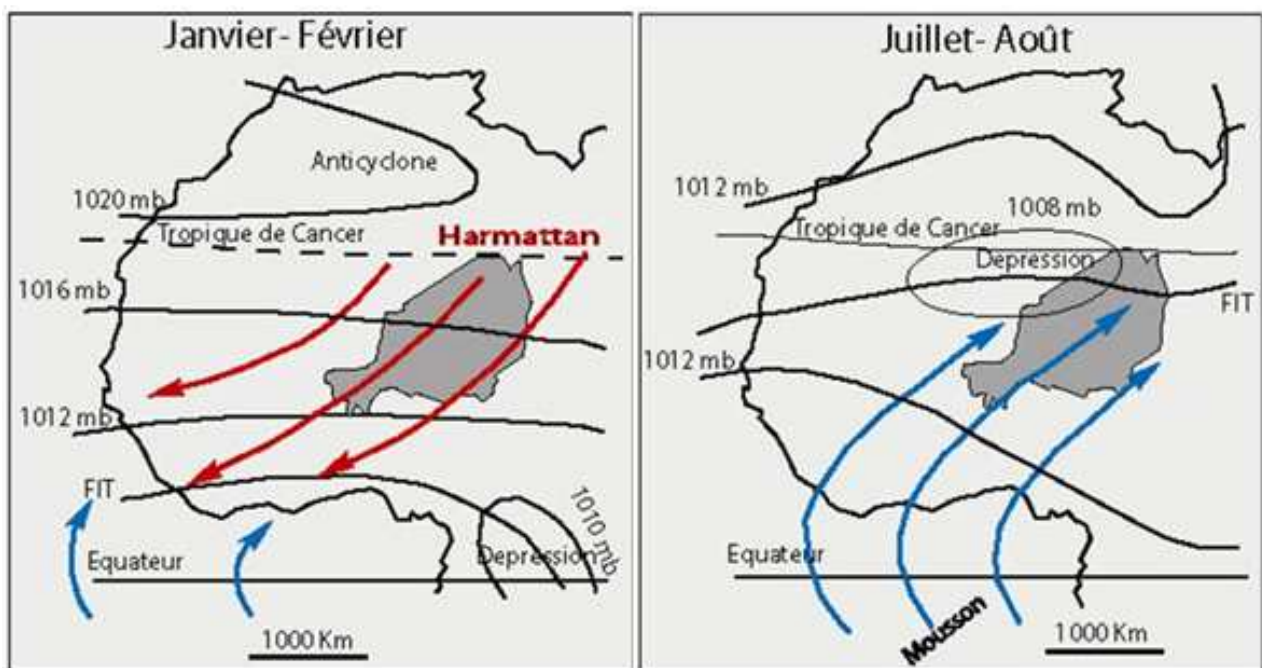


Figure 6: Position saisonnière des masses d'air ; (source : Alain Morel, 1980)

Au Niger, les mouvements de ces masses d'air déterminent l'alternance de deux saisons. La saison est marquée par l'affaiblissement de l'anticyclone de Sainte Hélène

(entre novembre et mai) qui entraîne le retrait de FIT au dessus de l'atlantique : c'est la saison sèche caractérisée par un vent sec et froid qui souffle de nord-est vers le sud-ouest ; il s'agit de l'harmattan. En juin l'inverse se produit par l'affaiblissement des hautes pressions. L'affaiblissement des hautes pressions tropicales de l'hémisphère Nord, permet donc à partir de mai, la pénétration de la mousson. Celle-ci traverse le territoire nigérien seulement en fin de parcours et les pluies qu'elle génère s'amenuisent au fur et à mesure que l'on va vers le nord et l'est du pays. Cette période correspond à la saison des pluies.

2.1.2.2. La pluviométrie dans la zone d'étude

Le climat de la zone d'étude est de type sahélien, et est déterminé par la circulation atmosphérique générale. Il se caractérise par un régime pluviométrique uni-modal contrôlé par la mousson ouest africaine (Nicholson, 1980 ; Hiernaux et Le Houérou, 2006). A partir de 1960, le Sahel a connu des périodes de sécheresses récurrentes dont deux extrêmement sèches : 1972-1974 et 1983-1985 (Le Barbé et Lebel, 1997 ; D'Amato et Lebel, 1998 ; L'Hôte *et al.*, 2002 ; Lebel *et al.*, 2003). Pour mieux illustrer les variations saisonnières de la pluviométrie, nous avons utilisé les données de la station (Say) la plus proche disposant d'une longue série de données. Cette station enregistre en moyenne 572,6 mm de 1960 à 2010. Le climat de cette zone se caractérise par une alternance saisonnière de 6 à 7 mois de saison sèche et 5 à 6 mois de saison de pluies (avec un maximum en août). Cette dernière se caractérise par des pluies de courte durée mais de fortes intensités. Celles-ci peuvent atteindre 130 mm/h en 5 minutes. L'évolution de la pluviométrie au cours de ces dernières années montre une tendance générale à la baisse des précipitations annuelles depuis le début des années 1970 correspondant à l'installation d'une longue série de sécheresses au Sahel. Cependant, à partir l'année 1990, une stabilité, voire une amélioration des cumuls annuels est observée. L'amélioration de la pluviométrie a été marquée par une remontée vers le nord des isohyètes de 1990-2007 (figure 7).

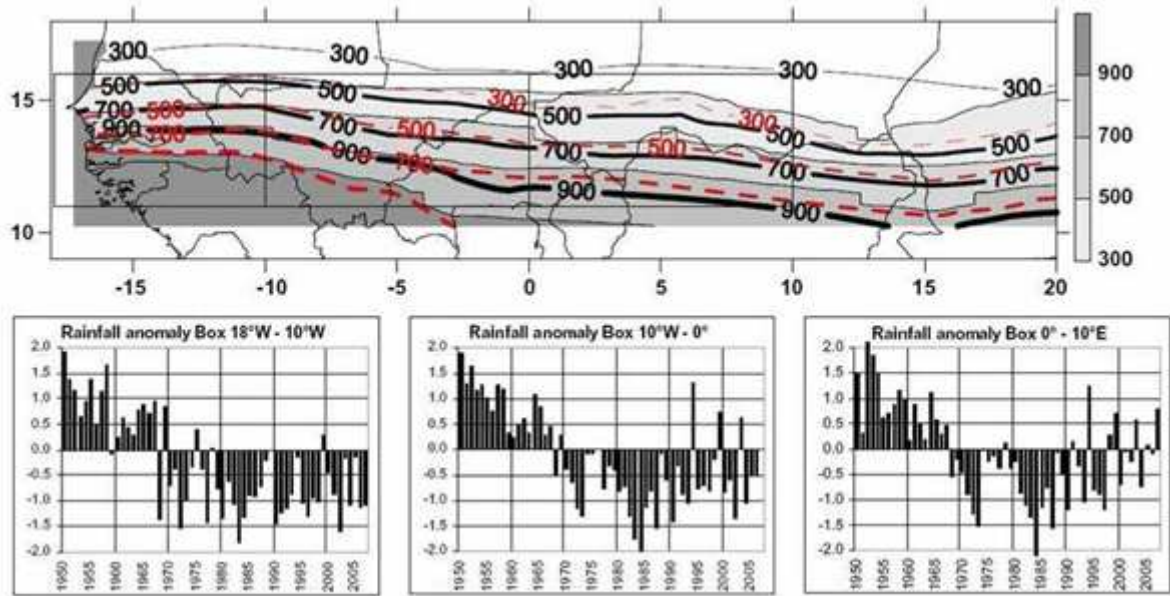


Figure 7 : Evolution des isohyètes et des anomalies pluviométriques au cours des 6 dernières décennies au Sahel (Lebel et Ali, 2009).

Il ressort de l'analyse de la pluviométrie à la station de Say une variabilité interannuelle des précipitations. Lamb (1985) a développé un index pluviométrique régional pour une vingtaine de station en Afrique de l'Ouest ; c'est ainsi qu'il met en évidence une baisse drastique des totaux annuels de précipitations. L'analyse de cet indice pluviométrique, appliqué à cette station (figure 8), a permis de distinguer des phases moyennes à excédentaires (1960-1969, 1974-1979 et 1988-1990), et de phases sèches (1970-1973, 1980-1987). Cela est une caractéristique du climat sur l'ensemble ouest africain (Nicholson, 2001).

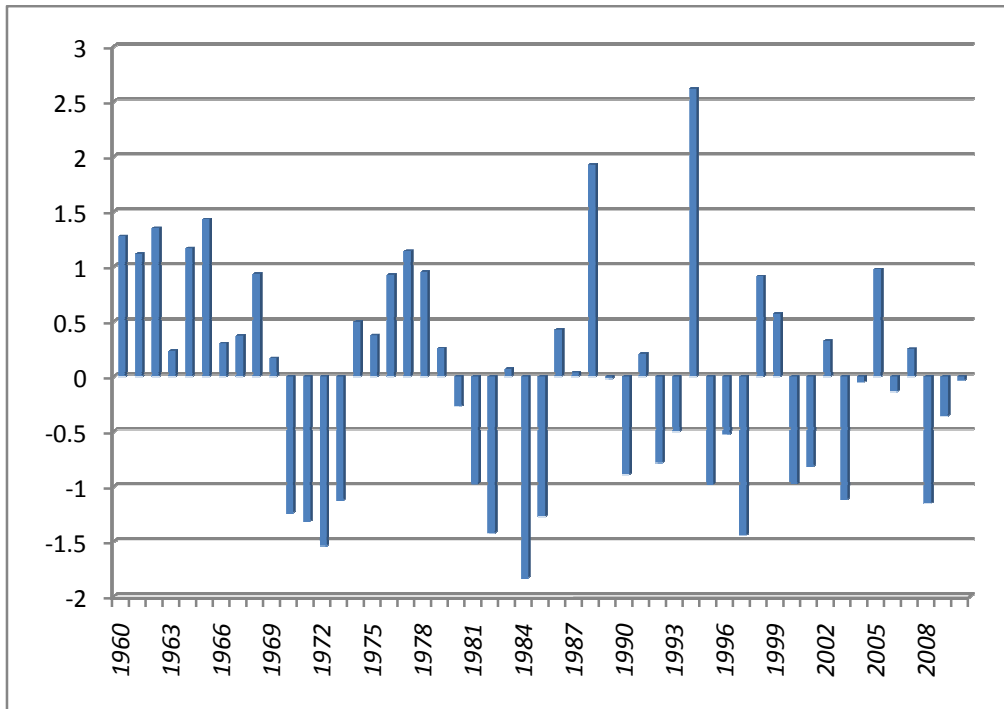


Figure 8 : Évolution des précipitations à Say de 1960 à 2010 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique de Lamb (1985). Source : données DMN complétées

L'application du test de Pettitt pour l'étude de stabilité de la série chronologique de pluviométrie de 1960 à 2010 de la station météorologique de Say (figure 9) a permis de mettre en évidence une rupture significative avec un niveau de probabilité de dépassement de la valeur critique du test de : 0.0827. Cette rupture intervenue en 1969 montre le début de la sécheresse dans le Sud-Ouest nigérien et s'est traduite par une baisse de la pluviométrie d'environ 21 % par rapport à la moyenne de la phase humide 1960-1969. Cela est comparable à la baisse observée à la station de Niamey (24%) depuis le début des années 1970 (Seguis et al. 2003) et sur l'ensemble du pays où la baisse peut atteindre 20-40% depuis 1970 (Atlas AGRHYMET, 1998).

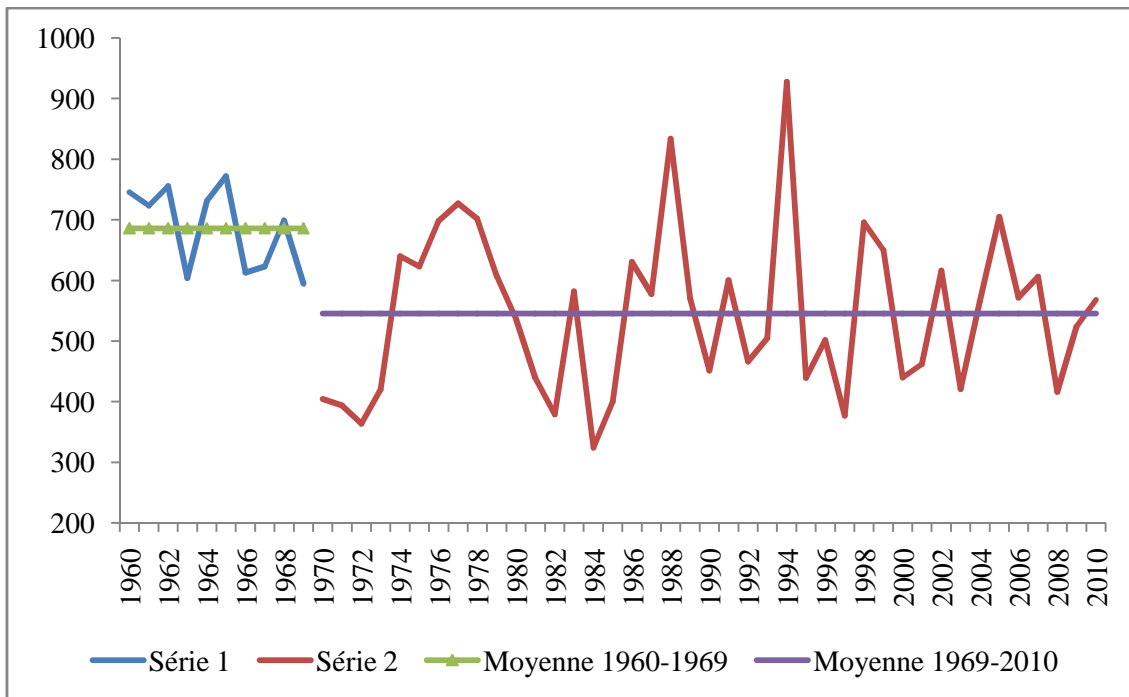


Figure 9: Evolution de la pluviométrie à Say de 1960 à 2010 (Source : données DMN complétées)

Plus au sud, le poste pluviométrique de Tamou a enregistré une moyenne d'environ 600 mm depuis 1981. À l'échelle locale ou interne à notre terrain, un réseau de pluviomètres à lecture directe a été installé. Le cumul annuel atteint jusqu'à plus 600 mm en fonction de l'emplacement du pluviomètre. Cependant, il faut noter qu'à ce niveau certains de nos pluviomètres ont été installés en pleine saison faute d'avoir identifié le releveur à temps. Sur les trois années d'observation 29, 28 et 27 événements ont été enregistrés respectivement en 2009, 2010, et 2011 soit un nombre moyen d'averses de 28 pluies dont 25 % sont supérieures ou égales à 20 mm en 2011, 40.74 % en 2010 et 51.72 % en 2009, L'analyse des données, de ces pluviomètres montre que le climat de cette zone est caractérisé par la prévalence des événements pluvieux supérieurs ou égales à 30 mm ; 27.59 % des événements pluvieux enregistrés en 2009 ont une hauteurs supérieures ou égales à 30 mm 27.59% 2009, 29.63 % en 2010 et 21.43 % en 2011. Cela explique le processus de la morphogenèse actuelle sur les versants du goroubi et en particulier dans les bassins (Tyala et gorou izé).

2.1.3. Contexte géologique

Cette partie propose un bref aperçu sur la structure géologique de la zone d'étude dans la mesure où, la lithologie joue un rôle important d'autant plus qu'elle influence la dynamique actuelle (Descroix, 1994). La zone objet de notre d'étude se trouve sur le socle précambrien du Liptako dont l'histoire géologique est celle du craton ouest africain qui s'est mis en place entre 2.200 et 1.700 millions d'années (Vachette, 1974 cité par Faran Maïga; 1984). Il occupe l'extrémité nord-est du craton ouest africain stabilisé vers 1.8 Ga. Ces formations géologiques se répartissent entre trois ensembles structuraux d'importance inégale (PPML, 1998).

- Le paléo-protérozoïque d'âge birimien le plus largement représenté. Il est constitué des vastes massifs de granitoïdes différenciés qui individualisent des ensembles méta volcano-sédimentaires en trois « sillons » et panneaux plurikilométriques orientés NE-SW.

- Le Néoprotérozoïque d'âge voltaïen en discordance majeure sur le birimien est constitué d'occurrences de grès-quartzites dans la vallée du Niger près de Niamey et au sud de Say, d'argilites et quartzites à intrusion basique dans la vallée du Diamangou, alors qu'au nord de la frontière malienne et au nord est, ce sont de puissantes formations de grès et d'argilites.

- Le Continental Terminal est représenté par des formations d'âge mio-pliocène discordantes sur le voltaïen ou directement sur le birimien. Il est constitué d'un ensemble fluvio-lacustre à lagunaire, grés-argileux à horizons d'oolithes ferrugineux. Les formations du CT sont les dépôts les plus jeunes du bassin des Iullemmeden dont la marge s'est déplacée progressivement du NE vers le SW au cours des temps géologiques. Le Liptako, à cause de sa position en bordure ouest du bassin, est en partie recouvert par les termes supérieurs du Continental Terminal d'âge moi-pliocène correspondant au Ct3 (grès argileux du moyen Niger) défini par Greigert en 1966. Il doit cette appellation pour désigner le tertiaire continental du Sahara (Killian, 1931 cité par Machens, 1973).

L'évolution morphologique de ces ensembles a été marquée par au moins deux périodes : une première période d'érosion/altération entre l'orogénèse éburnéenne et la transgression du Néo protérozoïque. La seconde période marquée par une forte altération, a agi sur les formations birimiennes et voltaïen jusqu'à la mise en place du Continental

terminal qui recouvre un socle profondément altéré. Ce processus va continuer jusqu'à ce que le socle soit débarrassé de sa couverture. Par la suite le socle sera partiellement débarrassé de sa couverture et relativement dégagé de sa gangue d'altération avec la reprise de l'érosion qui met en place un puissant réseau hydrographique en fin tertiaire début quaternaire (2 millions d'années).

Outre la présence de ces formations, il faut noter la présence des matériaux mis en place au Quaternaire. Ce sont les formations dunaires qui recouvrent le Continental terminal ainsi que les dépôts alluviaux dans les vallées du Niger et de ses affluents. La figure 10 présente la structure géologique simplifiée de la zone d'étude.

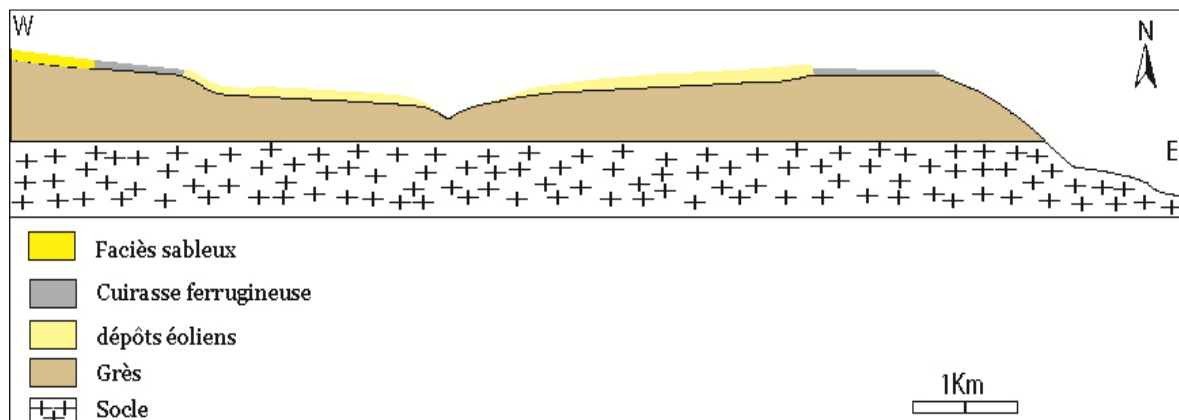


Figure 10: Coupe schématique simplifiée de la zone d'étude

2.1.4. Géomorphologie et *ensembles morphodynamiques*

Comme nous l'avons précisés dans la géologie, l'aire «*ayi noma*» fait partie intégrante du Liptako Gourma ; un ensemble qui s'étend à perte de vue en plaines et en bas plateaux tabulaires taillés dans les roches du socle cristallin (Faran Maïga, 1984). Le paysage actuel est un héritage des processus morphogénétiques passés. Il évolue et se transforme sous l'effet conjugué du climat actuel et de l'action anthropique. Il présente par ailleurs des traits spécifiques liés aux caractéristiques morphologiques et génétiques des unités qui le composent. Ces caractéristiques se définissent comme des formes de relief en rapport avec leurs processus évolutifs. La dynamique actuelle est régie par un ensemble des processus érosifs qui tiennent aux interactions entre les caractéristiques physiques (lithologiques et

topographiques) d'une part et les facteurs bioclimatiques ainsi que le mode d'exploitation des ressources naturelles d'autre part. Le relief comprend trois unités. Il s'agit de la vallée du fleuve Niger, des plateaux et buttes résiduelles et la vaste pénéplaine du socle qui forme un ensemble érodé plat où les seuls « hauts » reliefs sont constitués par des buttes témoins du Continental terminal. L'aspect tabulaire du relief résulte des effets d'aplanissement généralisé et d'un cuirassement de la surface supérieure suivie d'une fossilisation de sa surface favorisée au cours d'une période aride. La monotonie est dominée à une grande échelle par des reliefs résiduels de dizaine de mètres de commandement. Cet ensemble est par la suite entaillé par un puissant réseau hydrographique formé par le fleuve et ses affluents. Le paysage est faiblement incliné du nord vers le sud, et d'ouest vers l'est en direction de la vallée du fleuve Niger. Les altitudes varient entre 174 m à l'est et 275 m à l'ouest (figure 11).

La figure 12 représente une coupe schématique des unités topographiques présentes dans l'aire « *ayi noma* ». Cependant dans le détail, on peut distinguer deux niveaux de plateaux notamment dans la partie ouest de la zone d'étude (bassin versant du kori Tyala). Cinq unités géomorphologiques constituent le paysage. On y observe des topo-séquences classiques constituées de la surface des plateaux et talus, des glacis et enfin des bas-fonds.

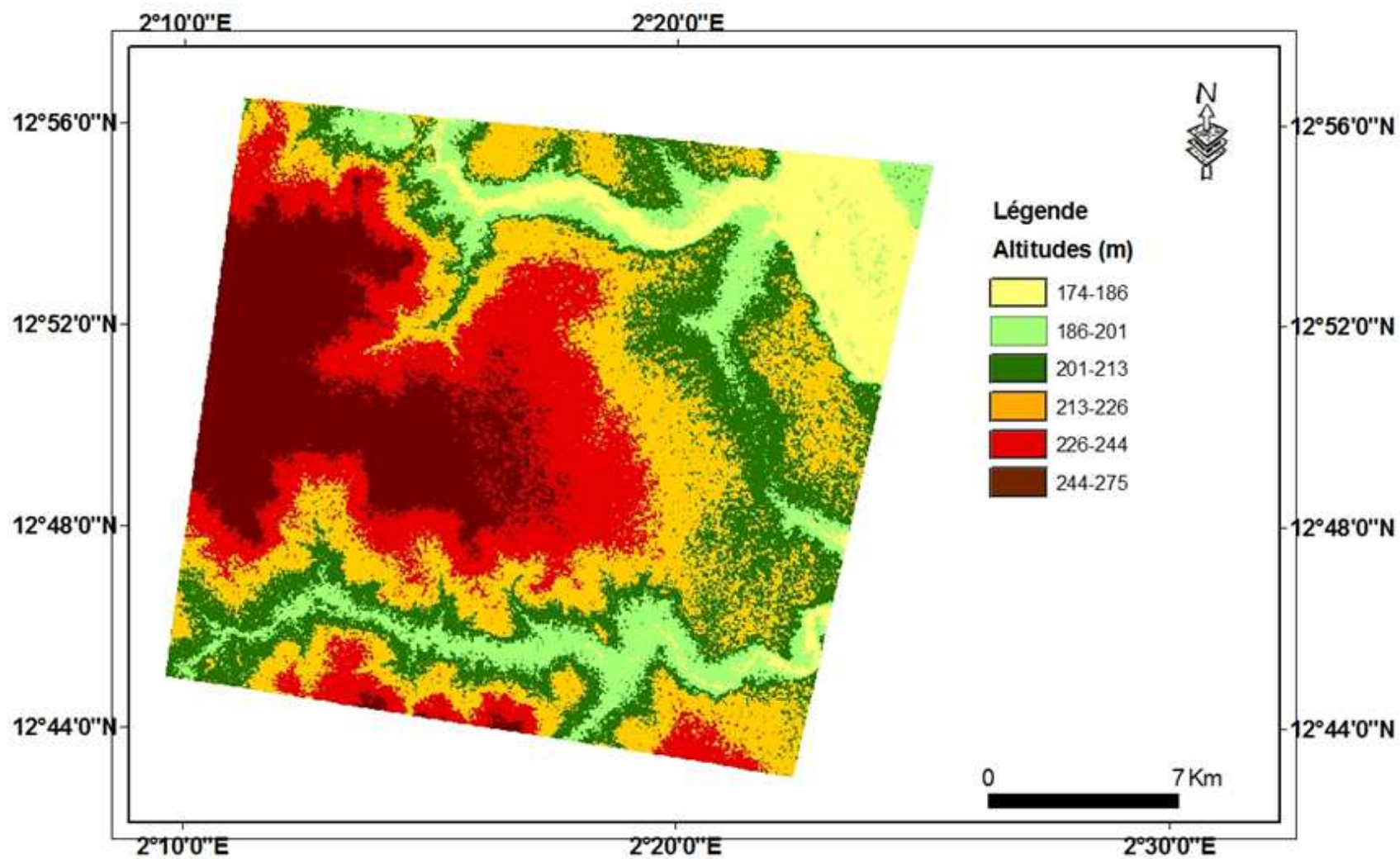


Figure 11: Topographie de la zone d'étude

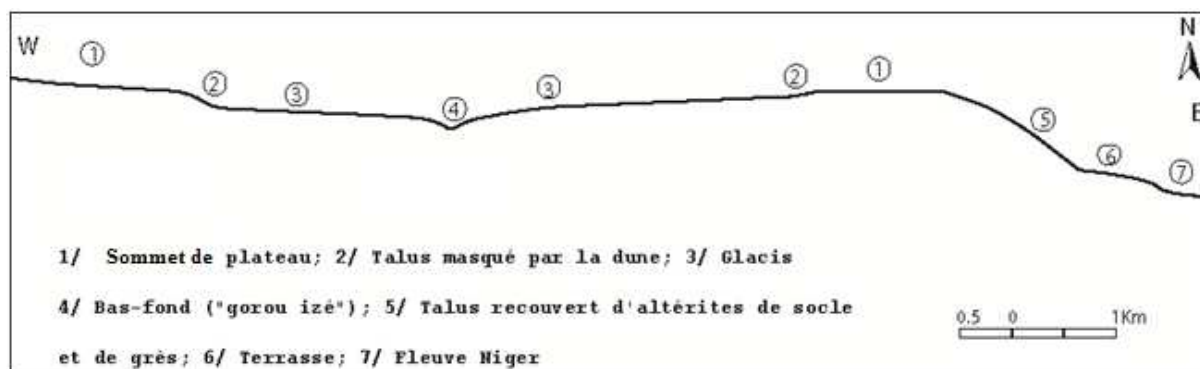


Figure 12: Coupe schématique des unités paysagères (extrait de la carte topographique au 1 : 50.000 feuille de Kirtachi 3d)

2.1.4.1. Les sommets des plateaux

Il constitue l'unité géomorphologique la plus étendue (photo13). C'est un vaste ensemble monotone légèrement incliné vers la vallée du fleuve Niger passant de 250 m à l'Ouest à 200 m à l'Est. Il atteint près de 18 km dans sa plus grande largeur (Pias, 1976). Le plateau s'étend sur des formations géologiques du Continental terminal (Ct3) recouvert de la cuirasse ferrugineuse. Son revers est fossilisé par des dépôts sableux (épaisseur maximale 6 m) à relief mollement ondulé et qui masque la topographie initiale. Les pentes sont en moyenne de l'ordre de 1 à 3 % (Pias, 1978). Cependant, dans sa partie ouest (secteur de Tyala), on observe deux niveaux de plateau. Le plateau est entaillé au nord et au sud respectivement par la vallée du goroubi et celle du diamangou. Les affleurements de cuirasse en dalle, les grandes surfaces planes à manteau gravillonnaire, le recouvrement sableux, sont les éléments constitutifs (photo 12). On y distingue grossièrement deux faciès : un faciès cuirassé et un faciès sableux portant l'essentiel des cultures (Abba, 2007). En effet, le manteau gravillonnaire constitue un sous ensemble pour le faciès sableux. Ce dernier, évolue au stade gravillonnaire par décap. la couverture sableuse par le ruissellement et la déflation éolienne, et correspond donc à un stade de dégradation.



Photo 12 : Plateau ensablé de Dyabou

2.1.4.2. Les talus

Les talus tels qu'ils sont définis par Pias (1976) se présentent sous forme d'un abrupt cuirassé de puissance variable (1 à 5 m) particulièrement au Nord et au Sud. Ces talus sont raides et leur pente peut atteindre (45-50°) et le plus souvent ils sont recouverts d'éboulis et parfois dépourvu de toute couverture, ce qui laisse affleurer des altérites kaolinisées de socle (figure 12).

Cependant, si sur les versants du goroubi, les talus sont bien nets, du côté des versants des kori secondaires (notamment le kori de Tyala et le « *Gorou Izé* »), ils sont assimilés soit au sommet du plateau ou au glacis du fait d'un recouvrement sableux. Ainsi, selon que le talus soit masqué ou non par le recouvrement sableux, on distingue plusieurs types versants. Ainsi, nous avons identifié quatre types de versants.

- Le premier type se caractérise par la "quasi-inexistence" des talus. En effet, ils sont presque totalement masqués par le prolongement des dépôts éoliens (dunes) qui remontent jusqu'au sommet de plateau (figure 13); ou alors lorsqu'on les observe, ils sont très courts trois (3) à cinq (5) mètres de commandement. Sur ce type de versant, le ruissellement concentré remonte jusqu'au revers du plateau. Sur ce versant, on a l'impression que le glacis est aussi inexistant de la topo-séquence ; en effet il est indissociable de la surface du plateau. Ce versant est observé dans le bassin du « *Gorou Izé* », ou encore dans la partie

amont du bassin du kori Tyala. Dans ce dernier cas, la mesure du niveau de la cuirasse a révélé que le talus est entrain d'être exhumé par le ravinement qui remonte jusqu'au plateau.

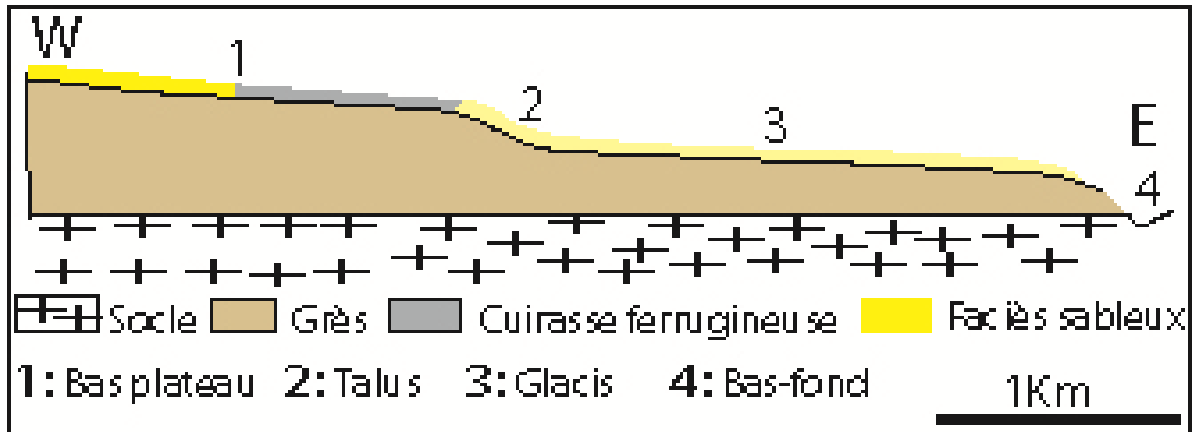


Figure 13 : Coupe schématique du versant type 1 : le talus est fossilisé par le dépôt sableux

- Le second type de versant s'observe dans le bassin de goroubi et dans la partie aval du bassin du « gorouizé » et du kori de Tyala : le talus apparaît de façon nette et taillé dans deux types de matériaux constituant le substrat géologique notamment les formations du socle et les grès du Ct3 parfois couvert d'éboulis (photo 13).



Photo 13: Versant type 2 où le talus apparaît recouvert d'éboulis issus de l'altération du socle et du grès du Continental terminal.

Ces deux types de versants sont représentés dans la figure 11 matérialisant les unités géodynamiques de la zone.

- Le troisième type se compose d'une surface légèrement inclinée correspondant au premier niveau du plateau, d'un court talus, ensuite la surface du bas plateau et son talus directement raccordé au kori sans aucune unité de transition. Il s'agit du versant gauche du kori de Tyala et il constitue le versant le plus long dans le secteur (figure 14). Mais à certains endroits, le niveau cuirassé du plateau affleure en surface du fait de l'intense érosion diffuse et ravinante et de la déflation éolienne.

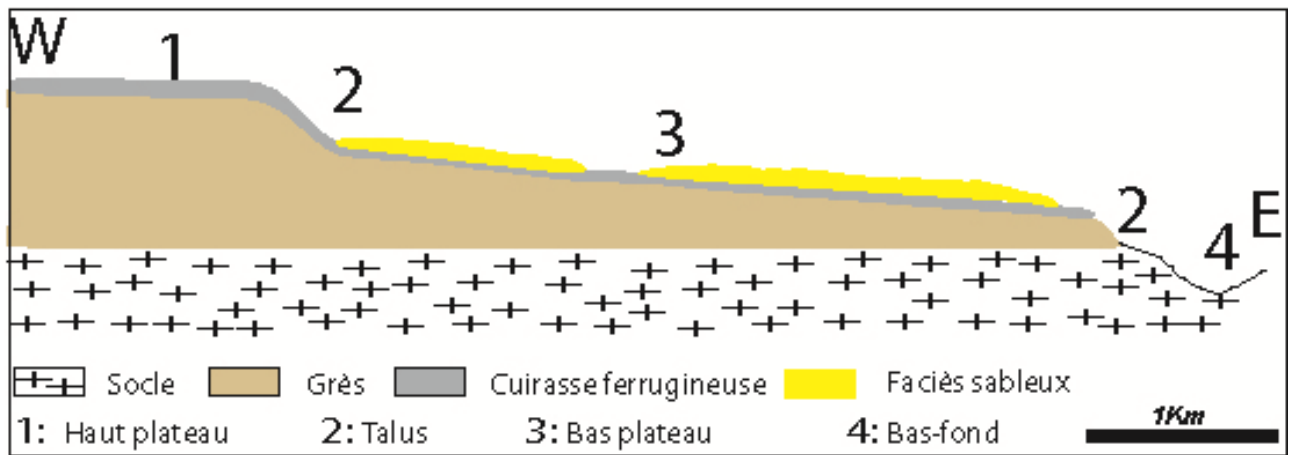


Figure 14: Coupe schématique du versant type 3

Et enfin le versant de la rive droite du kori Tyala où on aperçoit uniquement la surface du plateau sableux. La surface de ce versant étant fossilisée par les dépôts éoliens. La berge droite du kori est taillée dans le manteau sableux qui recouvre le glacié et remonte jusqu'à la surface du plateau (cf. figure 15). Ce pendant, la dynamique actuelle étant active dans ce secteur, le talus est entrain d'être exhumé par endroit, notamment par le processus de ravinement.

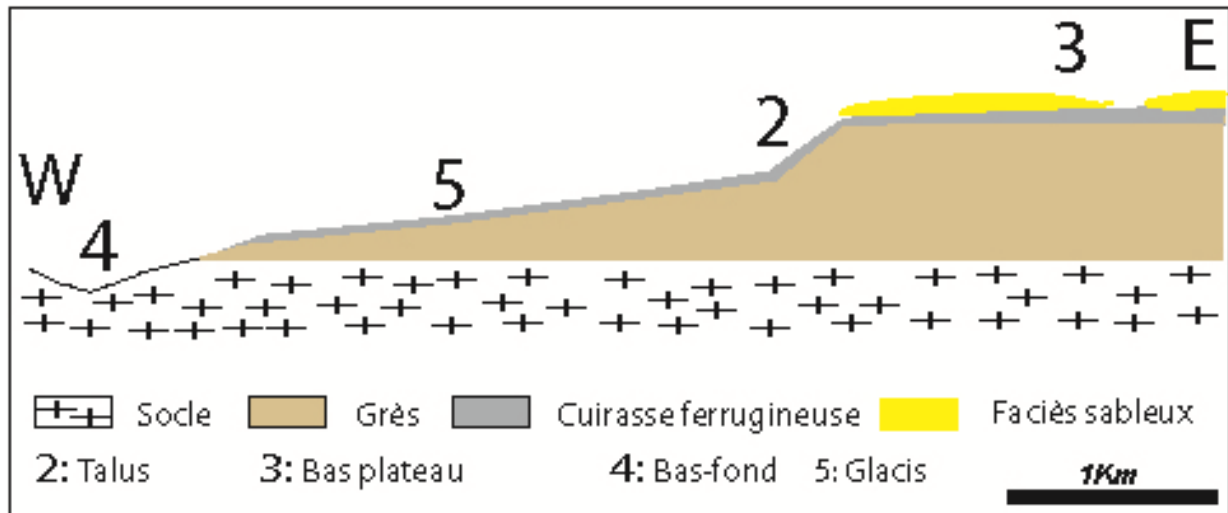


Figure 15: Coupe schématique représentant le quatrième type de versant

2.1.4.3. Les glacis

Les glacis sont de très faible extension notamment dans le secteur du goroubi puisque déterminée par la configuration de son lit (Abba, 2007). Ils disparaissent de part et d'autre de ce cours d'eau auquel cas ils sont directement adossés au cône d'éboulis à la base du talus (photo14). Elles constituent des surfaces intermédiaires développées dans des matériaux sableux rubéfiés entre les talus et les cours d'eau. Cela leur confère un caractère fragile. Si ces unités apparaissent sur les versants du Goroubi, elles sont par endroit difficiles à distinguer du revers du plateau car les talus sont masqués ; mais aussi du fait de la faiblesse de la pente notamment sur les versants du « gorou izé » ; les glacis sont quasi-inexistants pour les versants du kori Tyala puisque ce kori est directement raccordé au talus ou au dépôt fossilisant le talus.



Photo 14: Glacis raviné formé sur matériaux argileux le long du goroubi

2.1.5. *Les dunes*

Elles se localisent dans la partie aval du kori Tyala. Dans le bassin du Goroubi, les dunes constituent des unités de transition entre les talus et les glacis. Partout où les talus sont masqués, la dune remonte jusqu'à la surface du plateau avec comme conséquence le ravinement au sommet du plateau (photo15).



Photo 15 : Dune ravinée dans la partie aval du bassin du kori Tyala (photo Souleymane Salaou)

2.1.5.1.La terrasse

La terrasse tel que définit dans le Petit Larousse 2010 est un replat, souvent recouvert de dépôts fluviaux, qui correspond à un ancien fond de rivière. Elle se situe dans la partie aval du bassin et correspond à la terrasse du fleuve Niger. Elle est essentiellement formée par une formation superficielle argileuse (photo 16).



Photo 16 : Terrasse alluviale du fleuve Niger

2.1.5.2.Les bas-fonds

Les bas-fonds correspondent essentiellement au goroubi et ses affluents (gorou izé et kori Tyala) ainsi que le fleuve Niger qui constituent les niveaux les plus bas de la topographie. Ils se distinguent par leur nature pédologique très riche et favorable à la mise en valeur agricole (photo 17), mais aussi par leur dynamique de concentration de flux de matière provenant de l'amont. Nous faisons allusion surtout au flux de sédiments, car la dynamique actuelle très active des bassins versants par le phénomène d'ensablement (cf. photo 18), ce qui constitue une préoccupation pour les protecteurs de l'environnement et surtout dans la dynamique d'ensablement du fleuve Niger.



Photo 17 : Culture de manioc en bordure du fleuve Niger (confluence gorou izé et fleuve Niger)



Photo 18 : Sédimentation dans la partie aval du bassin du kori Tyala

2.1.6. Contexte pédologique

Les sols issus de l'altération du socle du Liptako sont dans la plupart peu évolués (Gavaud, 1977 cité par Amadou, 1995). Une étude beaucoup détaillée menée par Pias (1978) a identifié quatre classes de sols.

- Les sols minéraux bruts, définis par une altération chimique pratiquement nulle; ils s'observent sur des roches ou des formations superficielles qui ne subissent pas d'évolution pédologique, soit en raison du climat (sous-classe des sols minéraux bruts climatiques), soit en raison de l'érosion ou de l'âge trop récent des matériaux (sous-classe des sols minéraux bruts non climatiques). On distingue dans cette classe les sols minéraux bruts d'érosion sur cuirasse dure ou massive imperméable à tout système racinaire (lithosols) soit plus fragmentée, avec localement des placages de terres fines ou gravillonnaires (régosols). Et les sols minéraux bruts d'apports formés dans les lits mineurs sans horizons humifère, particuliers, stratifiés.

- Les sols peu évolués subdivisés en deux sous groupes : les sols peu évolués d'érosion (cuirasse) qui peuvent être soit lithiques, si le substratum est imperméable, soit régiques, s'il est plus ou moins fragmenté, permettant à la végétation de s'installer. Et les sols peu

évolués d'apport sur matériel alluvial stratifié, épais, ou sur matériel colluvial peu épais sols des mares avec une hydromorphie totale ou partielle.

- Les sols à sesquioxydes sous-classe des sols ferrugineux.

Ce sont des sols à individualisation des sesquioxydes de fer, soit dans la masse, soit sous forme de taches, concrétions, carapace ou cuirasse, et dont la teneur en matière organique est généralement faible, car elle est rapidement minéralisée, Selon le degré de lessivage des colloïdes minéraux, on distingue deux groupes.

- 1 Le premier groupe sont des sols ferrugineux nos ou peu lessivés qui sont les plus importants dans ce secteur. quant au second groupe, il concerne les sols ferrugineux lessivés qui présentent un horizon B enrichi en argile, l'horizon sous-jacent (matériau originel) étant moins riche en argile que l'horizon B, mais plus riche que les horizons supérieurs.
- 2 Et enfin la dernière classe est constituée par les sols hydromorphes dont l'évolution est dominée par l'effet d'un excès d'eau, temporaire ou permanente, qui affecte une partie seulement: ou l'ensemble du profil.

Selon Pias 1976, les lois de distribution des sols sont simples en liaison avec les éléments du paysage. Des prélèvements effectués à différents niveaux sur les unités topographiques ou d'occupation des sols lors de la campagne hydrologique (2009) donnent la répartition granulométrique présentée dans le tableau 4. Cela montre que les formations superficielles sont pour l'essentiel sableuse avec des faible taux de la matière organique, ce qui explique leur sensibilité à l'érosion.

Tableau 4 : Quelques caractéristiques granulométriques des sols dans l'aire « *ayi noma* »

Localisation	Argiles+limons	Sables fins	Sables moyens	Sables grossiers
Champs de mil sur plateau	12.4	48.46	34.62	4.52
Plateau induré	27.63	45.03	24.86	2.46
Glacis induré	20.74	46.3	31.08	1.88
Terrasse	52.65	35.05	10.35	1.95

2.1.7. Végétation

Dans cette zone, comme dans l'ensemble de la commune rurale de Tamou, les conditions édaphiques (profondeur, perméabilité, richesse en base) ainsi que la variation de la pluviométrie ont une influence sur la répartition et la composition floristiques.

- Au sud, à plus de 800 mm de pluies, la forêt claire apparaît sur les sols ferrugineux (Gavaud, 1977) notamment dans les réserves naturelles ou artificielles. Les espèces ligneuses sont caractérisées par un grand nombre de combrétacées et également par la présence d'espèces utiles à l'homme comme *Bytyrospermum parkia* *Parkia biglobisa* (Saïdou, 2006).

- Au nord de l'isohyète 800 et jusqu'à 600 mm, c'est le domaine de la savane boisée qui se caractérise par diverses espèces dont *Bombax costatum*, *Baswellia delzilli*... ainsi que les graminées vivaces notamment les *Andropogonées* qui apparaissent au sud de l'isohyète 650 mm.

- La savane arbustive sur les sols ferrugineux de couverture sableuse ancienne, avec des espèces dominantes telles que combrétacées (*Guiera senegalensis*, *Combretum micrantum*, *Combretum glutinosum* etc) constitue la formation végétale caractéristique au nord de 600 mm.

Cependant, la pression sans cesse croissante de la population sur les ressources naturelles entraîne une forte dégradation qui engendre l'apparition de nouvelles classes de végétation mettant ainsi en évidence l'impact de l'anthropisation sur les formation végétales. C'est l'exemple de savanes arbustives dégradées ou très dégradées voire même des vastes plages de sols nus fonctionnant comme de véritables impluviums comme l'illustrent les photos n° 19, 20, 21).



Photo 19 : Savane arbustive dense en bordure du plateau



Photo 20 : Savane arbustive dégradée sur le sommet du plateau



photo 21 : Vaste surface dénudée sur le sommet du plateau avec des micro-reliefs dûs à l'érosion en nappe

Ces photos illustrent les impacts de la pression anthropique sur le couvert végétal : modification des classes d'occupation des sols. En quelques décennies de mise en valeur agricole, on passe d'une classe de végétation dense à une classe de sol nu via un état dégradé à très dégradé. Les conséquences qui en découlent sont essentiellement la prolifération des sols nus sur le plateau et les glacis, et l'apparition des formes de dégradation liées à l'érosion aussi bien hydrique qu'éolienne.

2.1.8. Contexte hydrologique

Dans l'aire « *ayi noma* », le réseau hydrographique est dominé par le Goroubi et le Diamangou deux grands réseaux qui entaillent le plateau ensablé de Dyabou dans ses extrémités nord et sud ainsi que leurs affluents. Cependant, contrairement à ce qu'on pense dans ce domaine exoréique, le ruissellement n'atteint pas toujours ces réseaux et s'estompe souvent dans des dépressions fermées dans lesquelles se forment des mares de plateau. C'est ainsi, qu'on peut distinguer deux systèmes hydrologiques : un système exoréique formé par les bassins de Goroubi et de Diamangou qui se jettent dans le fleuve et un système endoréique que forme l'ensemble des bassins qui alimentent les mares dans les dépressions fermées, un phénomène largement étudié dans le Fakara (Desconnets, 1994). Ces mares sont formées soit dans le faciès sableux soit dans le faciès cuirassé du plateau (photos 22 et 23).

Cependant, il faut noter que certaines de ces mares débordent et alimentent exceptionnellement les bassins de Goroubi et de Diamangou : c'est le cas de la mare située à l'est de Dyabou. En cas de trop plein, elle déborde vers le « Gorou izé » un affluent du goroubi. L'hydrologie de la zone est également caractérisée par l'existence des résurgences localement appelées mansarés liées à l'infiltration dans le faciès sableux du plateau (cf. photos 24 et 25).



Photo 22: mare formée dans une dépression fermée sur le faciès sableux du plateau



Photo 23 : Au premier plan affleurement de la cuirasse ferrugineuse, au second plan mare de plateau formée sur le faciès cuirassé



Photos 24 et 25 : Sources liées à la nouvelle dynamique de l'occupation du sol, l'érosion régressive et aux caractéristiques des formations superficielles : celles-ci soutiennent l'écoulement dans le *Gorou Izé*, sur la photographie de droite, (1) a 7 ans et (2) a 6 ans. Source : (Abba, 2007)

Les résurgences sont dues à la perméabilité des formations superficielles (caractéristiques granulométriques sableuses reposant sur la cuirasse). Ces formations (dépôt éolien et cuirasse), quand elles ne sont pas encroûtées, sont favorables à l'infiltration des eaux de pluies. En fait, l'écoulement a toujours existé en direction du fleuve sous forme d'écoulement souterrain, et aujourd'hui sous l'effet des changements d'usage des sols et de l'érosion régressive, il apparaît à ciel ouvert. Ces résurgences se jettent dans le kori de Sibili Goungou.

2.2. Le milieu humain

Ce sous point est consacré à un bref aperçu sur la population de la commune rurale de Tamou et en particulier dans l'aire « *ayi noma* ». il s'agit de la composition ethnique, de son évolution et des aspect socio-économiques.

2.2.1. Une population à diversité ethnique

La commune rurale de Tamou est une zone d'immigration dont l'occupation est relativement récente bien que la présence humaine soit ancienne. Elle constitue depuis fort longtemps un foyer d'attraction des populations par les potentialités qu'elle renferme. Jusqu'au début du 20^{ème} siècle, les aires de peuplement de la région ne sont que des îlots localisés avec une densité faible soit 5 à 6 fois inférieure à celle d'aujourd'hui (Bénoit, 1999). Des déplacements en direction de la zone existaient et concernaient les éleveurs et n'étaient pas définitifs. Avec la sécheresse des années 1973 et 1974 on a assisté à des départs d'agriculteurs jusque là demeurés sédentaires et qui sont partis parce que les réserves alimentaires étaient épuisées. La persistance d'années sèches successives n'augurait point d'une amélioration de leur situation, mais aussi du fait d'une baisse constante des rendements agricoles. Il faut noter aussi la volonté de l'Etat qui a stimulé les migrations puisqu'autour des années 1970, de vastes campagnes de lutte contre des maladies endémiques (l'onchocercose, la trypanosomiase) ont permis d'assainir la région et favorisé ainsi l'installation des populations venues d'horizons divers et surtout avec l'opération « *ayi noma* » (produisons) en 1976 pour un retour massif des populations sinistrées (Amadou, 1995).

La population est constituée d'une mosaïque d'ethnies constituant le Niger en miniature. Cette mosaïque est composée des Haoussa, Soulantché, Peulh, Zarma, Gourmantchés, Foulmangani, etc. venant de plusieurs régions du pays. Pour garder leur identité, les ressortissants de chaque région ont donné à leurs villages ou campements le nom de leur village d'origine. C'est l'exemple d'aviation dont les occupants sont partis du quartier aéroport de Niamey, ceux de Maouré kouara originaires de Maouré kouara (Dantiandou), ou encore "Ngaba" emprunté à un village du même nom à Zarmaganda, etc. C'est ainsi qu'on assiste à une évolution de la densité d'occupation humaine dans la

zone qui a atteint près de 19 habitants par km² (Ministère de l'économie et des finances, 2006), alors qu'elle n'était que de moins de 4 habitants par km² jusqu'en 1975 (Amadou, 1995).

2.2.2. Évolution de la population dans la commune rurale de Tamou

L'installation de la population à la périphérie du Parc date depuis fort longtemps. En effet, des traces observées dans le paysage montrent l'existence d'un foyer de peuplement (sites d'extraction de fer). Cependant, la dynamique démographique dans la commune rurale de Tamou peut être appréciée à travers la diversité ethnique ainsi que la création de nouveaux villages depuis le déclassement de la zone. L'effectif de la population est passé de 36.679 habitants à 52.917 respectivement de 1988 à 2001.

Selon Souley (2010), la migration en direction de la périphérie du Parc w peut aussi être mise en évidence à travers la dynamique démographique intervenue de 1930 à 2001. De 1933 à 1972, le canton de Tamou a connu un très faible taux d'accroissement annuel de sa population. Ce taux a été inférieur à 1% voire même négatif durant les périodes 1950-1953 et 1969-1972. Le repeuplement progressif de la zone a été rendu possible grâce à la campagne d'éradication des vecteurs de trypanosomiase et à la création de la zone « *ayi noma* ». Ainsi, le recensement administratif de 1972 estimait la population du canton de Tamou à 6.122 habitants et un taux moyen annuel d'accroissement de 5,8% a été enregistré entre 1973 et 1982 (figure 16). Ainsi, la population est passée de 7.085 habitants à 11.793 habitants. Après la sécheresse de 1984 marquée par un fort flux d'immigrants un important accroissement de la population a été observé. Ainsi en trente ans, la population de Tamou est passée de 6.122 à 52.917 habitants soit un multiplicateur de neuf. Si ce taux d'accroissement issu du recensement général de population de 2001 se maintient à 3,1%, la population de la commune de Tamou atteindrait 70035 habitants en 2010 (ME/F, 2010), et le nombre de 133 298 personnes en 2050 (Souley, 2010).

Le nombre 133 298 correspond à la projection en 2050 en tenant compte du taux d'accroissement naturel de la population en 2001. La croissance démographique peut aussi être appréciée à travers l'évolution de la densité d'occupation humaine au sein de la commune rurale (cf. figure 17).

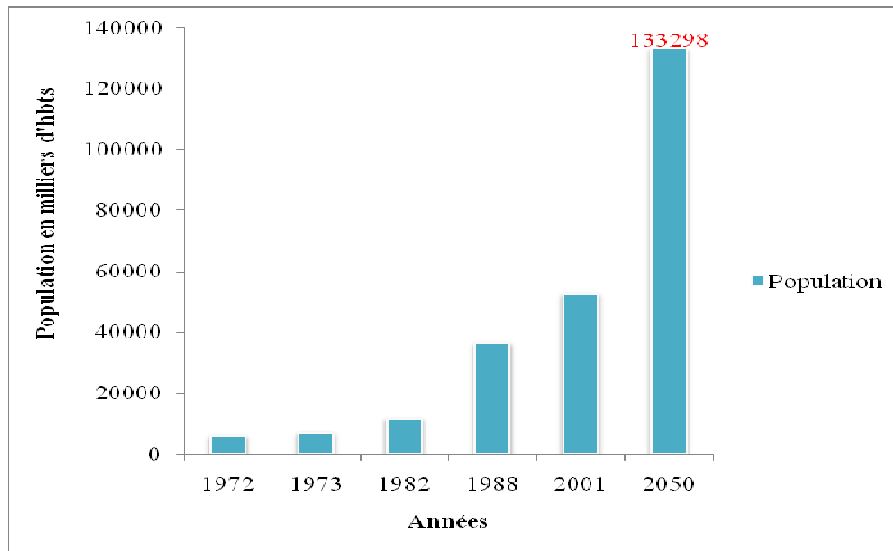


Figure 16: Evolution de la population dans la commune rurale de Tamou de 1970 à 2001 (RGP/H, Souley 2010)

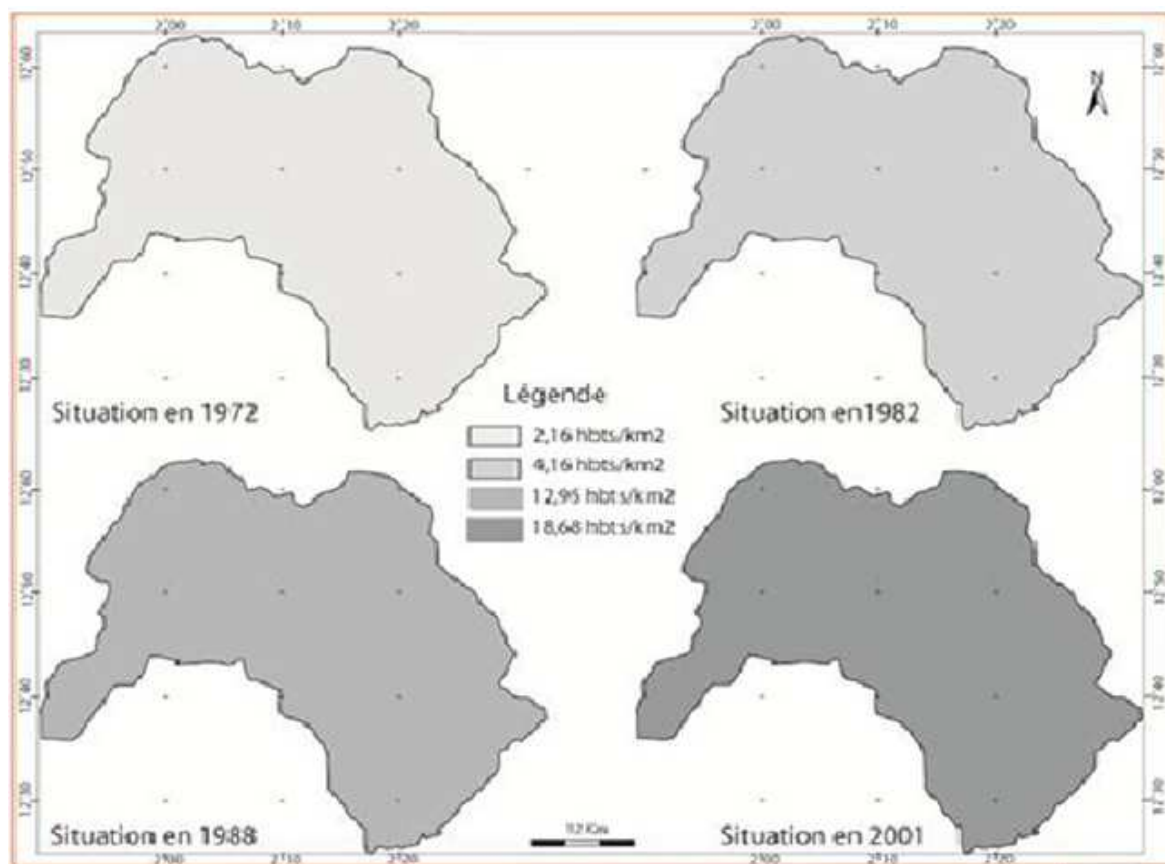


Figure 17: évolution de la densité d'occupation humaine de 1972 à 2001 (Source recensements généraux de la population au Niger)

2.2.3. Les activités socio-économiques

Constituée d'une mosaïque d'ethnies, la population s'adonne aux activités de productions habituelles. L'agriculture et l'élevage constituent les deux principales activités socio-économiques dans la commune rurale de Tamou. L'agriculture apparaît au premier rang. Il s'agit d'une activité très diversifiée dont l'essentielle de la production est destinée à la consommation. Deux types de cultures caractérisent l'agriculture. D'une part les cultures pluviales constituées pour l'essentiel du mil, sorgho, maïs, arachides, niébé, sésame,... sont pratiquées sur les sols de plateau et sur les glacis. Les cultures gombo arachide voandzou sont essentiellement réservées aux femmes à qui elles procurent des revenus monétaires substantiels. Et d'autre part les cultures irriguées qui concernent l'arboriculture et la riziculture pratiquées le long des bas-fonds afin de sécuriser les réserves alimentaires et de servir d'activités de contre-saison. Cependant, l'intensité de la pression sur les sols, fait apparaître des signes révélateurs de dégradation telles que les diverses formes de ravinement, mais aussi la salinisation liée à l'utilisation des engrais pour la riziculture signalée par certains paysans.

L'élevage constitue la deuxième activité économique et concerne principalement les peuls. Le tableau 5 montre l'importance de l'élevage dans l'économie de la commune rurale.

Tableau 5: Estimation du cheptel de la commune de Tamou en 2009 (Source : Plan de développement communal de Tamou, 2009 cité par Souley, 2010).

Espèces	Nombre	UBT ⁴
Bovins	122 389	97 911,2
Ovins	155 083	23 262,45
Caprins	146013	21 901,95
Asins	63823	31 911,5
Camelins	4821	4 821
Equins	448	224
Porcins	4	-

⁴ UBT (Unité de Bétail Tropical) : c'est une norme conventionnellement admise qui définit le besoin alimentaire d'un animal dont le poids est de 250 kg. C'est ainsi que : un dromadaire = 1UBT, un bovin = 0,8UBT, un ovine = 0,15 UBT, un caprin = 0,15 UBT, un asin = 0,5 UBT, un équin = 0,5 UBT.

Cette activité est confrontée à des problèmes liés à une pression foncière croissante qui se traduit par une fermeture de couloirs de passage et la réduction des aires de pâturage, les rapports souvent conflictuels entre les agriculteurs et les éleveurs. Ces derniers perdent le plus souvent le contrôle de leurs terres l'accès ressources (eau, et pâturage), ce qui les contraint à se convertir en agro-pasteurs pour s'approprier et maintenir l'espace situé aux alentours de leur aire de pâturage (Souley, 2010).

Les autres activités sont la pêche pratiquée surtout par les Zarma au niveau du fleuve Niger du Goroubi et du Diamangou, le commerce qui a favorisé l'implantation de plusieurs marchés ruraux, l'artisanat qui reste l'apanage des femmes qui s'adonnent généralement aux tissages des nattes et à la poterie tandis que les hommes s'occupent de la forge (Issoufou Mamane, 2010).

Ces activités économiques, notamment l'agriculture et l'élevage ont eu des conséquences désastreuses sur les ressources naturelles à l'image de formations végétales qui sont soit complètement modifiées ou ont disparu en faveur des cultures, soit converties pour le cas où les savanes arbustives denses se transforment en savanes arbustives dégradées ou alors cette dernière classe devient de la savane arbustive très dégradées.

Après cet aperçu sur les caractéristiques régionales de la zone d'étude, nous allons passer à la caractérisation des détails. C'est-à-dire à l'étude des changements d'usage des sols et ses implication sur la dynamique récente à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ». L'accent est mis dans ce chapitre à une analyse diachronique de l'occupation du sol de 1987 à 2010 ainsi qu'à une étude des processus qui régissent la dynamique actuelle du système morphologique de l'aire « *ayi noma* ».

Chapitre 3 : Occupation des sols et dynamique actuelle dans l'aire « *ayi noma* »

Ce chapitre expose les résultats de la cartographie multi dates de l'occupation des sols. Il met en évidence la dynamique des changements de l'occupation des sols et ses conséquences sur la dynamique actuelle des unités géomorphologiques depuis la mise en valeur agricole de la zone. La première partie présente l'évolution de l'occupation des sols de 1987 à 2010.

Dans la seconde partie, il est question des conséquences des changements d'usage des sols intervenus suite à la mise en valeur agricole de la zone. L'accent est mis sur la caractérisation de la morphodynamique actuelle. Il s'agit de démontrer l'instabilité des versants depuis la date de déclassement de l'aire « *ayi noma* ». En effet, avec le déclassement, le risque d'érosion et d'ensablement est décuplé par l'absence d'une couverture végétale efficiente ainsi que l'apparition et l'extension de surfaces dénudées. En effet, des nombreuses études ont montré le rôle de la végétation dans la protection du sol contre l'érosion. Une couverture végétale fermée joue un rôle de protection efficace contre l'érosion de surface. Elle protège les sols de l'ablation par réduction de l'énergie des agents érosifs et maintien des sols (Rey et al, 2004).

3.1. Dynamique de l'occupation dans l'aire « *ayi noma* »

Ce sous point consacré à l'analyse diachronique de la dynamique de l'occupation des sols de 1975 à 2010 met en évidence des implications des changements d'usage des sols sur la dynamique d'instabilité des versants des goroubi à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ». L'analyse se fonde sur l'interprétation et l'exploitation d'une série de cartes d'occupation des sols des années 1987, 1999 et 2010. Elle a permis de suivre l'évolution spatio-temporelle des différentes unités d'occupation des sols. Le choix des différentes dates n'est pas fortuit ; en effet, il permet de mettre en évidence l'importance des changements intervenus dans l'occupation des sols dans la zone depuis 1976. La situation de 1987 illustre une période d'arrivée massive des immigrants après les contraintes

climatiques des années 1980. Et enfin les deux périodes (1999 et 2010) correspondant à la situation actuelles mais une période marquant une amélioration de la pluviométrie.

3.1.1. Un rapide changement sur une quarantaine d'années

La figure 18 illustre l'évolution de l'occupation des sols entre 1987 et 2010.

- Les broussailles essentiellement situées en bordure des plateaux et les parties amont des glacis occupent 0,91% de la superficie totale cartographiée.
- Les cultures composées de cultures pluviales et jachères occupent une portion importante de la zone d'étude et représentent 40,52%. Elles se localisent sur l'ensemble des unités topographiques (cf. figure 19).
- Les cordons ripicoles représentent 0,74 % de la superficie totale et se situent le long du réseau hydrographique.
- Les savanes occupent 47,68 % avec respectivement 30,37 % de la savanes arbutive dense, 13,93 % de la savane arbustive dégradée et 3,08% de la savane arbustive très dégradée.
- Les sols nus ne représentaient que 1,02 %. Il s'agit de sols nus de glacis (0,56%), des sols nus de plateaux (0,25%) et enfin de terrains rocheux qui occupaient 0,21 % de la superficie totale.
- Le réseau hydrographique, composé du fleuve Niger, des rivières et des koris, représente quant à lui près de 3 % de la superficie totale de la zone cartographiée.

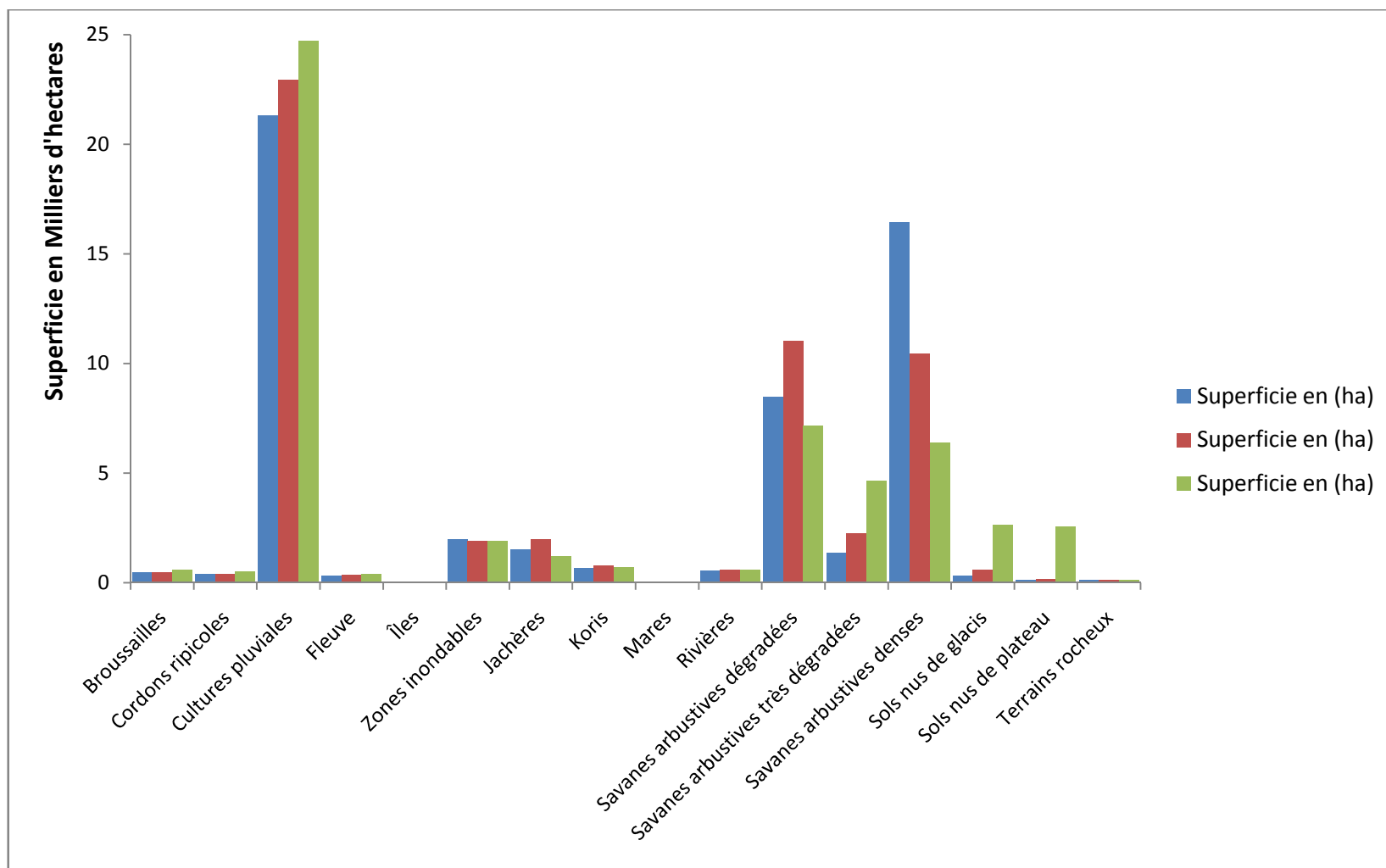


Figure 18: Evolution des unités d'occupation des sols (superficies en ha et valeur relative) de 1987 et 2010

La situation de l'occupation des sols en 1999 (figure 20) montre que les savanes arbustives constituées de trois classes (dense, dégradée et très dégradée) ont une superficie de 23744.01 ha (soit près de 43,82 % de l'espace cartographié). La savane arbustive dense occupe 10463,81 ha pour soit 44,07 %, la savane arbustive dégradée (11043,48 ha) 46,51 % et la savane arbustive très dégradée (2236,72 ha) qui représente 9,42 % de l'ensemble (figure 18). Les broussailles et les cordons ripicoles occupent respectivement 0,90 et 0,74 % de la superficie. Les cultures et les jachères constituent 24941,41 ha soit 42,10%. Le fleuve, les rivières, les îles et les koris représentent respectivement 0,69, 1,10, 0,09, et 1,46%. Les sols nus constitués des sols nus de glacis, de plateaux, et les terrains rocheux occupent des superficies respectives de 1,12, 0,31, et 0,21% de la superficie totale (cf. tableau 5).

En 2010, l'analyse du graphique montre que les cultures y compris les jachères représentent 47,81% de la superficie cartographiée. Les cultures pluviales représentant à elles seules 45,61 % s'observe sur toutes les unités topographiques (figure 21). elles ont légèrement progressé et atteignent 45.61 % de l'espace cartographié alors qu'elles représentaient 42,36% en 1999. Les superficies des savanes arbustives toutes classes confondues continuent de baisser au profit des cultures et de sols nus de plateaux. En effet, elles étaient de 43,82% en 1999 et ne représentent que 33,55% en 2010. Les sols nus ont également progressé de 1,12% en 1999 à 1,64% en 2010. On note cependant, l'apparition d'une nouvelle classe d'occupation représentant les mares avec une superficie de 15,03 ha soit 0,027% de la superficie totale. En outre, il faut souligner une intensification du ravinement surtout dans la partie amont du bassin du kori Tyala.

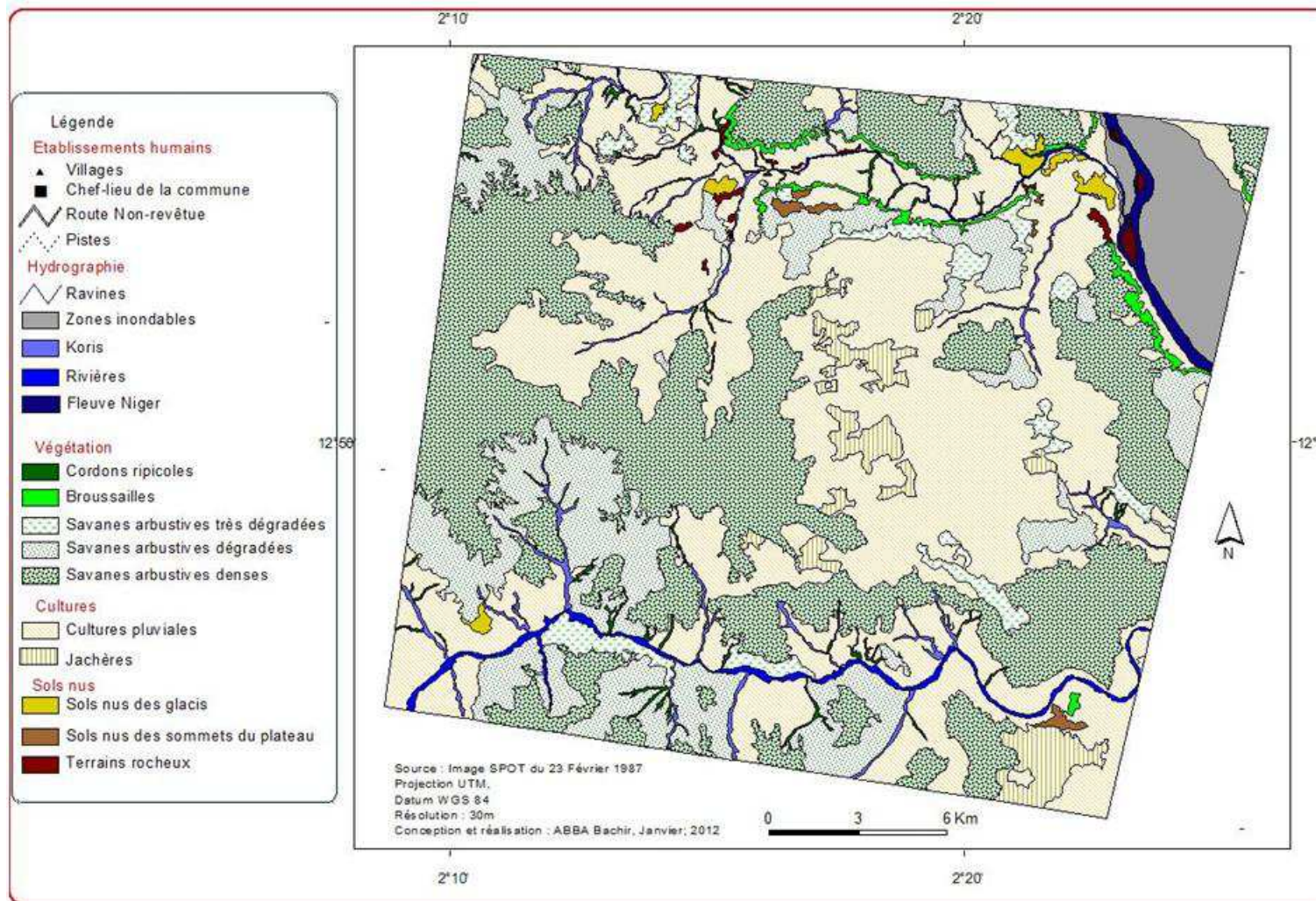


Figure 19: Carte d'occupation des sols de l'aire « ayi noma » en 1987

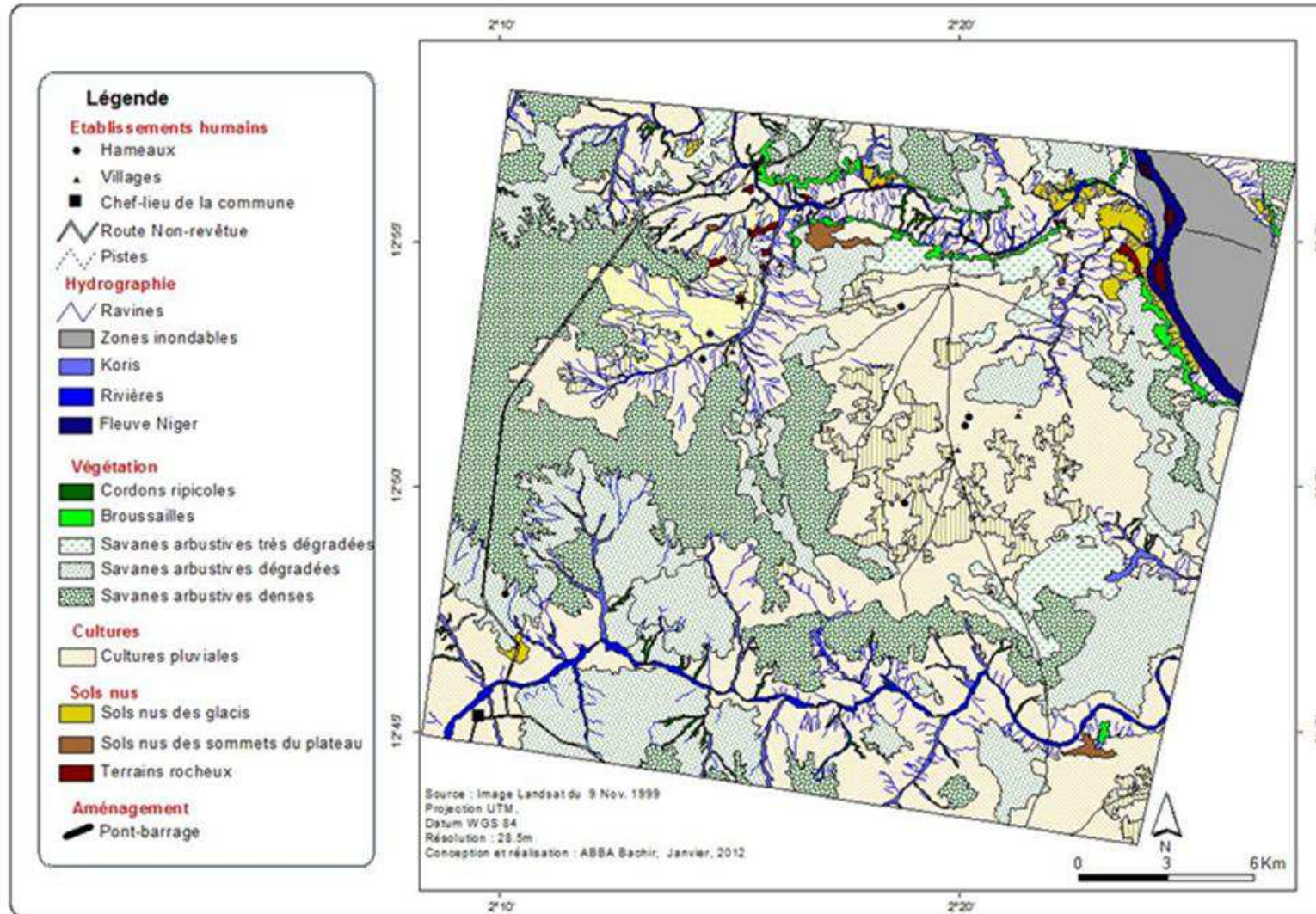


Figure 20: Carte d'occupation des sols de l'aire « ayi noma » en 1999

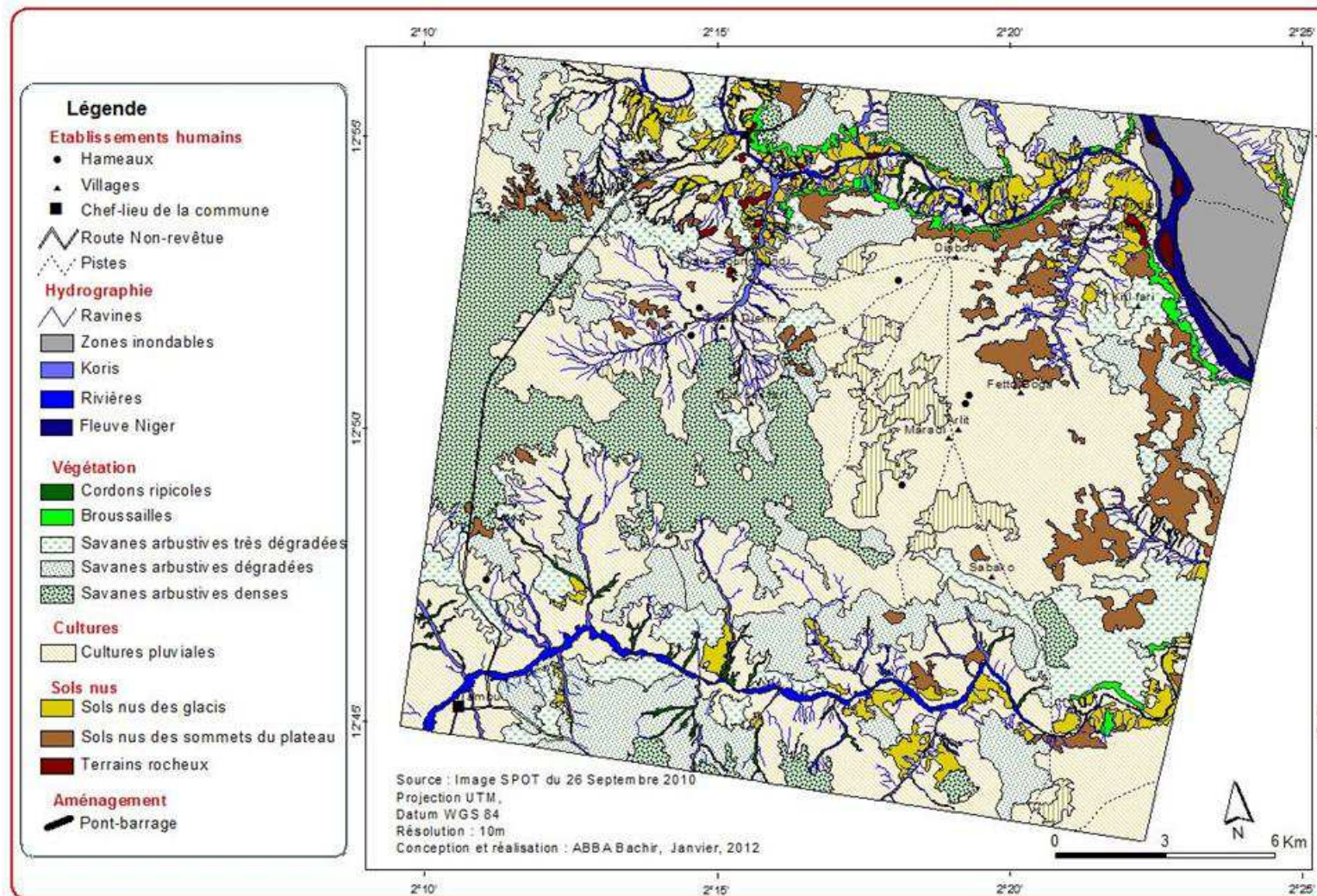


Figure 21: Carte d'occupation des sols de l'aire « ayi noma » en 2010

3.1.2. Les facteurs déterminants

L'évolution des différentes unités d'occupation des sols entre les trois dates a été appréciée grâce au taux d'évolution annuel qui a permis de ressortir les modifications intervenues dans la dynamique de l'occupation des sols dans l'aire « *ayi noma* » entre 1987 et 2010. L'analyse des figures (22 et 23) sur l'évolution des unités d'occupation des sols entre 1987 et 2010 montre que les classes d'occupation comme les cultures, les jachères, les sols nus (sur les glacis et les plateaux), les savanes arbustives dégradées et très dégradées, les cours d'eau ont enregistré une augmentation de leur superficie. Tandis que les savanes arbustives denses ont reculé. Avec une superficie de 16457,64 hectares en 1987, elles ne représentent 6396,23 hectares en 2010 soit 38,86 % de leur superficie initiale. Plus spectaculaire est par exemple l'augmentation de la superficie des sols nus de plateaux qui a progressé de 131 % entre 1999 et 2010.

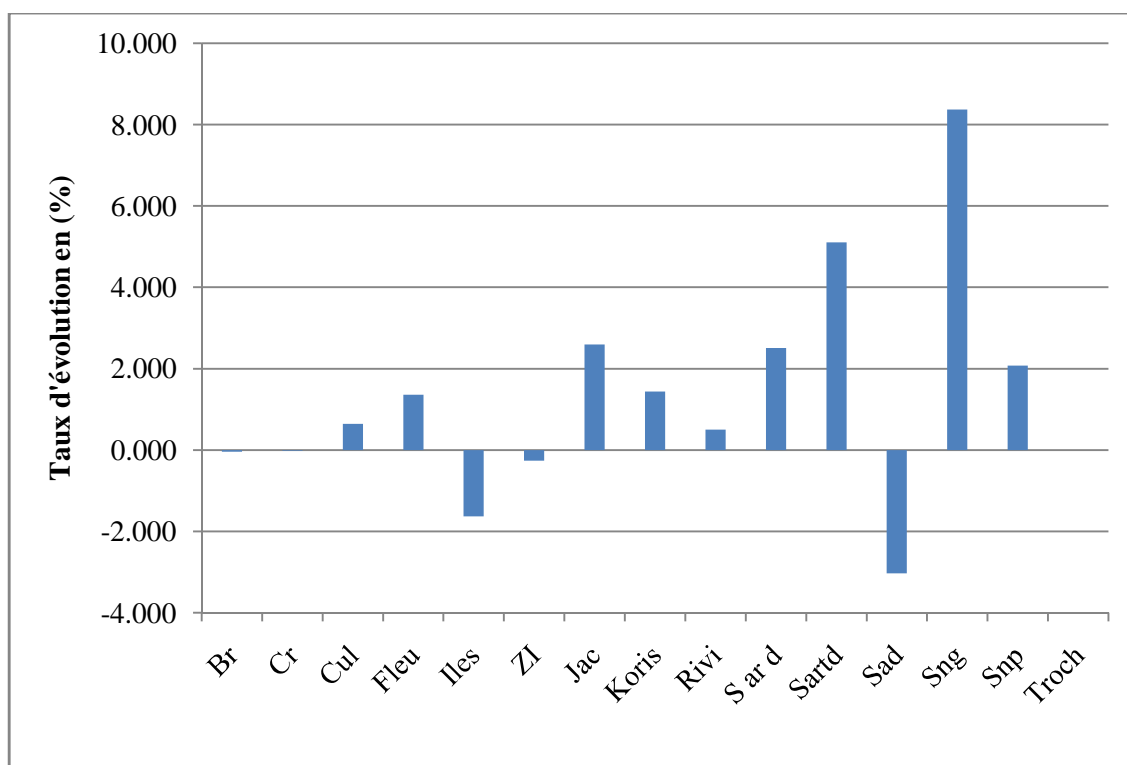


Figure 22: Evolution des unités d'occupation des sols entre 1987-1999

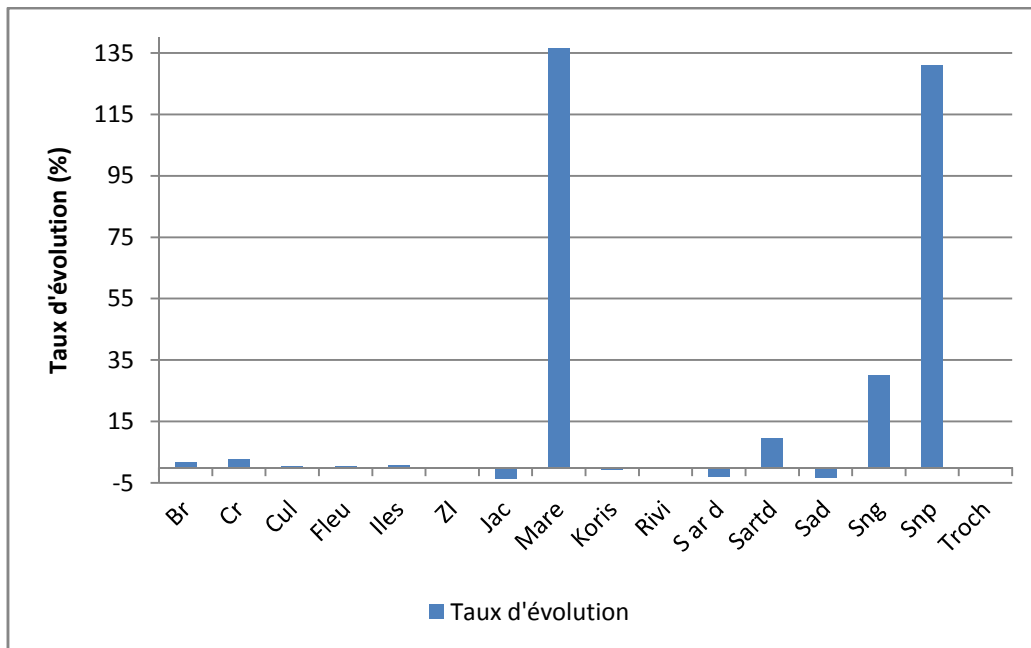


Figure 23 : Evolution des unités d’occupation des sols entre 1999-2010

Ce changement s’explique par une croissance et une pression démographique que connaît cette zone depuis quelques décennies avec le transfert des populations venues d’horizons divers. En effet, cette zone qui était protégée jusqu’en 1976 subit actuellement une pression sur les ressources liée à la présence de divers acteurs. Jusqu’en 1975, la densité humaine n’était que d’environ 4 habitants par km² sur l’ensemble de la commune de Tamou (Amadou, 1991) alors qu’elle a atteint les 19 habitants par km² depuis 2001 (INS, 2006). Cette forte densité a eu pour conséquences une dégradation accélérée des ressources naturelles suite à une extension des superficies cultivées (Souleymane Salaou, 2012 ; Issoufou Maman 2010 ; Souley, 2010 ; Amadou, 1995). Gorse (1985) souligne que la charge humaine compatible avec une activité agro-sylvo-pastorale extensive, sans dégradation du milieu (sol et biodiversité) est de 15 habitants par km² au Sahel. Bouzou Moussa et *al.* (2011) souligne que l’occupation du sol par le développement des surfaces cultivées et surtout défrichées favorise la formation de surfaces nues. Galle et *al.* (1999) mettent en évidence une diminution de la végétation naturelle de l’ordre de 38 % de 1950 à 1992 dans le terroir de Banizoumbou. Cette dynamique s’explique par une mise en culture intensive du milieu et un important déboisement afin de satisfaire les besoins d’une population à forte croissance démographique (Ringrose et Matheson, 1992 ; Raynaud, 2001). L’augmentation de la classe des sols nus de plateau et de glacis ainsi que celle de

cultures s'explique donc par la continuité du défrichement, et la pression qui s'exerce sur les superficies cultivées. Cette dynamique est à lier à la croissance démographique qui entraîne actuellement des nouveaux défrichements (Cf. photo 26), ce qui accélère selon une fragilisation du milieu (Vetaas, 1993)



Photo 26: Nouveau défrichement opéré en 2011 en amont du bassin du kori Tyala

Jusqu'en 1976 les cultures se localisaient autour des villages de Dyabou et Tyala Goungoundi qui constituent les plus anciens sites d'installation humaine de la zone. La colonisation agricole de cette zone explique le fait qu'en 1987 une bonne partie de l'espace cartographié est occupée par les cultures. Ceci met donc en évidence un changement lié en grande partie à des facteurs climatiques d'une part, et qui a fait en sorte que la zone de Tamou, Torodi ont été sollicitée pour absorber le flux migratoire vers la périphérie du Parc national de W du Niger (Mounkaila, 2005). Ces contraintes sont essentiellement les sécheresses des années 1970 et 1980 mises en évidence par le figure 1 (p. 48).

Et les facteurs sociopolitiques d'autre part : le déclassement de la partie nord de la réserve totale de faune de Tamou qui était un milieu protégé et servait de tampon au parc national de W du Niger. Ensuite, la période 1982-1992 a été marquée par une redistribution des terres en faveur des grands fonctionnaires et commerçants basés à Niamey (Souley,

2010). L'Etat a mis à leur disposition d'importants matériels pour le défrichement et la mise en culture. C'est donc cette politique qui est à l'origine de l'augmentation des zones cultivées. Amadou (1995) signale qu'entre 1956 et 1988, les cultures ont progressé de plus de 60 % sur le plateau sableux de Dyabou sur lequel se sont installés les immigrants. Entre 1984-1985 cette zone a vu aussi l'arrivée d'un important flux d'immigrants agricoles, mais aussi l'enclenchement d'un mouvement massif des éleveurs et des agriculteurs vers le sud frontalier au Parc du W est. De même les régions de Tillabéri, de Dosso et les pays voisins (le Mali, le Burkina Faso, le Nigeria) sont devenus des foyers d'émigration vers le sud à savoir les communes rurales de Tamou, Kirtachi et Falmey (Souley 2010). La situation de l'occupation des sols en 1999 a été marquée par une augmentation des superficies de jachère. Cela s'explique par la pression qui s'est exercée sur les terres mises en culture qui dans un court délai a entraîné leur dégradation d'où leur mise en jachère. L'importance des jachères en 1999 s'expliquerait par l'abandon de nombreux domaines par les fonctionnaires et militaires au profit des ouvriers qui ne peuvent les mettre en valeur que partiellement. D'autre part c'est lié à la baisse de la productivité des sols due à l'encroûtement qui entraîne baisse de l'infiltration. Tandis qu'à certains endroits des faciès cuirassés, l'abandon est le fait que les sols sont devenus incultes par affleurement de la cuirasse en forme de dalle synonyme de l'absence de sols. Cependant, la situation actuelle est marquée par la reprise du défrichement dans certains notamment dans le secteur de Dyabou et la partie de bassin du kori Tyala (photo 27).

Les analyses multi-temporelles, réalisées à partir d'images satellitaires à haute résolution (10 à 30 mètres de résolution spatiale) ont permis de mettre en évidence le changement dans l'occupation des sols et le processus de dégradation environnementale depuis le déclassement de la zone. Il ressort de cette analyse une diminution importante de la végétation naturelle et une augmentation remarquable de zone de culture et des vastes surfaces dégradées en l'occurrence les zones de déflation éolienne. Ce changement intervenu dans l'occupation des sols a eu des graves conséquences sur la dynamique des versants à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ».

3.2. La morphogénèse récente dans l'aire « *ayi noma* » : instabilité des versants du goroubi et de ses affluents

L'instabilité des versants dans l'aire «*ayi noma*» se manifeste à travers les processus morphodynamiques actuels sur les différentes unités topographiques. Elle s'inscrit dans un environnement physique favorable : (topographie, formations superficielles meubles présence de recouvrements quaternaires). L'instabilité ne saurait être entretenue si les conditions actuelles n'étaient pas favorables (contraintes climatiques et les changements intervenus dans l'usage des sols notamment suite à la colonisation agricole depuis 1976).

3.2.1. Les facteurs de l'instabilité des versants

Parmi ces facteurs, il y a d'abord l'homme qui a fragilisé les sols par la mise en culture avec comme conséquences, l'apparition des nombreuses ravines d'origine anthropique appelées « ravines pistes » (cf. photo 27). Valentin et *al.* (2005) montrent que les processus de formation des ravines sont accélérés par l'intensification de la mise en culture des terres. d'autres facteurs tels que les formations superficielles et le climat ont une influence certaine sur l'instabilité des versants dans l'aire « *ayi noma* ».



Photo 27: Ravine d'origine anthropique « *ravines pistes* » dans la partie amont du bassin de Tyala. Elle met en évidence l'impact des passages répétitifs de tracteurs

3.2.1.1. Les formations superficielles

(Macaire et Campy, 1989) définissent les formations superficielles comme "l'ensemble de sédiments et de roches exogènes et volcaniques, demeurés à l'interface lithosphère-atmosphère depuis leur mise en place sur les continents, disposés en une ou plusieurs unités d'épaisseur métrique à décimétrique avec ou sans relation génétique avec le substratum, mais étroitement associés à l'évolution du relief actuel dont ils sont l'expression lithologique".

Le tableau 6 donne la distribution granulométrique de divers échantillons prélevés dans l'aire « *ayi noma* ».

Tableau 6 : Texture et matière organique

N° échantillons	Argiles	Limons	Sables	MO	N° échantillons	Argiles	Limons	Sables	MO
1	5,15	29,77	65,08	0,94	13	6,82	20,05	73,13	1,24
2	3,32	27,39	69,29	0,64	14	3,78	19,39	76,83	0,55
3	4,05	25,77	70,18	0,69	15	4,85	19,17	75,98	0,17
4	5,23	21,77	73	0,73	16	1,85	13,37	84,78	0,35
5	5,23	23,98	70,79	0,86	17	1,23	14,79	83,98	0,41
6	2,64	18,55	78,81	0,28	18	2,85	19,47	77,68	0,22
7	2,23	21,78	75,99	0,25	19	3,15	26,28	70,57	1,38
8	6,4	28,79	64,81	0,55	20	1,43	11,69	86,88	0,41
9	8,65	30,37	60,98	0,41	21	1,98	13,54	84,48	0,28
10	6,55	24,46	68,99	0,62	22	1,42	13,75	84,83	0,21
11	3,15	17,28	79,57	1,11	23	1,88	18,05	80,07	0,21
12	4,85	22,23	72,92	0,86	24	1,82	16,09	82,09	0,17

Il ressort de l'analyse de ce tableau 6 que les formations superficielles dans l'aire « *ayi noma* » sont essentiellement sableuses avec un minimum de 70 % de sables. Or selon Lahousse (1996), la lithologie constitue le premier paramètre à prendre en considération dans la recherche et l'évaluation des facteurs de l'instabilité des versants. En outre, Calcagni et al. (1982), Cheikha Lilia et Moncef (2008) ont mentionné des facteurs tels, la lithologie et les formations superficielles, le climat, ... dans l'explication de l'instabilité des versants. La caractérisation de la dynamique actuelle à travers des transects montre que les formations sableuses apparaissent comme les plus affectées par le phénomène de ravinement (photo 28).

L'instabilité des versants du goroubi et ses affluents, pourrait être surtout liée à la nature des formations superficielles. Leur texture leur confère une fragilité naturelle élevée. Ces caractéristiques associées à la destruction quasi-totale de la végétation suivie d'une rapide occupation humaine sont les responsables majeurs de l'érosion accélérée dans l'aire « *ayi noma* ». En plus, la faiblesse de la matière organique des sols liée directement ou indirectement à la mise en culture et au déboisement réduit la stabilité structurale du sol et favorise l'encroûtement, le ruissellement et donc l'érosion dans ses diverses formes (Valentin *et al.*, 2004).

La plupart des unités géomorphologiques présentent des phénomènes érosifs de grande taille, sur le secteur où la mise en valeur est beaucoup plus intense (Dyabou et Tyala qui constituent les foyers d'installation de premiers immigrants). Peut-on conclure que ces dépôts éoliens (sableux) constituent la clé fondamentale de l'instabilité dans l'aire « *ayi noma* » ? Ces formations sableuses reposent sur un substratum cuirassé imperméable et sont mobilisées sous forme de boue une en raison de la concentration des eaux d'infiltration entre elles et la cuirasse. Cependant, ces formations ne sont pas les seules formations instables ; puisqu'au niveau de la terrasse, il s'avère que les formations argileuses sont aussi à classer dans les formations sensibles. En effet ces formations sont sujettes à l'instabilité par la dissolution et le soutirage qui conduisent à une généralisation du ravinement mettant ainsi en place un paysage de bad-lands (cf. photo 29).



Photo 28: Processus de ravinement sur des formations sableuses fossilisant le plateau



Photo 29 : Bad-lands sur matériel argileux en aval du bassin versant de « gorouizé »

3.2.1.2. Les conditions climatiques actuelles

Comme nous l'avons indiqué plus haut, le climat est caractérisé par une succession de périodes humides et sèches (Nicholson, 2001). Généralement violentes, les pluies liées à des convections locales jouent un rôle dans l'évolution des grands ensembles topographiques. Il se caractérise par la prévalence des événements pluvieux exceptionnels pouvant expliquer le processus morphogénétique actuel dans les deux bassins versants (*Tyala et gorou izé*) en particulier et dans l'aire « *ayi noma* » en général.

Le rythme annuel des précipitations est favorable au déclenchement du ravinement surtout en début de saison où les averses sont généralement brèves et violentes et s'abattent sur des sols sans aucune protection. Une des caractéristiques des pluies dans la zone sahélienne est leur agressivité (figure 24) donne la répartition temporelle d'une pluie survenue le 28 août 2010. Cet événement a duré 35 mn et enregistré 30,34 mm et dont l'intensité maximale en 5mn est 118,92 mm/h. Le ravinement se développe de plus en plus. Le suivi de quelques têtes de ravines à travers de repères naturels destinés à connaître la vitesse du ravinement dans le bassin du kori de Tyala met en évidence l'ampleur du phénomène. Cela a donné des résultats intéressants ou du moins pour certains événements pluvieux qui ont entraîné plusieurs dizaines de mètres de recul. Une pluie de 59 mm enregistrée le 20 août 2009 a entraîné un recul de tête de plus de 40.09 m pour la ravine T1.

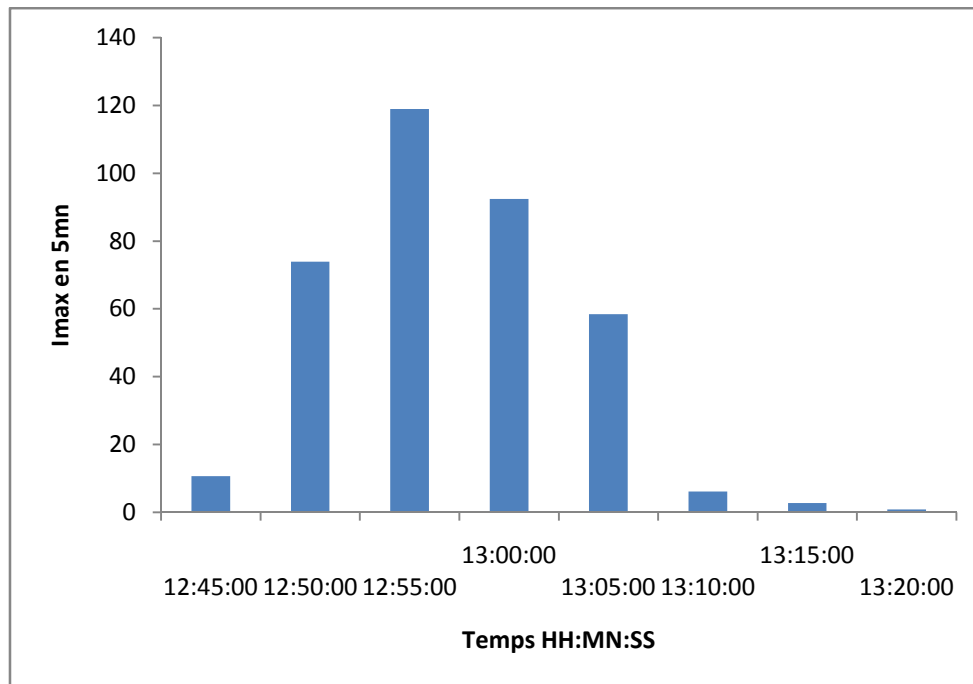


Figure 24: Hyétoqramme de la pluie du 28 août 2010

3.2.2. Les manifestations de la dynamique actuelle

Dans cette partie, nous parlerons surtout des processus qui régissent l'évolution des différentes unités topographiques ainsi que les formes actuelles observées. Cette démarche est essentiellement basée sur la synthèse de la caractérisation des unités géodynamiques à travers des transects. L'instabilité des versants dans l'aire « *ayi noma* » se manifeste par une généralisation du processus de ravinement sur presque toutes les unités.

3.2.2.1. Continuité et discontinuité des processus d'érosion dans l'espace et dans le temps

La question de continuité et discontinuité est fondamentale pour comprendre la diversité des processus de l'érosion aussi bien dans le temps que dans l'espace. Selon Di Méo et Veyret (2002), une discontinuité est une rupture nette, parfois brutale, affectant l'espace et permettant de mettre en évidence des formes géographiques plus ou moins stables : lieux, ... et qui influe sur la répartition des phénomènes mais aussi sur les dynamiques de l'espace géographique.

(Tricart 1978, et Roose, 1994) soulignent une discontinuité temporelle tout en montrant que les processus n'ont pas connu la même intensité. Cela résulte du temps nécessaire pour l'altération conditionné notamment par le climat mais aussi par la nature des matériaux en place. Tricart (1978) ajoute que les flux alluviaux sont caractérisés par de nombreux ratés, par des mises en marche et des arrêts qui peuvent durer de quelques jours à des centaines de milliers d'années.

Dans l'espace, contrairement à bon nombre des géographes qui raisonnent comme si les discontinuités qu'ils observent résulteraient toujours d'interventions extérieures brisant une continuité considérée comme normale François (1970), Brunet (1967) considère « les discontinuités dans la nature comme des choses » et qui ne requièrent pas nécessairement une action venue du dehors. Elles se marquent généralement par la présence des seuils points à partir desquels une évolution saute brusquement, en changeant de rythme, de sens, ou de nature ». Cette discontinuité spatiale se marque par des ruptures de pente le long des topo- séquences (Tricart, 1978). Il montre que le flux de la matière se fait de telle sorte que toute particule quittant un interfluve aboutirait au niveau de base après avoir ainsi contribué à l'évolution vers la pénéplaine finale. En 1994, Roose montre à travers la figure 19 une discontinuité des processus qui est fonction de la topographie et de l'emprise humaine.

Cette discontinuité spatiale des processus, est mise en évidence par la mise en culture et la pression anthropique Aussi, assiste-on en quelques décennies à un déséquilibre et à une dynamique érosive accélérée. La continuité et la discontinuité sont des notions qui se basent sur l'hypothèse selon laquelle, il existe pour un processus donné, une série de critères pouvant expliquer la variabilité spatio-temporelle.

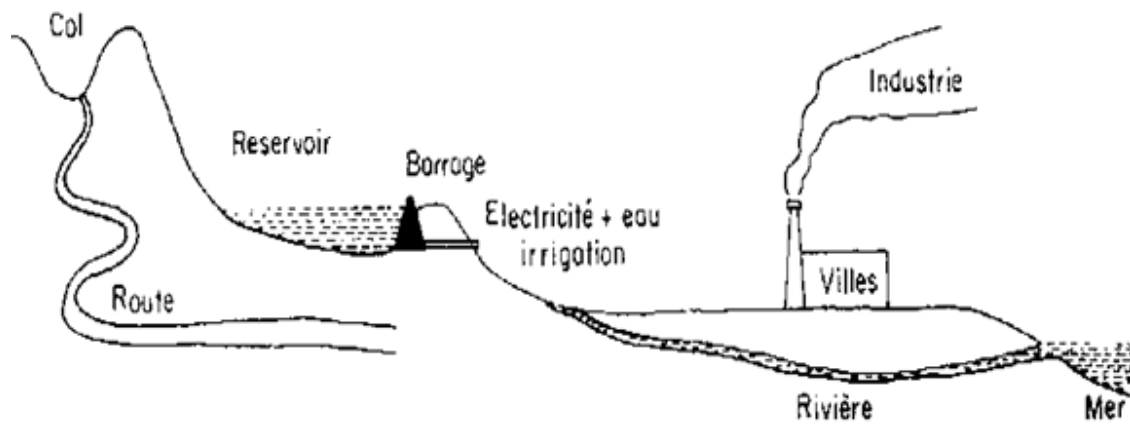


Figure 25 : Discontinuité des problèmes d'érosion dans l'espace (Source : Roose 1994)

La caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique dans l'aire « *ayi noma* » montre, qu'en fonction de la topographie et/ou de l'occupation du sol, il y a continuité des processus à l'exemple du ravinement qui remonte jusqu'au revers du plateau (cf. figure 20, 21, 22). Cette généralisation du ravinement sur les unités géodynamique est-elle synonyme de l'absence des discontinuités notamment les ruptures de pente. Ce type de discontinuité est mise en évidence à travers la typologie des versants dans le deuxième chapitre 2. Le versant type 1 avec un talus recouvert par la dune favorise la continuité du ravinement sur le plateau et exhume la cuirasse ferrugineuse. Ce versant se caractérise par la "quasi-inexistence" des talus. Ces derniers (généralement de faible commandement) sont presque totalement masqués par le prolongement des dunes sommet de plateau. En revanche, on note la discontinuité est observée dans les zones de accumulation avec l'annulation de la pente (photo 30).

Cependant, ces dépôts sont momentanés et donc transitoires car ils seront évacués par les prochaines crues. L'analyse des cartes géomorphologiques et dynamiques de l'aire « *ayi noma* » et les observations sur le terrain mettent en évidence deux catégories de processus qui régissent la dynamique actuelle, d'une part les processus communs affectant plusieurs unités géodynamiques (ravinement, déflation éolienne, le ruissellement en nappe et le ruissellement diffus) et d'autre part les processus spécifiques qui ne se manifestent que sur certaines unités topographiques.



Photo 30 : Sédimentation sur le lit du kori Tyala dans la partie médiane (ces alluvions ont été déposées lors de la crue du 18 au 19 août 2011)

3.2.2.2. Les processus communs

L'analyse de la dynamique à travers le ravinement, le ruissellement diffus, le ruissellement en nappe, la déflation éolienne sont les processus qui affectent l'ensemble de la toposéquence (cf. figures figure n ues caractéristiques caractéristiques 17, 18 et 19). Le ruissellement diffus et les ruissellement en nappe se manifestent surtout sur le plateau du fait de la faiblesse de la pente comme illustrent figures 17, 18 et 19 sur l'évolution des unités géomorphologique en 1987-1999 et 2010. Ce processus domine compte tenu de la végétation relativement dense à certains endroits comme dans le bassin de « Tyala gorou ou kori de Tyala » et surtout de nombreux placages éoliens. Associé à la déflation éolienne, ils forment sur le plateau des véritables impluviums (vastes surfaces de déflation) alimentant les ravines illustre la photo 31.

L'action du vent forme en plus de ces surfaces de déflation, des formes d'accumulation que sont les nebkhas. Ces derniers constituent essentiellement des accumulations des sables liées à la présence des obstacles. En effet, sur la surface du plateau ou sur les glacis on observe ces formes sur le côté au vent des touffes de végétation ou de blocs de cuirasse. Ces formes jouent un rôle important dans la dynamique actuelle

notamment sur la surface du plateau en freinant la vitesse du ruissellement et en le rendant surtout diffus ou anastomosé (photo 32).



Photo 31: Surface de déflation dans la partie amont du kori Tyala ; cette surface constitue un vaste impluvium aux eaux de ruissellement.



Photo 32 : Nebkhas et surface de déflation sur le faciès sableux du plateau

En outre, ces processus se manifestent aussi sur les autres unités partout où la pente le permet. Le ravinement est le processus le plus spectaculaire qui confère à certaine une état d'irréversibilité à l'image de ce qui se produit au niveau des bad-lands, sur les glacis érodés ou encore dans la partie amont du bassin Tyala. Dans cette partie du bassin, le ruissellement se fait par engorgement et creuse des "canyons " avec des profils étroits dont l'épaisseur de la berge peut atteindre 4 à 6 m de profondeur par endroit (voir photo 33). Ces processus de ravinement sont accélérés par l'intensification de la mise en culture des terres (Valentin *et al.*, 2005 ; Leblanc *et al.*, 2007). Afin de mieux appréhender la dynamique érosive et de l'instabilité des versants dans l'aire « *ayi noma* », un suivi de ravine a été effectué dans le bassin du kori Tyala. La figure 26 donne des résultats probants sur la vitesse de ravinement. Des arbres aux racines déchaussées (photo 35) le long des ravines sont autant de témoins de cette dynamique.



Photo 33 : Ravinement en amont du bassin du kori Tyala : profondeur moyenne 4 à 6 m.



Photo 34 : Déchaussement de racine

Cependant, il faut noter qu'entre 2007 et 2008 la ravine T1 a reculé de 29,30 m vers l'amont et que le recul observé en 2009 a été enregistré en une pluie notamment le 20 août 2009. En 2010, le recul observé pour la ravine T1 remonte jusqu'en amont du repère (témoin naturel). Ces résultats comparés à des mesures faites à Banizoumbou (figure 27) mettent en évidence l'intabilité des versants dans l'aire « *ayi noma* ». En effet, la plus grande valeur du recul mesurée à Banizoumbou en trois mois est sensiblement égale à la plus petite valeur du recul sur le site de Dyabou mesurée en un mois. La plus grande valeur mesurée est de 39.98 m occasionnée par la pluie du 20 août 2009.

De part l'analyse des figures n° 28, 29 et 30, met en évidence une généralisation et une intensification du processus de ravinement sur toutes les unités géodynamiques. En effet, on observe une continuité de l'érosion jusqu'aux sommets des plateaux entraînant une exhumation de la cuirasse ferrugineuse (photo 35).

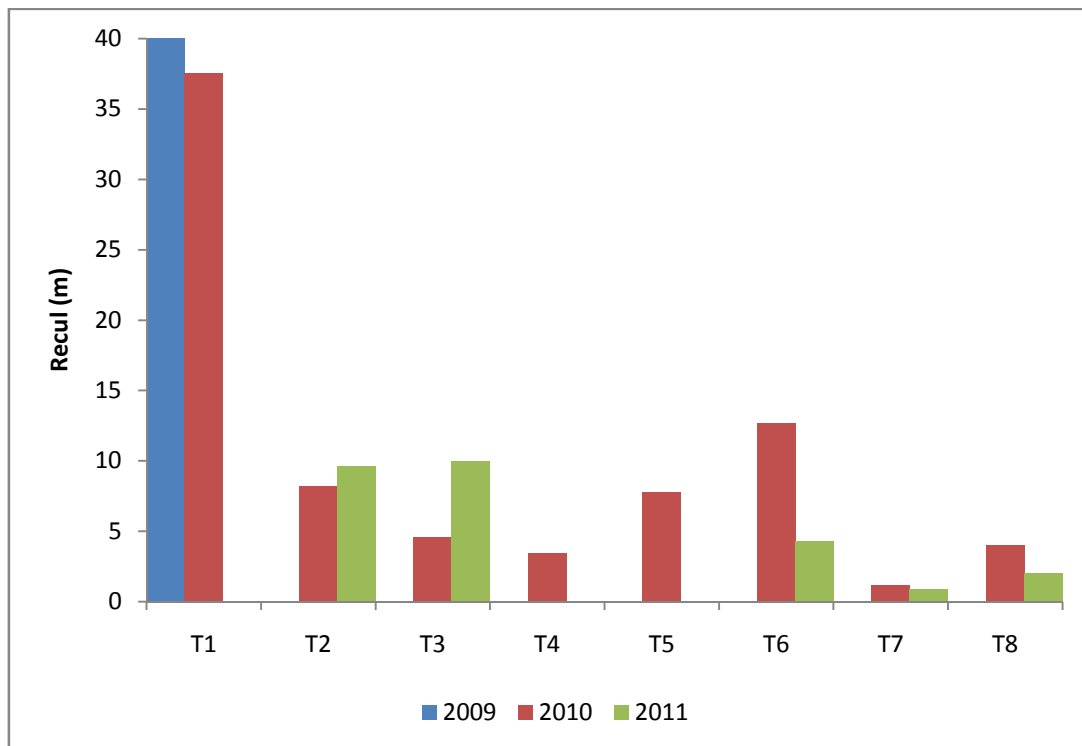


Figure 26: Evolution des ravines dans l'aire « *ayi noma* » de 2009-2011

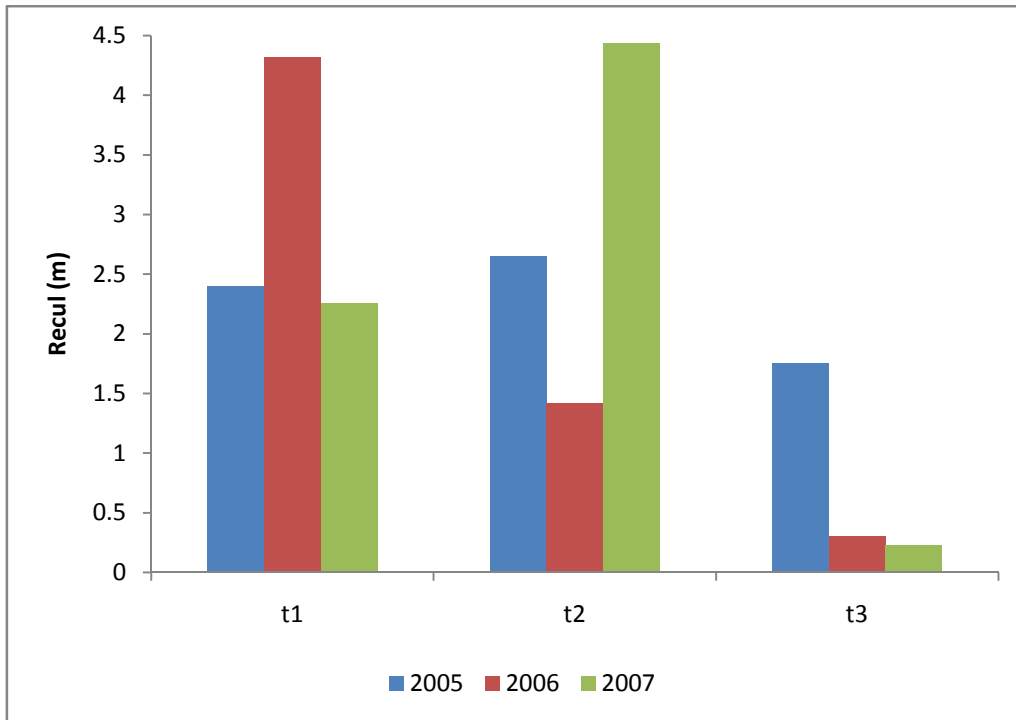


Figure 27: Evolution de quelques ravines à Banizoumbou (Source : Malam Abdou, 2007)



Photo 35 : Cuirasse ferrugineuse exhumée par érosion régressive et continue remontant le sommet du plateau.

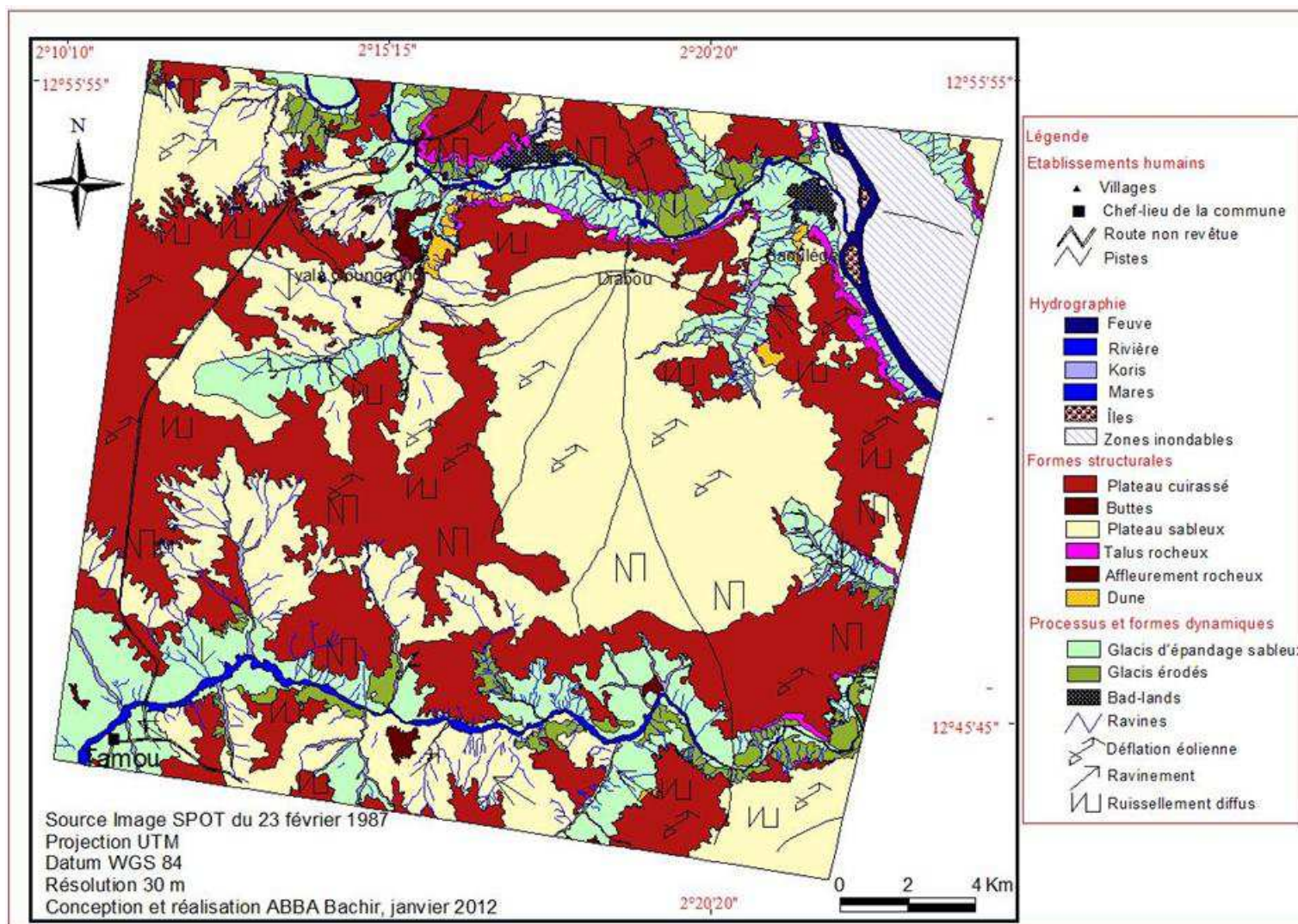


Figure 28: Carte géomorphologique et géodynamique de l'aire « ayi noma » en 1987

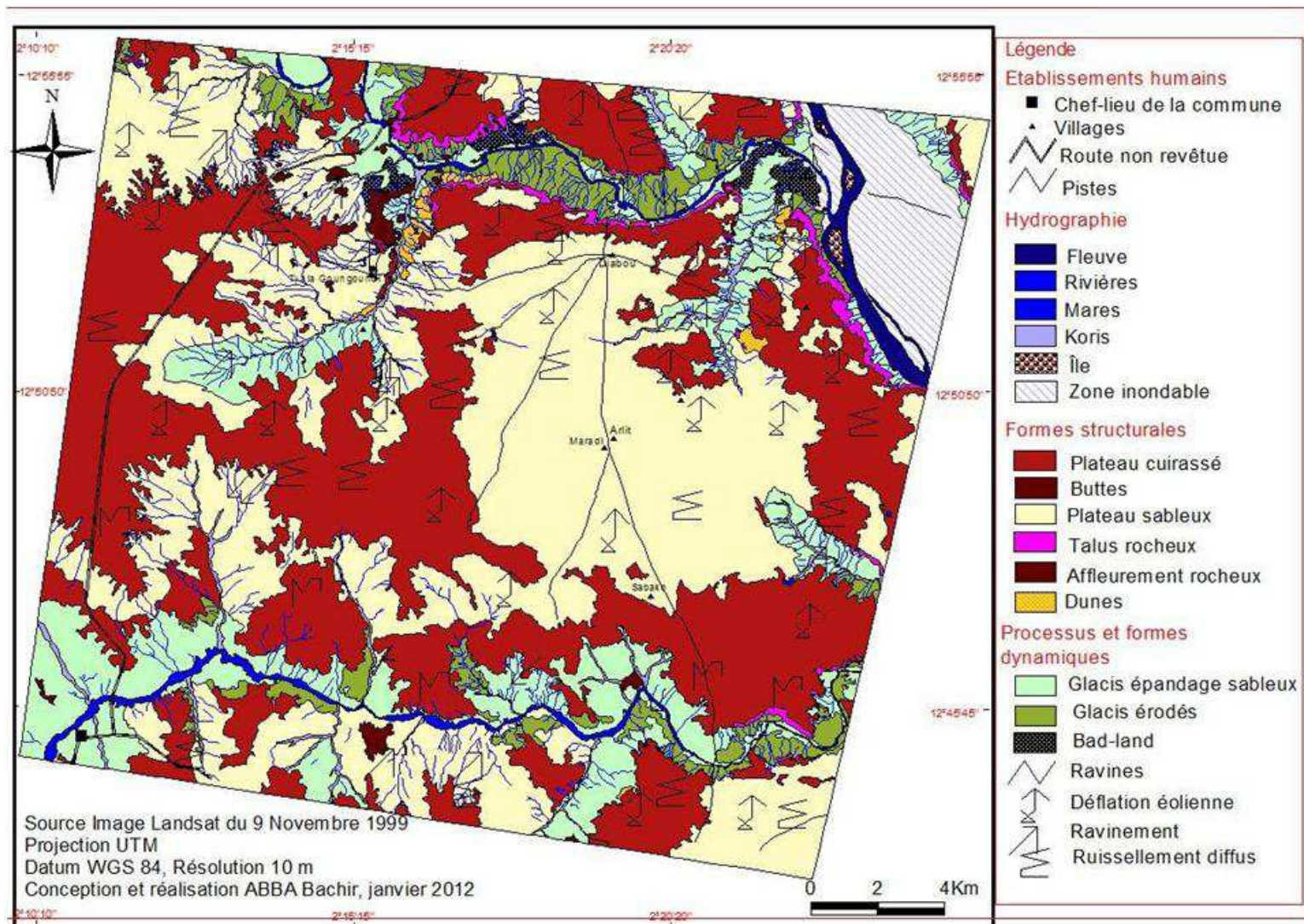


Figure 29 : Carte géomorphologique et géodynamique de l'aire « ayi noma » en 1999

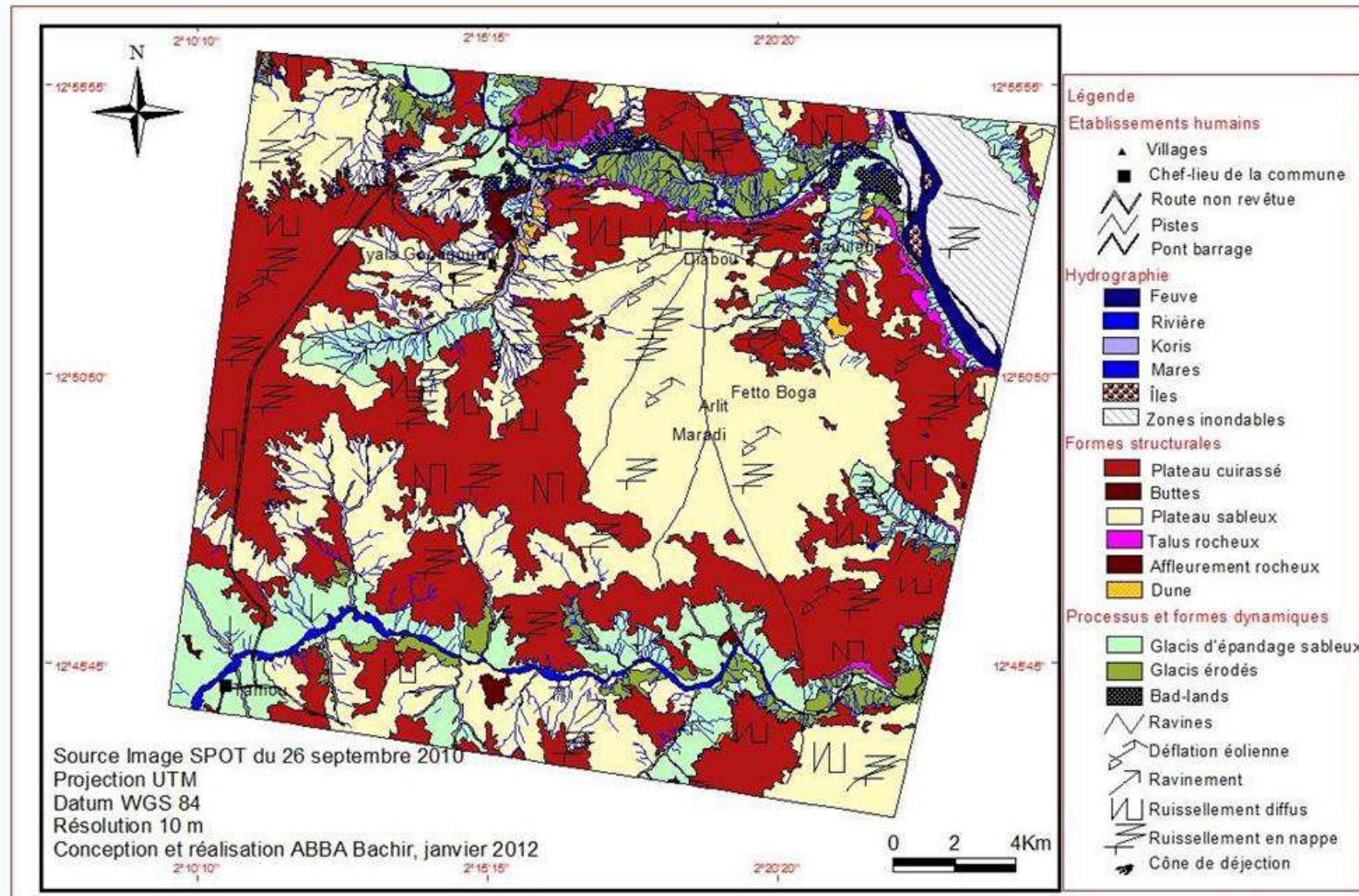


Figure 30: Carte géomorphologique et géodynamique de l'aire « ayi noma » en 2010

La dynamique sur la terrasse le long du goroubi se manifeste par un ravinement en tunnel lié à un soutirage à la base du matériel argileux : c'est le phénomène de suffosion (cf. photo 36). Le ravinement en tunnel, lié notamment à la nature des formations superficielles (matériel argileux). Selon Roose et *al.* (1999), les eaux circulant dans la masse du sol emportent les argiles ou les sels solubles et forment des cavités linéaires qui grandissent progressivement jusqu'à l'effondrement du toit. Ces ravines progressent par bonds après un travail de sape souterrain. Il se développe et évolue à un stade ultime qu'est la formation des bad-lands (Bouzou Moussa, 1988). Les tunnels se transforment en ravines par effondrement. La particularité de ce type de ravinement est qu'il colonise des grandes étendues, il est imprévisible et difficile à stabiliser.



Photo 36 : Phénomène de suffosion et ravinement en tunnel en aval du bassin versant du « *Gorou Ize* »

Comme précisé plus le ravinement est un processus continu dans l'espace, en ce sens qu'en certaines parties fossilisées par la dune, ce processus remonte jusqu'au revers du plateau. Dans les talwegs notamment dans les bas-fonds qui se caractérisent par une dynamique érosive par approfondissement de leur fond (kori de Tyala et « *Gorou Izé* ») le recul de leurs berges par effondrement et affouillement comme illustre la figure 31. Entre

1987 et 2010 la superficie du kori Tyala passe de 57,38 à 111,41ha soit une augmentation de près de 94,16% tandis que le nombre de ravines latérales a progressé de 19 à 27 entre 1987 et 2010 (Souleymane Salaou, 2012).

Cependant, pour le cas du « *gorou izé* »⁵, la dynamique de ce kori a pris de l'ampleur dans les années 1980 avec notamment la dégradation quasi-totale de la couverture végétale sur les versants qui a entraîné un accroissement du ruissellement d'où un encaissement de son lit vers l'aval épaisseur de la berge 3 m. Il forme aujourd'hui avec le Goroubi un cône coalescent à la confluence avec le fleuve Niger alors qu'en 1987, ce kori n'atteint le fleuve que sous forme de ruissellement en nappe. Il connaît actuellement une intense érosion comme en témoigne une paysanne « *wane manti gorou ize ne, atey gorou bambata* »⁶. Nos observations confirment le témoignage des populations qui souligne que la dynamique de ce kori est indissociable à la dynamique de l'occupation des sols et ses conséquences, notamment l'encroûtement et le phénomène de ravinement dans l'aire « *ayi noma* ».

⁵ Filet d'eau en Zarma, ou encore petit kori en comparaison avec le goroubi communément appelé gorou.

⁶ C'est-à-dire que ce kori n'est plus au stade de filet d'eau, il est devenu un grand kori.

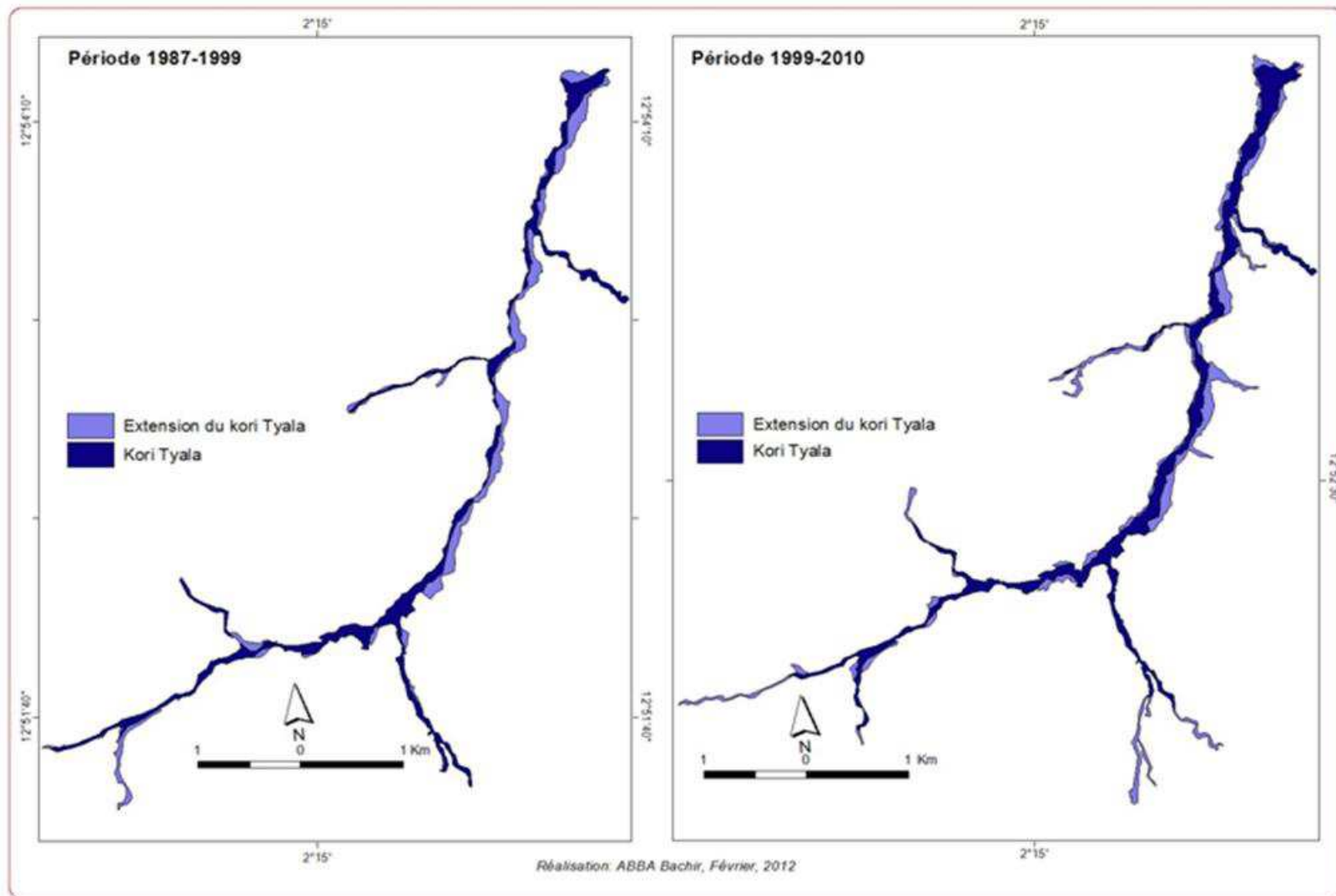


Figure 31: Dynamique du kori Tyala de 1987-2010

3.2.2.3. Les processus spécifiques

Il s'agit ici d'identifier et de caractériser les processus qui ne s'observent que sur certaines séquences topographiques. Sur les plateaux cuirassés et leur talus, l'évolution géomorphologique actuelle, se caractérise par le démantèlement de la cuirasse sous l'effet des actions physico-chimiques et mécaniques d'où la formation de reg que constituent les grandes surfaces planes à manteau gravillonnaire (photo 37) tandis que les talus sont recouverts d'éboulis (photo 38).



Photo 37: pavage gravillonnaire sur le faciès cuirassé du plateau lié à la fragmentation de la cuirasse



Photo 38 : Talus d'éboulis

Outre ce processus physico chimique qui est spécifique aux plateaux, dans les bas-fonds la dynamique est surtout marquée par une importante sédimentation au niveau des cônes de déjection du kori Tyala à sa confluence avec le goroubi (cf. photos 39 et 40). Les cônes sont des formes de déposition là où les koris débouchent dans la vallée principale et où ils finissent leur cours. Ayant la forme d'éventail et une pente d'environ 5% en général, ils contiennent des matériaux grossiers qui sont brusquement déposés à cause de la variation forte de la pente (Ulysse, 2008). Les cônes de déjection constituent les lieux où les eaux de ruissellement perdent leur vitesse et une partie de leur capacité de charriage. Ces formes sont observées tout au long de deux principaux affluents du goroubi. L'instabilité des versants est aussi mise en évidence par d'importants cônes latéraux le long des koris (figure 32).

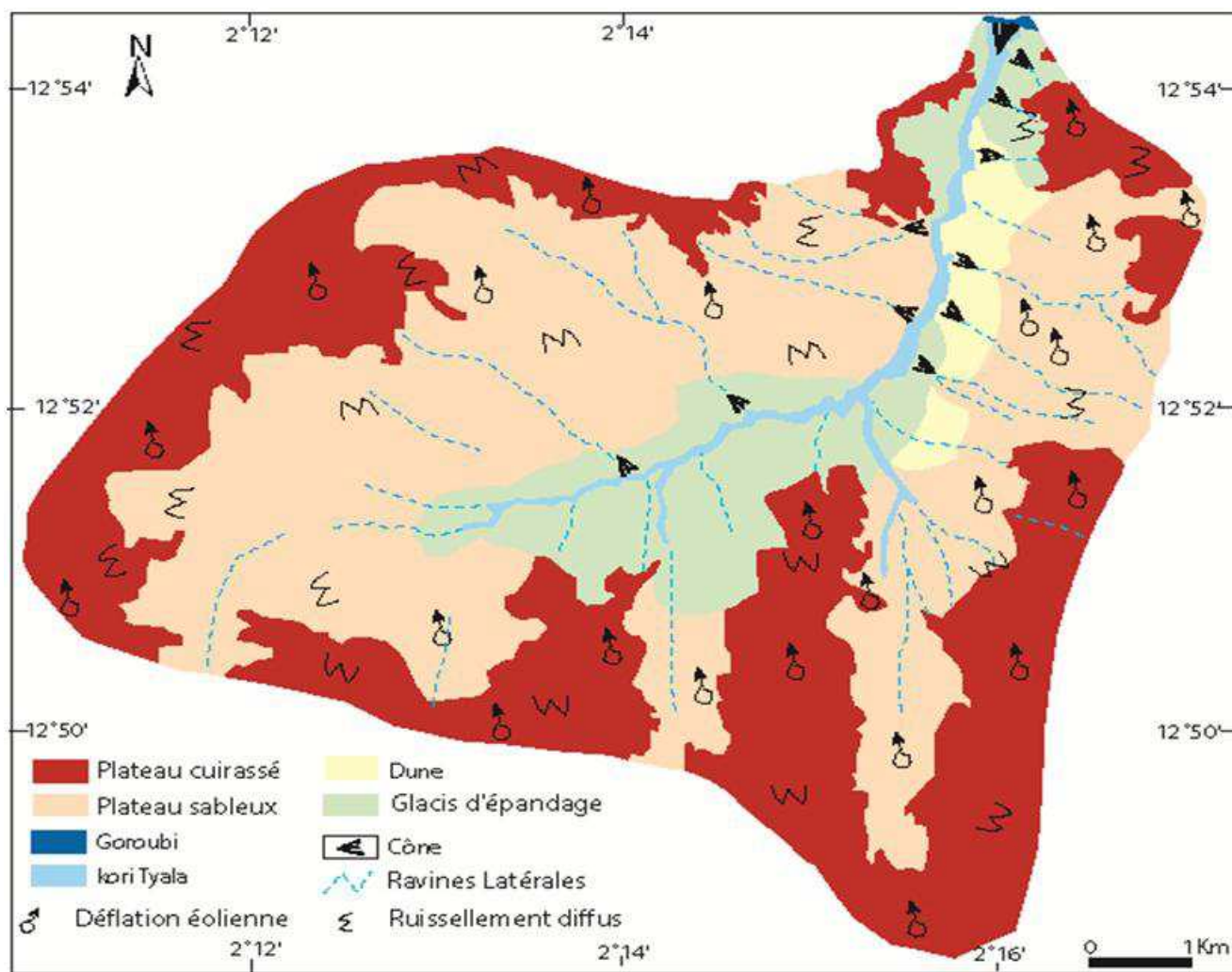


Figure 32: Carte géodynamique du bassin du kori Tyala (2010) Souleymane Salaou 2010 modifié



Photo 39 : Importante sédimentation sur le cône de déjection à la confluence du kori Tyalagoroubi (plus de 2 m d'épaisseur pour ce dépôt de la crue du 19 août 2011)



Photo 40 : Front du cône de déjection à la confluence "Gorou Ize"-goroubi/fleuve Niger (mars 2011) épaisseur dépôt 1,55 m

Etant donné que ces dépôts sont en perpétuel remaniement lors des événements pluvieux occasionnant des grosses crues, ils sont charriés vers le fleuve contribuant ainsi à son ensablement. Les figures 33 et 34 mettent en évidence la dynamique topographique et le processus de l'ensablement du fleuve. La figure 35, représente l'évolution des dépôts entre 2010-2011. Elle montre les secteurs ayant connu une accumulation des sédiments, et ceux ayant connu une érosion de leur surface. Elle met aussi en évidence que l'érosion l'emporte sur l'accumulation.

La dynamique a été évoquée par divers auteurs (Mamadou, 2012 ; Le Breton, 2004 ; Malam Abdou, 2005). Elle a essentiellement pris de l'ampleur du déboisement opéré sur les sommets de plateaux. La dynamique hydro sédimentaire des koris et même du fleuve se traduit par d'importantes conséquences hydro géomorphologiques tant dans la vallée que dans les bassins versants des koris (Mamadou, 2012). Sur les versants cela se traduit une érosion aussi bien régressive que latérale assurant le décap. ainsi que le transport des sédiments vers l'aval. Dans l'aire « *ayi noma* », on observe diverses formes de ravines. De ravines en "U" dans les secteurs non couverts par une végétation efficiente tandis dans les secteurs où les cordons ripicoles sont développés, se forment les ravines en "V" avec des berges étroites. Cette dynamique se traduit

aussi par le développement des cônes latéraux, et surtout par l'ensablement du Goroubi et du fleuve Niger (cf. photos n° 39 et 40).

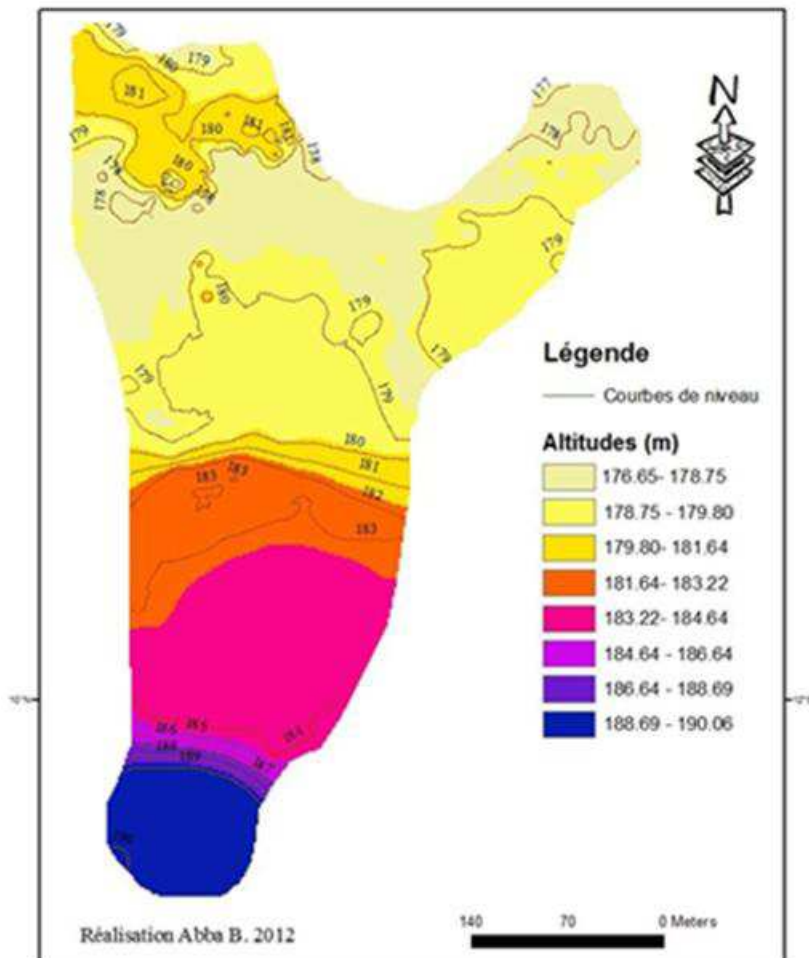


Figure 33: Dynamique topo sédimentaire du cône du kori Tyala en 2010.

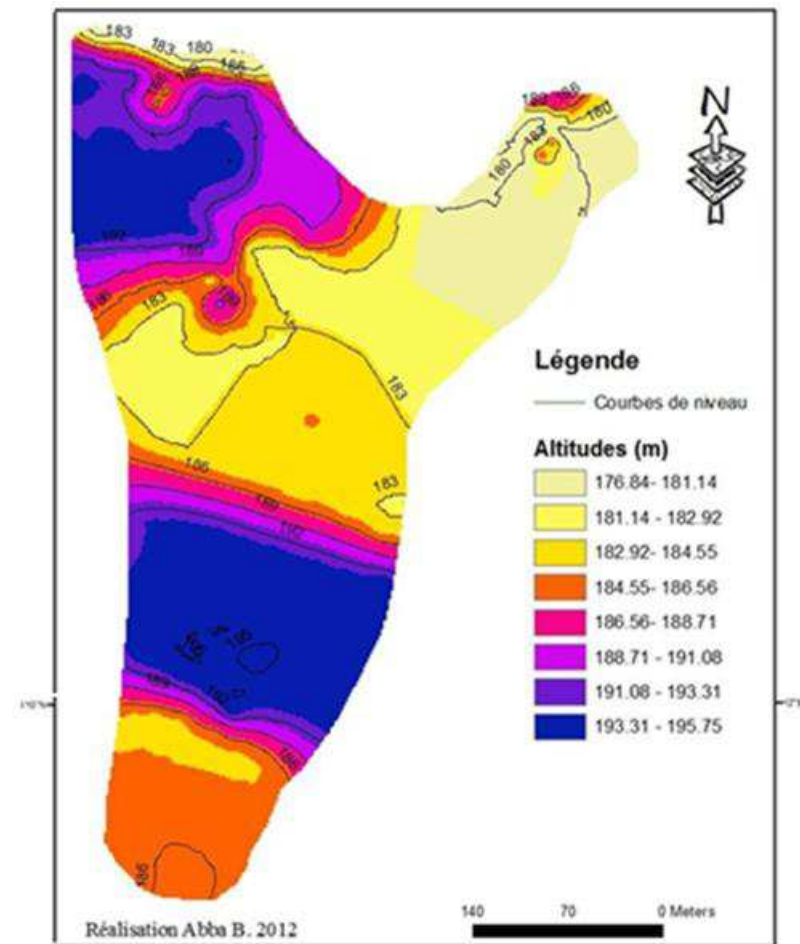


Figure 34 : Dynamique topo sédimentaire du cône du kori Tyala en 2011.

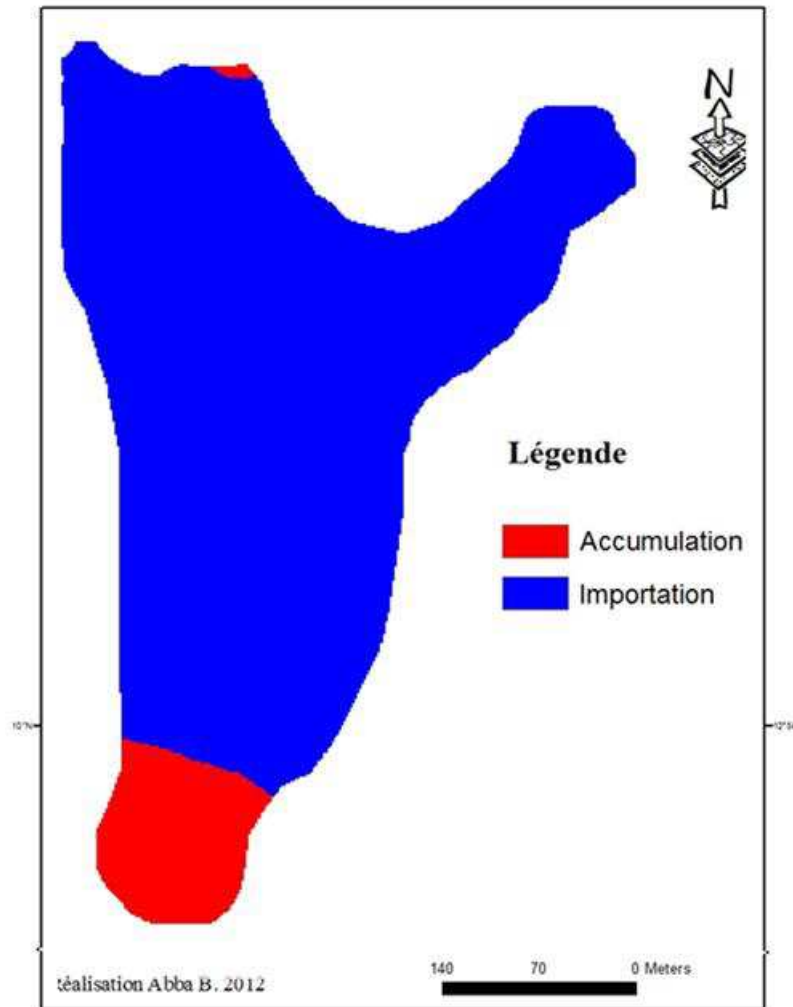


Figure 35 : Bilan sédimentaire du cône du kori Tyala entre 2010-2011.

Le cubage de la surface de ce cône donne des résultats probants (figure 36) sur le transfert des sédiments vers l'aval. Etant donné que la superficie du cône est de 11,83 ha et pour épaisseur moyenne de 1,15 m sur l'ensemble de la surface cubée, le volume des sédiments récents déposés à la surface du cône est estimé à 136060,82 m³.

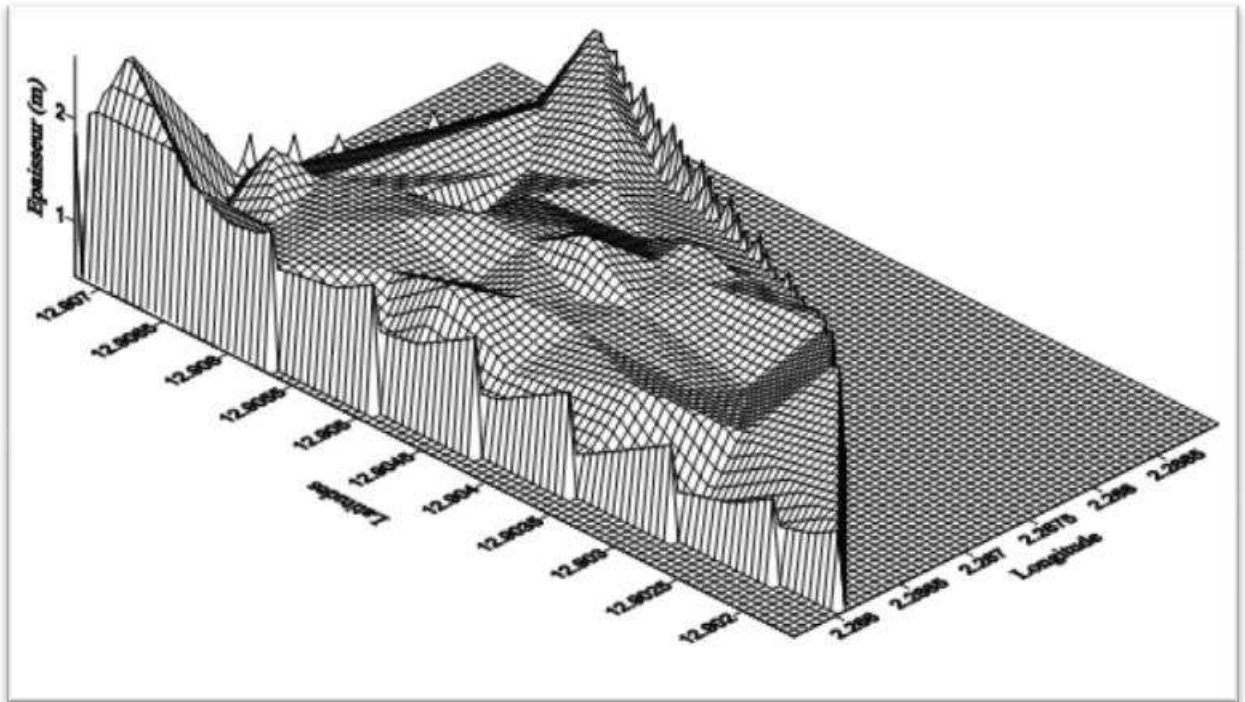


Figure 36: Numérisation du cône de kori Tyala

La mesure des concentrations en MES est réalisée par décantation puis séchage à 105° c (AFNOR T90-105, 1994). Les résultats obtenus au cours de la campagne 2009 et 2010 sont donnés par les figures 37 et 38. Les données concernent les concentrations en mg/l. Les données ne sont donc pas rapportées à un quelconque débit liquide. Les premières interprétations laissent penser que c'est en début de saison et généralement suite à des événements locaux que les concentrations sont à leur maximum. Mais aussi que le niveau d'eau est plus bas. Ces concentrations peuvent dépasser les 800 mg/l et atteindre 2400 mg/l. Enfin de la saison, les concentrations baissent variant entre 100 et 600 mg/l. On note enfin que les pluies locales influencent les concentrations, puisque des fics sont généralement observés pour les prélèvements qui suivent ces événements pluvieux.

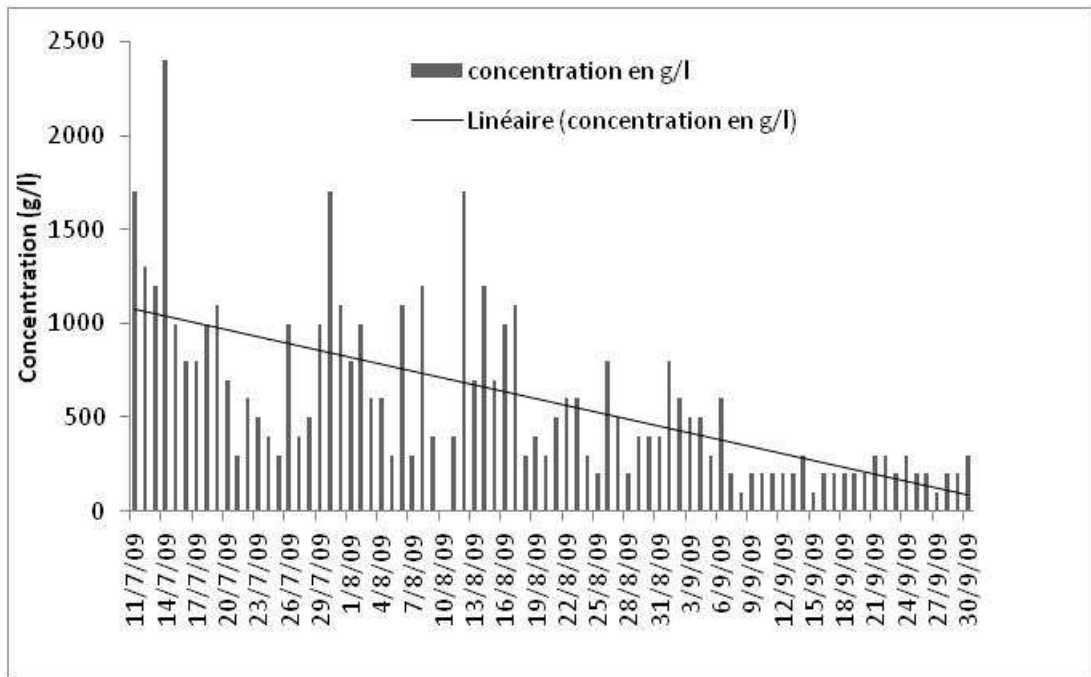


Figure 37: Evolution des flux des MES dans le goroubi en 2009.

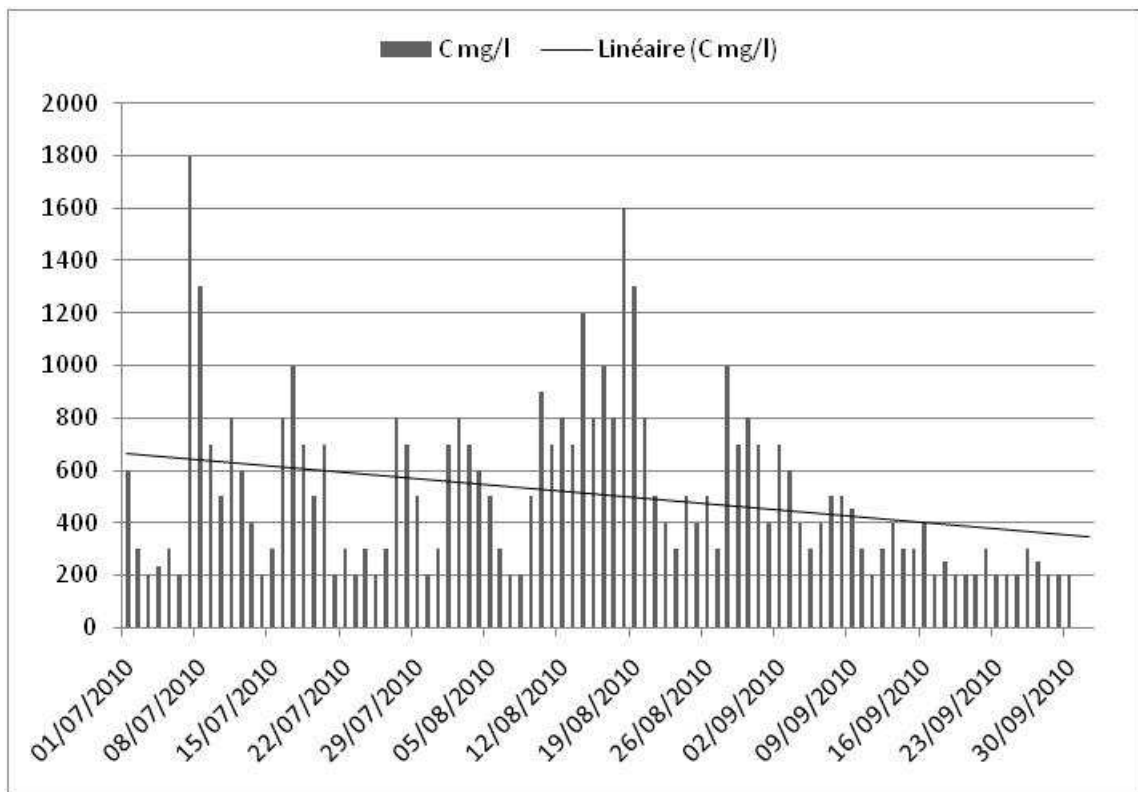


Figure 38: Evolution des flux des MES dans le Goroubi en 2010

La courbe de tendance montre une régression des concentrations par litres. Ainsi donc à débits égaux, les flux de MES sont beaucoup plus élevés en début de saison qu'en fin de saison. Pour la deuxième année, nous avons prélevé des échantillons dans le « *Gorou Ize* » et une ravine latérale en vue toujours de la caractérisation de la turbidité, mais notons que ce prélèvement n'a concerné que quelques pluies. Les concentrations par litre semblent beaucoup plus élevées dans la ravine avec une moyenne de 2500 2700 mg/l comparativement à celles du « *Gorou Ize* ». Celles-ci qui sont similaires aux concentrations observées dans la Goroubi.

Les observations directes sur le terrain ainsi que la cartographie évolutive de l'occupation des sols ont permis de mettre en évidence l'impact de la mise en culture de l'aire « *ayi noma* ». Cette inquiétude a été déjà évoquée par Pias (1976) qui conclut qu'au vu de ce qui se passe le long des vallées secondaires à l'image du kori Tyala, il n'est pas exclu que celle-ci se déclenche au moment de la mise en culture sur les pentes les plus fortes (supérieures à 6 %).

Afin de mieux comprendre la dynamique actuelle dans cet espace anthropisé, nous avons effectué pendant trois ans des mesures de ruissellement et érosion sur parcelles expérimentales. Le chapitre qui va suivre présente les résultats de ces mesures qui ont portées sur différents états de surface et/ou d'occupation des sols ainsi qu'à l'étude des impacts de la bande enherbée (ligne d'*Andropogon gayanus*) sur les taux de ruissellement et d'érosion.

Chapitre 4 : Étude expérimentale du ruissellement et de l'érosion à l'échelle des parcelles et effet de la lutte antiérosive biologique

Dans notre démarche, la quantification du ruissellement et de l'érosion a été retenue en vue d'estimer la contribution de tel ou tel état de surface ou type d'occupation des sols dans la dynamique d'ensablement du fleuve Niger. En effet, l'érosion hydrique des sols est une cause de dégradation majeure des terres au Sahel. En outre comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, cette étude vise à tester les effets des techniques antiérosives biologiques sur un petit bassin versant (le « *Gorou Izé* »). Ainsi, la connaissance de ces facteurs permettra d'aborder plus tard les questions de spatialisation des risques érosifs à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ».

4.1. Présentation du bassin expérimental : le bassin du « *Gorou Izé* »

Les parcelles expérimentales sont installées dans le bassin versant du « *Gorou Izé* ». C'est un affluent du goroubi dans sa partie aval qui couvre une superficie de 43.8 km² (Issoufou Mamane, 2010). Ce bassin est soumis à l'influence d'un climat sahélien (pluviométrie moyenne 650 mm) et à une forte pression anthropique. Ce bassin s'étend entre 12°49' et 12°55' N et 2°18' 2°23' E (figure 39). Il se jette dans le goroubi au niveau de sa confluence avec le fleuve Niger en formant un cône de déjection. Ce bassin se caractérise par ses paramètres morphométriques (tableau 7) calculés ou mesurés sur la carte topographique au 1 : 50.000 feuille de Kirtachi 3 d.

Tableau 7 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de « Gorou Izé »

Caractéristiques	Paramètres mesurés	Unités	Valeur
Morphologie des bassins versants	Périmètre du BV	Km	29,75
	Superficie du BV	Km ²	43,8
	Indice de compacité		1,2
Relief	Altitude maximale	m	232
	Altitude minimale	m	182
	Altitude moyenne	m	207
	Pente moyenne	%	0,74
Hydrographie	Longueur du cours d'eau principal	km	12
	Longueur totale des cours d'eau	km	34,2
	Densité de drainage	Km/km ²	1,28

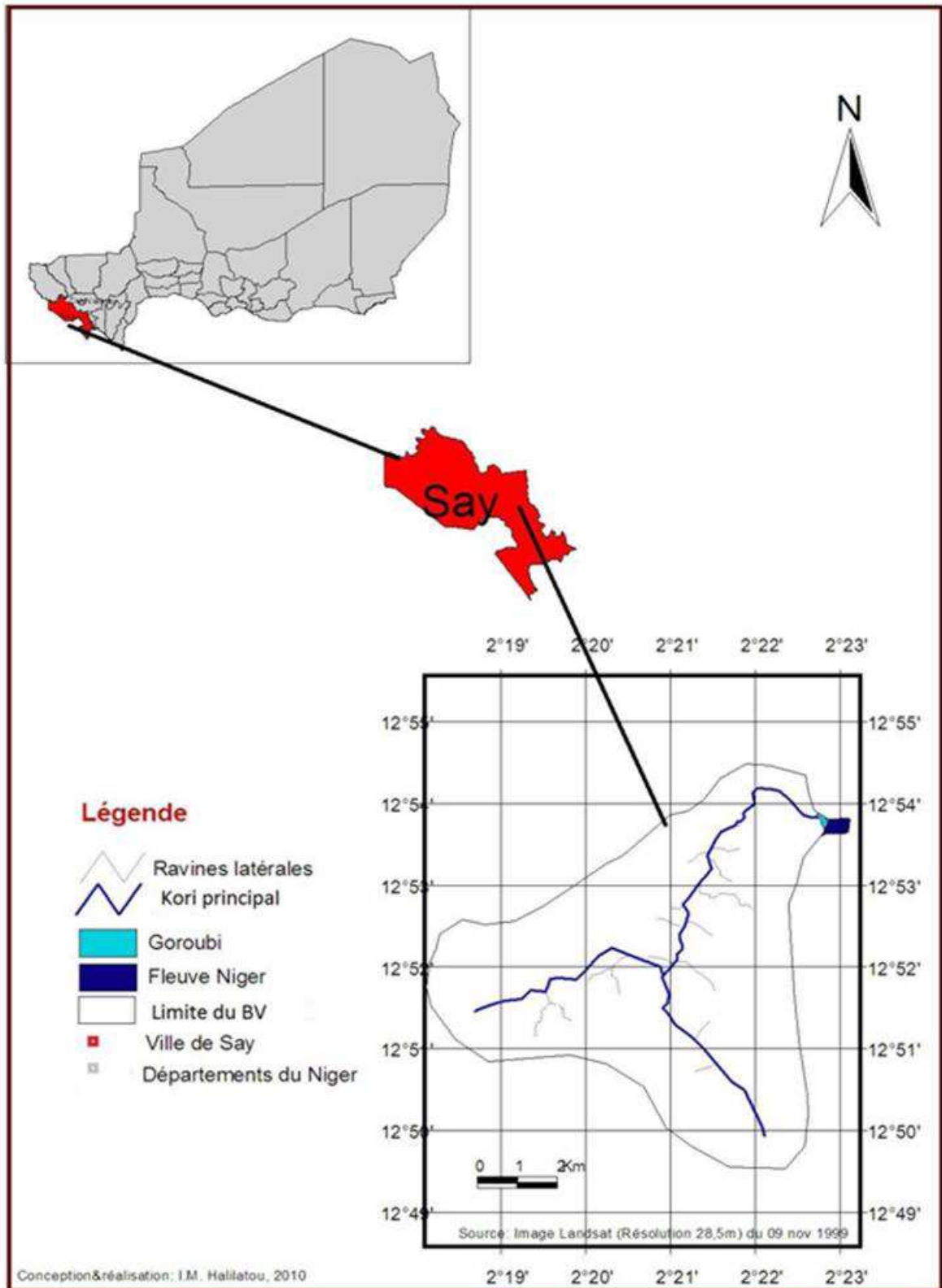


Figure 39 : Carte de localisation du bassin du « *Gorou Izé* »

Extrait de carte topographique au 1 : 50.000 feuille de Kirtachi 3d (Issoufou Mamane, 2010)

4.2. Ruissellement et érosion potentiels

L'érosion hydrique des sols est une cause de dégradation majeure des terres au Sahel (Touré 2010). Le ruissellement est défini comme la fraction de la quantité de pluie tombée qui ne s'infiltré pas et qui, dans les parcelles expérimentales, est recueillie dans la cuve Bouzou Moussa (1988). De façon classique, on distingue deux processus de génération du ruissellement de surface : les processus de type hortonien (Horton, 1933 ; Beven, 2004) et les processus par excès de saturation. Selon le premier modèle dit hortonien, le ruissellement débute lorsque la pluviométrie dépasse la capacité d'infiltration du sol, ce qui peut se produire plus ou moins rapidement selon l'intensité et la durée de la pluie, mais aussi selon la nature et l'état du sol (SRICAC, 2003). Cette dernière évolue au cours de l'averse entre la capacité d'infiltration initiale et la capacité d'infiltration à saturation du sol. Le second est généré par un dépassement de la capacité de stockage. Il a lieu lorsque le sol dépasse, durant une averse donnée, ses capacités de stockage et de transmission latérale et verticale du flux d'eau (Kingumbi, 2006). Chacun des deux processus de génération du ruissellement est fonction du type de climat, même si par ailleurs ils peuvent avoir lieu sur un même bassin et pendant un même épisode pluvieux (Wotling, 2000).

Une distinction a été faite entre ces deux processus générateurs de ruissellement tableau 8 (Wotling 2000).

Tableau 8: Distinctions entre les processus de génération du ruissellement (Wotling, 2000)

	Refus d'infiltration	Excès de saturation
<i>Seuil</i>	intensité	volume
Processus	soustractif	multiplicatif
Origine	saturation par le haut	saturation par le bas
Pédologie	sol peu perméable	sol perméable
Localisation	généralisé, versant	localisé, dépression, talweg
Climat	zone aride	zone humide

Parmi ces processus celui qui nous concerne est le type hortonien qui est prédominant dans les régions arides. Il est conditionné par l'état du sol (rugosité, encroûtement, présence de la végétation, humidité) ainsi que la forme de l'averse. Pour un sol dans un état donné, une averse de faible intensité générera un volume ruisselé plus faible que la même quantité de pluie tombée à des fortes intensités (Peugeot, 1995).

L'érosion qui constitue la perte en terre occasionnée par une averse est fonction de l'agressivité climatique et des paramètres liés notamment à la protection par un couvert végétal, son état d'humidité avant la pluie, de la résistance à l'effet splash. L'érosion stricto sensu se définit selon ROOSE (1981) comme le flux de particules solides arrachées à la surface du sol en tonnes par hectare et par an, mais aussi le ruissellement, lequel constitue le flux liquide qui transporte (et parfois arrache) ces particules.

L'étude du ruissellement et de l'érosion a été menée sur des parcelles choisies suivant les états de surface les plus représentatifs de la zone. Il s'agit de la croûte d'érosion du champ de mil et de la croûte gravillonnaire des sommets de plateau. Comme nous l'avons précisé plus haut le choix a été porté sur le bassin du « *Gorou Izé* » un bassin de 43.8 km² (figure 39).

Les mesures menées au cours des campagnes hydrologiques 2009-2010 et 2011 ont montré que les valeurs de Kr et celles du KRAM diffèrent d'une année à l'autre mais aussi d'un type d'occupation du sol ou d'état de surface à un autre ainsi que le type d'aménagement.

4.2.1. Ruissellement et érosion sur la croûte d'érosion

Dans cette zone semi-aride essentiellement sableuse où les états de surface significatifs évoluent très rapidement, la formation des croûtes superficielles joue un rôle primordial sur le déclenchement du ruissellement et de l'érosion (Casenave et Valentin, 1989). La croûte d'érosion se caractérise par une absence totale de la végétation à sa surface et son induration. Ces caractéristiques lui confèrent une aptitude élevée au ruissellement. En effet, l'encroûtement modifie rapidement les propriétés hydrauliques

de surface, en particulier le taux d'infiltration à travers l'épaisseur de la croûte et/ou sa conductivité hydraulique (Ambouta, 1994 ; Ambouta *et al.*, 1996). La figure 40 met en évidence l'évolution des coefficients de ruissellement sur la croûte d'érosion en 2010.

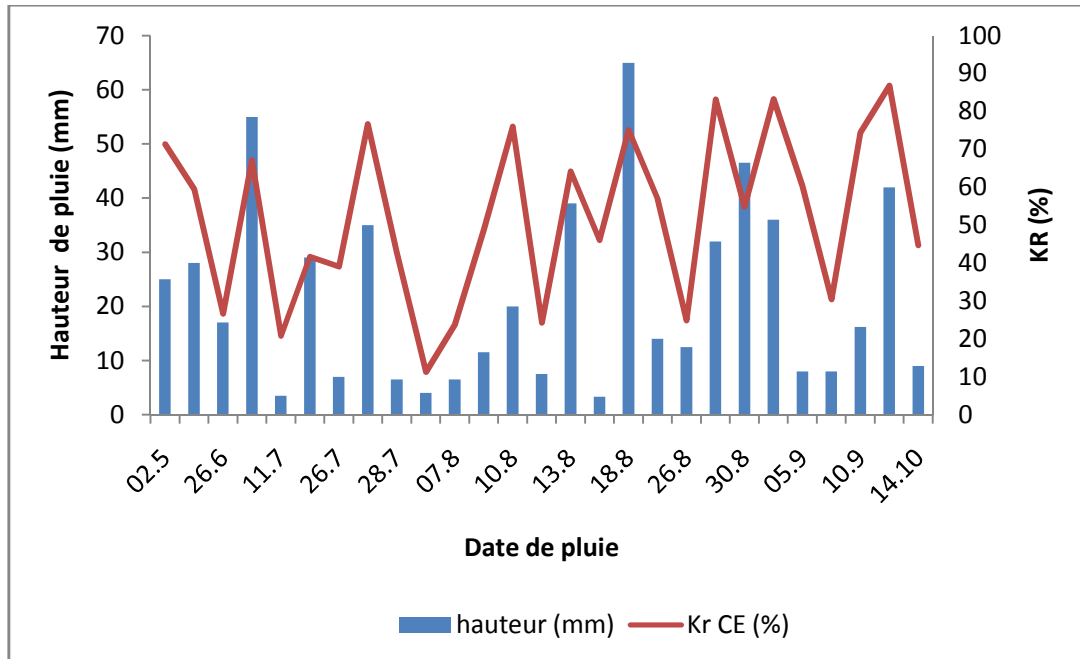


Figure 40: Comparaison entre hauteur des pluies et les coefficients de ruissellement des parcelles de la croûte d'érosion de l'année 2010

L'analyse de la figure 40 caractérisant le ruissellement par événement pluvieux montre le rôle de la croûte d'érosion dans le déclenchement du ruissellement. Par son caractère nu, elle demeure l'état de surface qui ruisselle plus. Le développement de la croûte induit une forte aptitude au ruissellement. De 2009 à 2011, sur les 85 pluies enregistrées les 90 % ont ruisselé sur la croûte d'érosion. Le KRMAX varie en général entre 80 et 90 %, mais a atteint la valeur exceptionnelle de 99,74 % le 21/08/2011⁷.

Le coefficient de ruissellement annuel moyen KRAM est de 55,2 et 41,4 % sur trois ans d'observation respectivement sur les parcelles aménagée et non aménagée. Pris individuellement, le KRAM est dans la plupart des cas proportionnel à la hauteur de la pluie (figure 40). Il varie entre 3,77 et 99.74 % la parcelle témoin. Sur cet de surface,

⁷ Le volume tombé sur la parcelle est presque totalement recueilli en aval dans les fûts

la hauteur et l'intensité de la pluie restent les seuls paramètres susceptibles de varier le coefficient de ruissellement. 3,5 mm de pluie suffisent pour que se déclenche le ruissellement. En fonction de son intensité, une hauteur de 3,57 de 4,82 mm ont produit respectivement un KR de 44,08 et de 9,75 %. Le développement de ces surfaces nues joue un rôle fondamental dans l'augmentation des ruissellements sur les versants en zone sahélienne (Albergel, 1987 ; Lamachère, 2000 ; Descroix et *al.*, 2005 ; Mamadou, 2006 ; Malam Abdou, 2007). Casenave et Valentin (1992) ont montré que les croûtes superficielles déterminent l'ampleur du ruissellement.

Ainsi l'effet du cumul vers l'aval de la lame d'eau ruisselée mise en évidence par (Chevallier et Planchon, 1993) s'est traduit par l'apparition de griffes d'érosion sur l'une de parcelles sur croûte d'érosion (photo 41). A ce propos Peugeot (1995) stipule que la partie de la parcelle est susceptible de subir l'action déflatrice du ruissellement que la partie amont.



Griffe d'érosion en aval de la parcelle croûte d'érosion

Photo 41: Formation d'une griffe liée à l'effet du cumul vers l'aval de la lame d'eau ruisselée

Les pertes en terre annuelles extrapolées à l'hectare sont estimées à 18,95 t/ha/an en moyenne mis à part quelques pluies perdues. Les pertes en terre sont en général proportionnelles à la hauteur de la pluie et au coefficient de ruissellement comme le montre la figure 41. Le taux d'érosion sur la parcelle aménagée est estimé à 8,38 t/ha/an. Il ressort de l'analyse de la figure 42 que c'est plutôt la hauteur de la pluie détermine le taux d'érosion mais pas le ruissellement ($R^2 = 0,841$) tandis que la relation liant le ruissellement aux pertes en terre n'est pas étroite ($R^2 = 0,42$) (cf. figure 43).

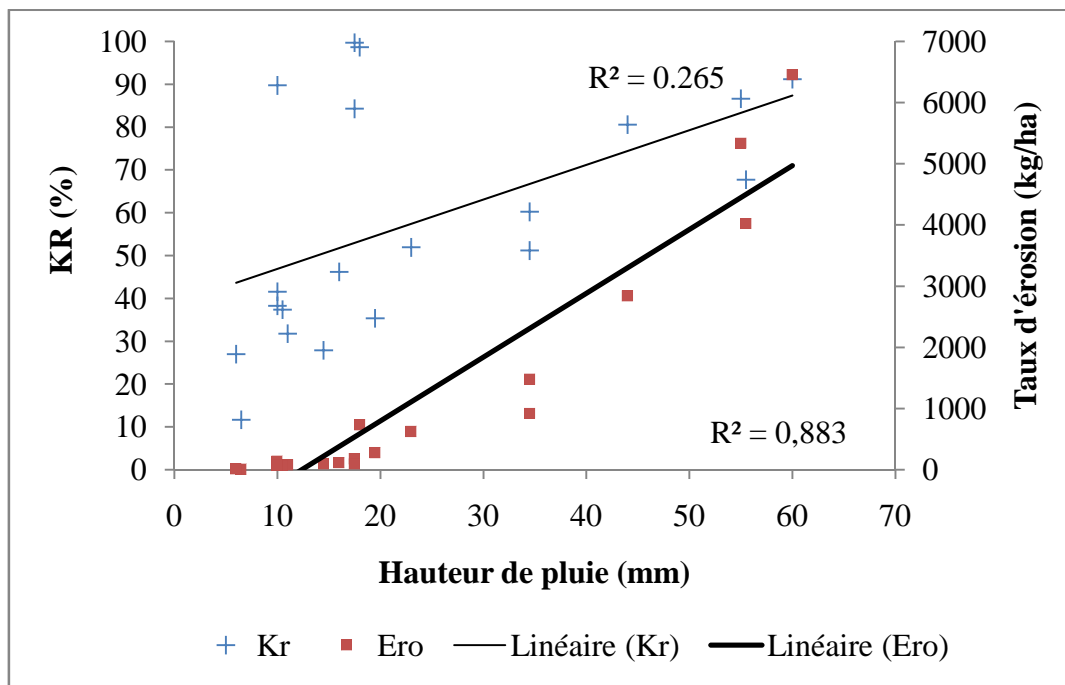


Figure 41: Corrélation linéaire de hauteurs de pluies et de coefficient de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle de croûte d'érosion (2010).

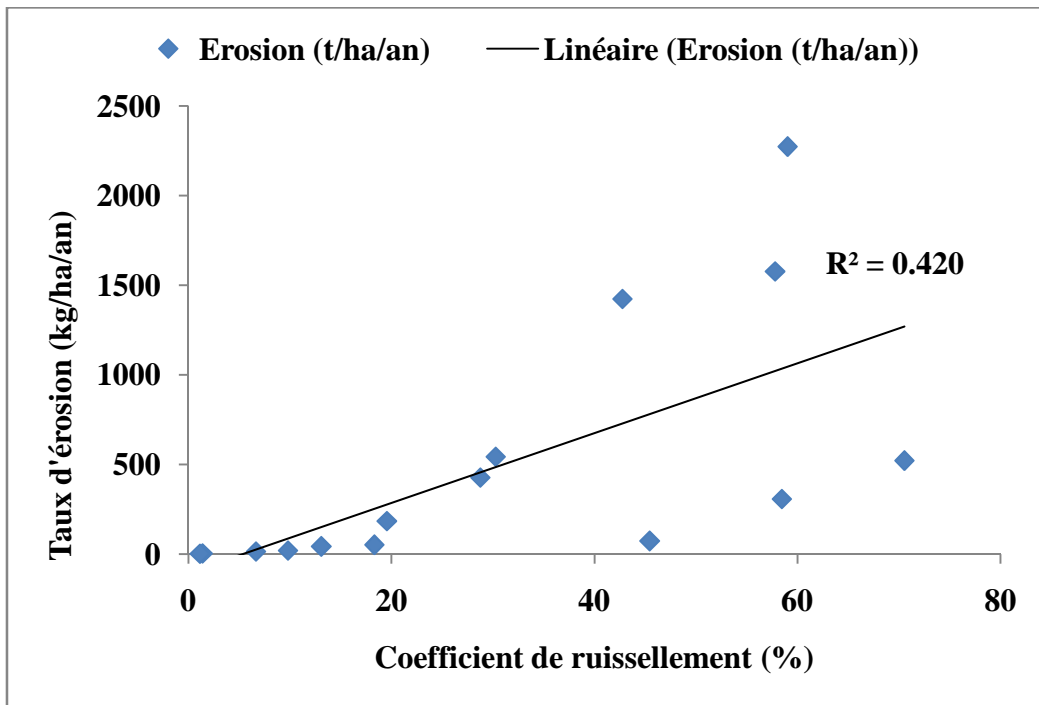


Figure 42: Corrélation linéaire entre coefficient de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle CT (2010).

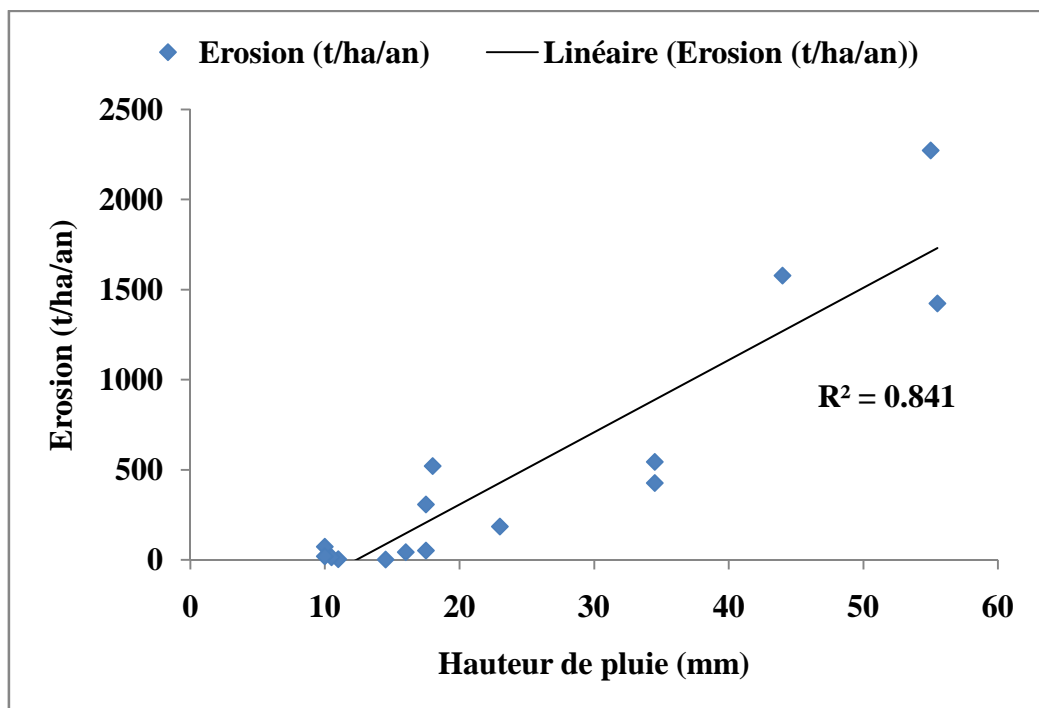


Figure 43: Corrélation linéaire de hauteurs de pluies et pertes en terre dans la parcelle CT (2010).

4.2.2. Ruissellement et érosion sur le champ de mil

Dans le champ de mil, le coefficient de ruissellement (KRAM) est de 14,16 % et 12,43 % sur la parcelle avec traitement (figure 44). C'est le coefficient le plus faible en expérimentation. Le coefficient de ruissellement maximum de l'ordre 49,54 %. Contrairement à la croûte d'érosion où le facteur influençant le taux de ruissellement est la pluie (par sa hauteur et son intensité), ici le coefficient de ruissellement dans le champ cultivé évolue au cours d'une saison donnée en fonction de plusieurs paramètres. La couverture du sol et le sarclage qui favorisent l'infiltration, l'humidité préalable du sol avant la pluie qui joue sur la probabilité qu'une pluie puisse ruisseler, sont autant des facteurs qui influencent le ruissellement de façon notable. C'est pourquoi, sur les parcelles de mil les grosses pluies ne sont en aucun cas synonymes de forts ruissellements. En effet, si avant le sarclage des pluies de 10 mm ruissellent, ce n'est pas le cas avec le sarclage puisqu'il augmente l'infiltration, une pluie de 20 mm peut ne pas ruisseler (par exemple, la pluie de 34.5 mm survenue du 15 Août 2011 n'a pas ruisselé). Le développement du cycle végétatif joue aussi un rôle important dans le déclenchement de ruissellement.

Cependant, l'observation des comportements de ces parcelles montre que les premières pluies sont généralement ruisselantes. Les pertes moyennes annuelles atteignent 5,16 t/ha/an alors ne représentent que 1.33 t/ha/an en moyenne sur les parcelles aménagées. L'analyse de la figure 45 montre que les coefficients de ruissellement et les pertes en terre ne sont pas proportionnels aux hauteurs de pluies. Puisque la couverture du sol et/ou le sarclage qui influencent le taux de ruissellement qui détermine à son tour le taux d'érosion. Par exemple la pluie de 20 mm enregistrée le 10/08/2010 a entraîné une érosion de 185,94 kg/ha/an tandis la pluie de 46,5 mm tombée huit (8) jours après le second sarclage n'a occasionné que 163,37 kg/ha /an. En revanche, sur la parcelle aménagée, bien la bande enherbée joue un rôle de piège à sédiments et de filtre, les pertes en terre par événement pluvieux sont proportionnelles au coefficient de ruissellement figure 46.

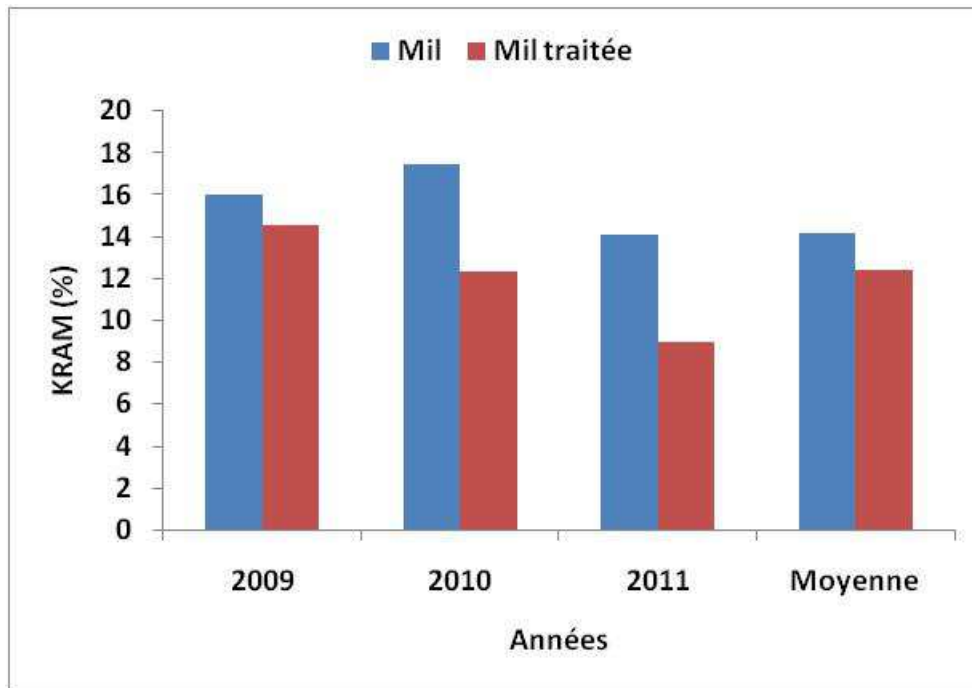


Figure 44 : Evolution du coefficient de ruissellement annuel moyen et moyenne sur trois ans (2009 à 2011) sur le champ cultivée.

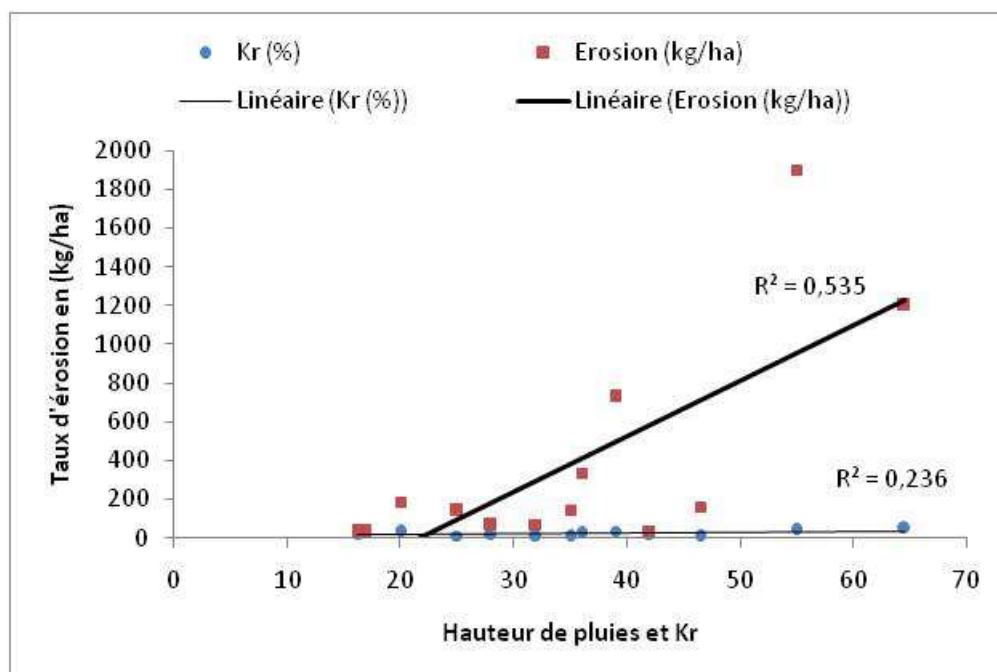


Figure 45 : Corrélation linéaire de hauteurs de pluies et de coefficient de ruissellement et perte terre dans la parcelle de mil (2010)

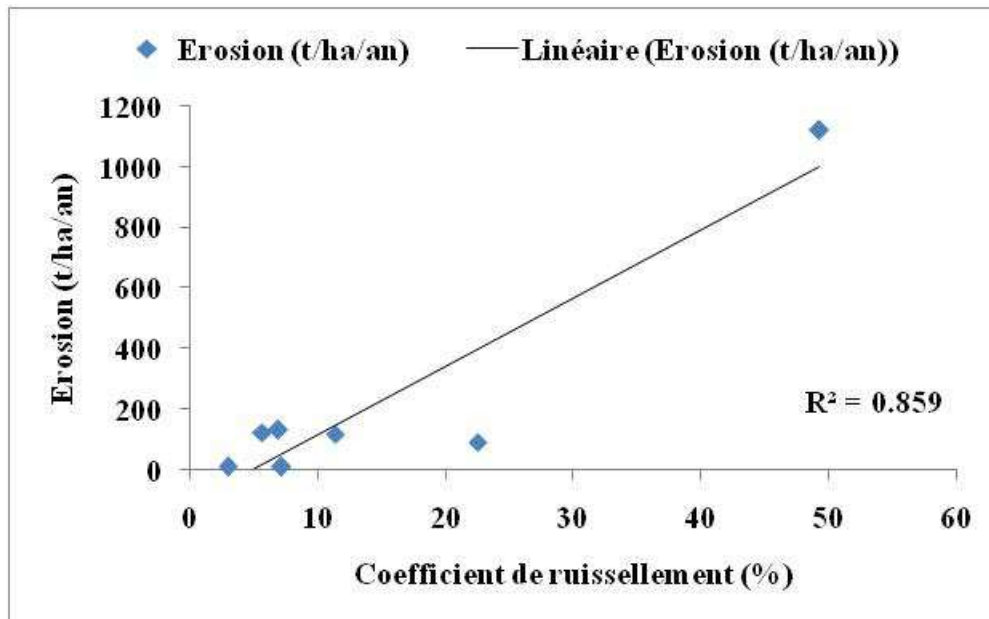


Figure 46: Corrélation linéaire entre coefficient de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle MT (2011).

4.2.3. Ruissellement et érosion sur la parcelle standard dite de Wischmeier

Sur la parcelle de Wischmeier ou parcelle nue standard ayant subi un travail régulier du sol (sarclage après chaque pluie), le KRAM est plus élevé que sur les parcelles de mil même si par ailleurs le sarclage répétitif joue un rôle primordial sur le ruissellement en augmentant l'infiltration. Il est de 25,15 % en moyenne. Quant aux pertes en terre moyennes sur les trois ans d'essais, elles sont estimées à 7,64 t/ha /an. Ce taux d'érosion beaucoup plus important comparativement à celui enregistré sur les parcelles de mil. Cette différence peut s'expliquer par la structure des sols plus ou moins cohérente sans aucune couverture végétale pouvant assurer sa protection. Le travail du sol après chaque pluie favorise l'infiltration, ce qui entraîne un ruissellement par saturation. Ce dernier entraîne une importante quantité de sédiments vers l'aval sous forme de boue. À ce propos, Roose (1981) lie cette manifestation à la baisse de la cohésion des matériaux causé par le sarclage. Il ressort de l'analyse de la figure 47 que les hauteurs de pluies ne déterminent pas forcément les forts ruissellements (coefficient de détermination R^2 égale 0,272), et encore moins le taux d'érosion

(puisque R^2 est moyen 0,546). Cependant, l'analyse de la figure 48 montre que les taux d'érosion événementiel sont proportionnels aux taux de ruissellement.

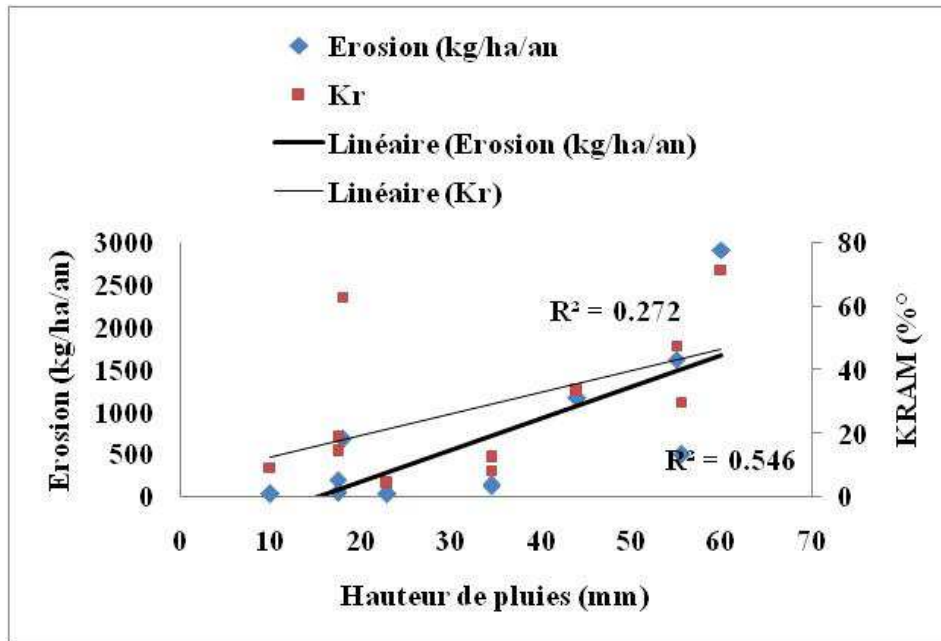


Figure 47: Corrélation entre hauteurs de pluies et coefficients de ruissellement / hauteurs de pluies et pertes en terre dans la parcelle PW (2011)

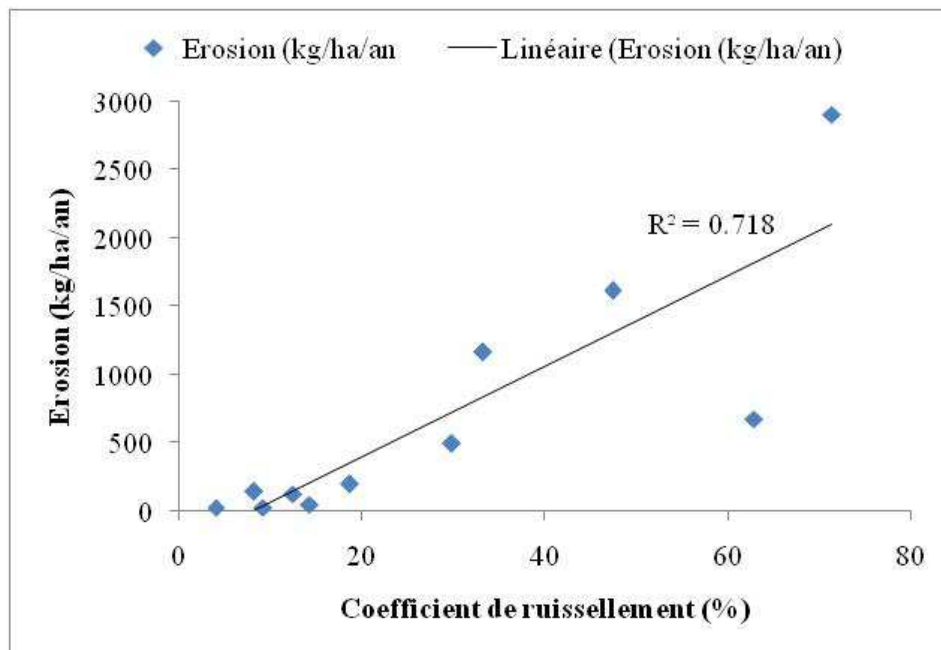


Figure 48: Corrélation entre coefficients de ruissellement et pertes terre dans la parcelle PW (2011).

4.2.4. Ruissellement et érosion sur la croûte gravillonnaire du sommet du plateau

Sur les parcelles de 1 m² situées sur la croûte gravillonnaire du sommet du plateau, les taux de ruissellement sont comparables à ceux observés sur la croûte d'érosion. Le KRAM est de 59,79 % sur 2 ans d'observation puisque ces parcelles ont été installées en 2010 tandis que le KRMAX est de 97,15 %. Le taux de ruissellement sont toujours élevés le minimum observé en 2010 est de 27,81 (figure 49). Cette variation est plutôt liée à la faible couverture pédologique sur cet état de surface qui ne dépasse rarement 20 cm au dessus de la cuirasse ferrugineuse. La faible épaisseur du sol sur les plages nue du plateau influe sur le taux de ruissellement, ce qui entraîne une perte de près de 2/3 de la pluie annuelle.

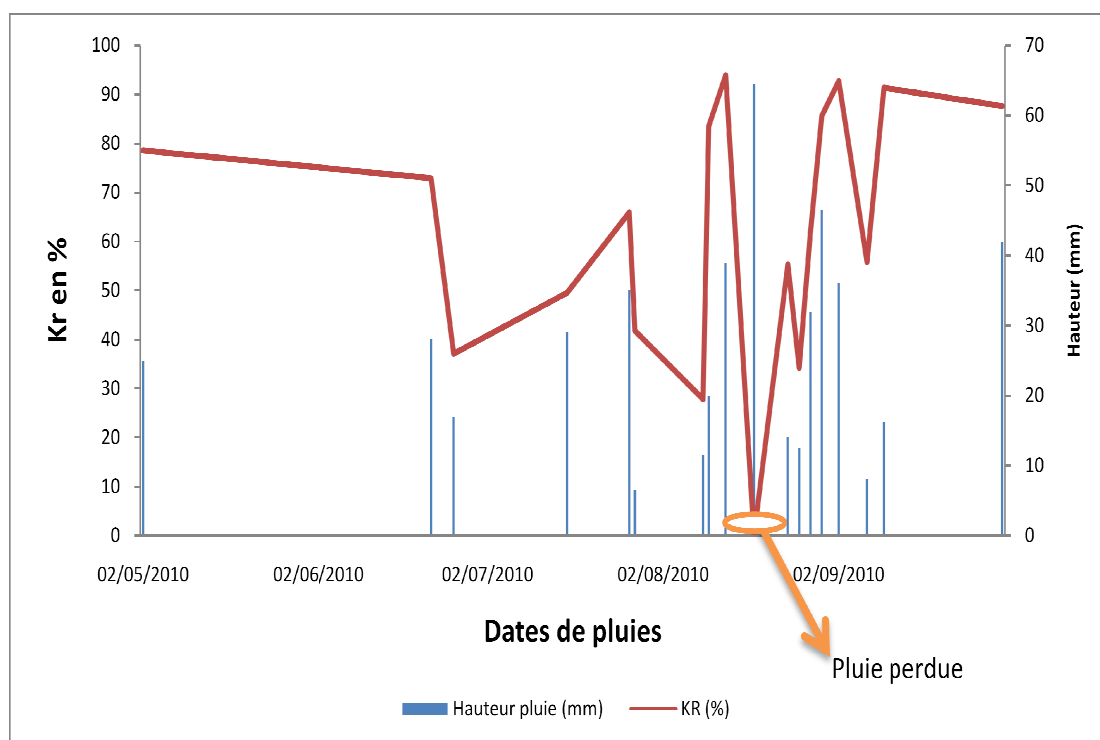


Figure 49: Evolution du taux du ruissellement dans la parcelle CG.

Les pertes en terre sont estimées à 15,78 t/ha/an. Ce taux d'érosion est comparable au taux d'érosion observé sur la croûte d'érosion qui enregistre une dégradation spécifique de l'ordre de 18,95 t/ha/an. Le rapprochement entre le taux d'érosion et la hauteur de pluies montre une forte liaison, plus la hauteur de pluie est élevée plus le taux d'érosion est élevé (cf. figure 50). L'importante érosion sur le plateau explique le processus d'exhaussement de la cuirasse ferrugineuse fossilisée sous un manteau sableux de faible épaisseur. Celle-ci affleure soit en forme de dalle, soit sous forme de blocs jonchant la surface en la donnant un aspect de reg.

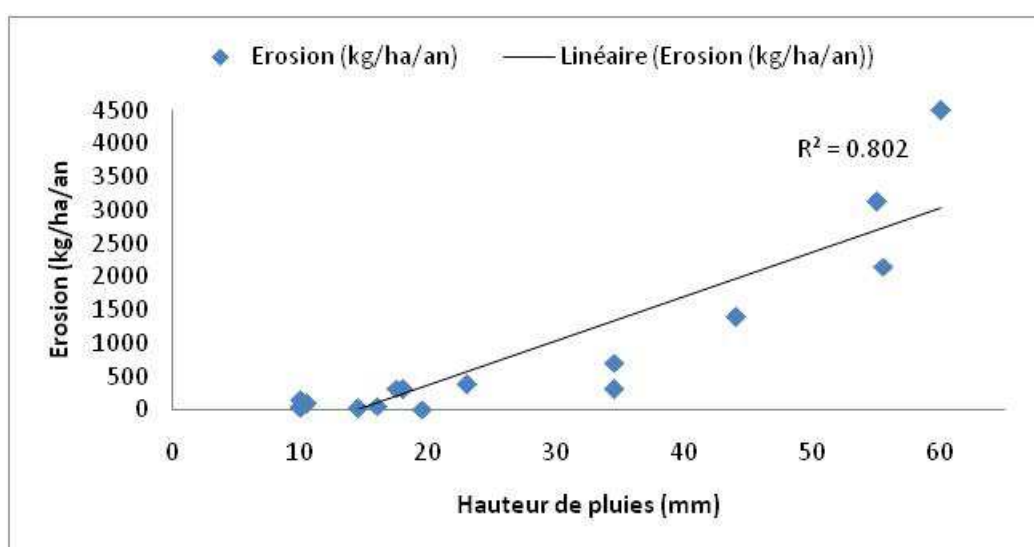


Figure 50 : Corrélation entre coefficients de ruissellement et pertes en terre dans la parcelle CG

Le tableau 9 présente les résultats de mesures sur les parcelles de façon simplifiée.

Tableau 9: Récapitulatif des réponses des parcelles (2009 à 2011)

parcelles	Kram (%)	Kr max (%)	Taux d'érosion t/ha/an
M	14,16	49,54	5,16
MT	11,78	49,19	2,25
CE	55,2	99,74	18,95
CET	41,4	85,97	8,38
PW	25,15	71,26	7,64
CG	59,79	97,15	15,78

Selon qu'on ait tel ou tel état de surface, le nombre de pluies ruisselantes varie. A titre d'exemple, trente cinq (35) événements enregistrés en 2009, vingt neuf (29) ont ruisselé sur la croûte d'érosion et 14 sur le champ de mil. La hauteur minimale de pluie ayant entraîné le ruissellement sur la croûte d'érosion est de l'ordre de 3 mm par contre dans le champ la réalité est toute autre. Il faut donc prendre en compte plusieurs paramètres tel que la couverture du sol, le sarclage, mais aussi la structure du sol, ou encore l'humidité préalable du sol avant une pluie. Contrairement à la croûte d'érosion où le plus souvent c'est la hauteur de pluie et son intensité qui sont les plus déterminants.

4.3. Effet de la BE sur les différentes parcelles

4.3.1. Sur le nombre de pluies ruisselantes

Pour mieux apprécier l'effet de la bande enherbée d'*Andropogon gayanus* sur le nombre de pluies ruisselantes, nous avons analysé les réponses sur la croûte d'érosion. En effet, sur cet état de surface, aucune végétation ne pousse, donc seule la bande enherbée constitue une protection du sol alors que sur les parcelles d'autres paramètres influencent la survenue ou non du ruissellement (le sarclage et la végétation par exemple). Le nombre de pluies ruisselantes a baissé sauf en 2009 où toutes les pluies ont ruisselé aussi bien sur la parcelle témoin que la parcelle traitée. On enregistre 11,11 et 27,27 % de réduction respectivement en 2010 et 2011. Ce résultat s'explique par le fait que durant la première année de mesure (2009) la bande enherbée n'est pas suffisamment dense.

4.3.2. Sur les états de surface

Pour mettre en évidence l'effet du traitement sur les états de surface, nous avons analysé les parcelles de croûte d'érosion où l'impact est beaucoup plus expressif. Les parcelles témoins étaient restées totalement nues et même la bordure de la parcelle où on observe parfois un plaquage sableux inhérent au bon fonctionnement des parcelles ne portait aucune végétation. Sur les parcelles traitées, la bande enherbée a favorisé

une sédimentation dans sa partie amont. Il se forme un plaquage sableux qui a occasionné la mise en place d'un tapis herbacé constitué de *Zornia* et *Cenchrus biflorus* (photo 42). Ce tapis herbacé a favorisé la fermeture des espaces entre les plants d'*Andropogon*. La sédimentation a favorisé une stagnation de l'eau mais aussi une amélioration de l'infiltration.



Photo 42 : Formation d'un tapis herbacé favorisé par la sédimentation en amont de la BE

4.3.3. Sur le ruissellement et l'érosion

Le tableau 10 montre que les bandes enherbées induisent une réduction relativement significative sur le taux de ruissellement sur les parcelles traitées par rapport aux parcelles témoins. Les taux moyens de réduction sur les cumuls de la lame d'eau ruisselée sont de 29,49 % sur les parcelles traitées sur le champ de mil contre 26,42 % sur les croûtes d'érosion avec traitement. Elles entraînent une réduction du taux d'érosion de l'ordre de 56,4 % sur le champ de mil et de 55,78 % sur la croûte d'érosion (cf. tableau 10).

Tableau 10 : Effet de la BE sur le ruissellement et le taux d'érosion.

	M	MT	CE	CET
Cumul ruissellement (mm)	93,33	65,8	316,97	233,2
Taux de réduction sur 3 ans (%)	29,49		26,42	
Erosion	5,16	2,25	18,95	8,38
Taux de réduction	56,4		55,78	

Le détail de cette influence de la bande enherbée sur les taux de ruissellement est exprimé à travers la figure 51. Pour une meilleure lisibilité de l'impact de la bande sur le ruissellement, les taux de réduction sont exprimés en % sur la figure 52.

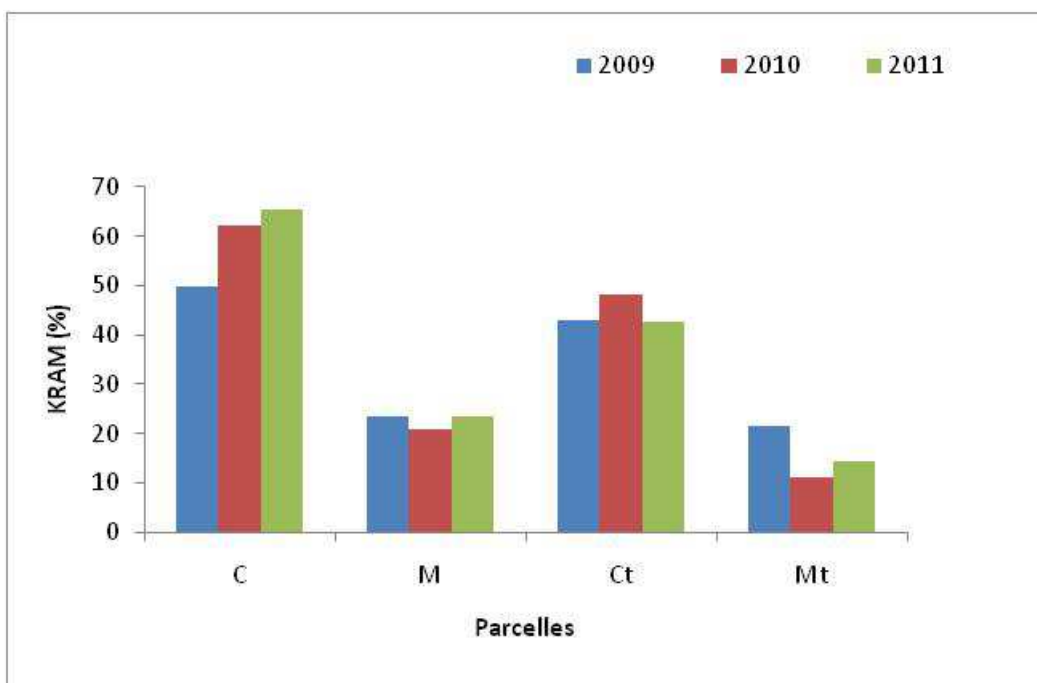


Figure 51: Effet de la BE sur le taux de ruissellement de 2009 et 2011

La figure 52 montre en général que le taux de réduction a connu un accroissement de 2009 à 2011. Cela est lié au fait qu'au début de l'expérimentation, la bande enherbée n'est pas suffisamment dense et qu'elle demeure perméable. Mais il faut aussi noter qu'en 2009 nous avons enregistré un contre effet lié à la reconstitution de la croûte à l'amont de la parcelle de mil traitée. Ce problème a été par la suite corrigé en cassant

la croûte après une ou deux pluies. Cependant, malgré ce dysfonctionnement l'effet de la bande enherbée dans la parcelle mil aurait dû être plus effectif si la bande enherbée a été mise sur pied sans difficulté que sur la croûte d'érosion. Le tableau 11 montre l'effet de la bande enherbée d'*Andropogon gayanus* sur le taux d'érosion annuel.

Tableau 11: Effet de la BE sur le taux d'érosion

	CE		M	MT
2009	10954,28	5333,91	5946	2244,56
Taux de réduction	<u>51,31%</u>		<u>62,25%</u>	
2010	22751,58	11120,09	4369,80	2877,94
Taux de réduction	<u>51,44%</u>		<u>34,14%</u>	
2011	12913,72	8714,84	4780,69	1650,18
Taux de réduction	<u>32,51%</u>		<u>65,48%</u>	

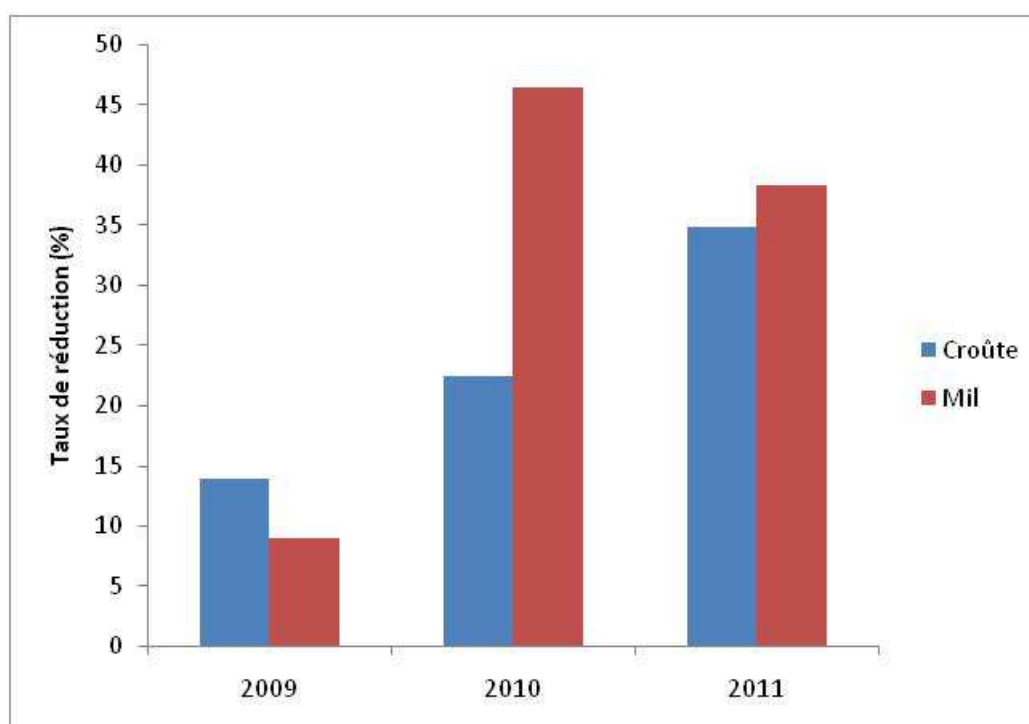


Figure 52: Evolution du taux de réduction du ruissellement de 2009 à 2011

Mais il faut souligner qu'en fait les bandes enherbées n'ont d'effet sur le ruissellement et l'érosion en amont (sauf à long terme par la diminution de la pente du champ

cultivé) (Roose, 1971). Zougmoré et *al.* (2004) soulignent la difficulté de la bande à se mettre sur pieds en début de l'expérimentation. C'est ce qui explique la faible influence de la bande surtout sur le taux de ruissellement.

Les résultats de l'expérimentation ainsi que les observations sur le terrain montrent la vitesse avec laquelle les processus agissent à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ». Les événements pluviométriques exceptionnels sont à l'origine des dégradations spectaculaires comme les montrent les corrélations entre les pertes en terre et la hauteur de pluies. La lutte antiérosive biologique à base d'*Andropogon gayanus* permet de réduire considérablement les volumes ruisselés et les pertes en terre. Il faut donc vulgariser cette technique surtout sur les plages encroûtées des plateaux et des glacis afin de freiner l'ampleur des processus d'érosion.

Les résultats de mesure ne nous laissent pas indifférents, et c'est ce qui nous amène à se poser des questions sur les paramètres qui expliquent l'intensité du ruissellement et de l'érosion dans l'aire « *ayi noma* ». Parmi ces facteurs, nous avons : la pluie (par sa durée, sa hauteur et son intensité), l'humidité préalable du sol avant la pluie, la topographie et l'homme.

4.4. Les facteurs de ruissellement et d'érosion

En parlant des facteurs de l'érosion, Batti et Depraetere (2007) distinguent trois catégories :

- les agents de l'érosion qui font allusion à la pluie et ses caractéristiques ;
- les facteurs intrinsèques de résistance du sol qui dépend des paramètres texturaux et structuraux ;
- et les facteurs de modulation de l'action érosive qui font intervenir la topographie à travers ses deux composantes (longueur et inclinaison), la notion de protection (nature pourcentage de l'occupation du sol et les pratiques antiérosives).

4.4.1. Les événements pluvieux (durée, hauteur et intensité)

Pour qu'une pluie puisse déclencher le ruissellement, il faut que la hauteur d'eau tombée au sol atteigne 20 à 30 mm pour une même averse (Goujon, 1968). Les averses inférieures à 20 mm sont absorbées par le sol et n'entraîne donc pas de ruissellement. Pour Zahar et Laborde (2001), les hauteurs de pluies annuelles, saisonnières, voire journalières ne peuvent expliquer à elles seules les phénomènes d'érosion, parce qu'elles ont tendance à lisser les variabilités dans le temps de la pluviosité, et à masquer de ce fait les caractéristiques d'érosivité des averses. Hudson (1981) l'a démontré à l'échelle annuelle à la station de recherche de Mazoe (Zimbabwe). Il constate qu'il n'existe aucune relation entre les valeurs annuelles de hauteur de pluie, d'érosion et de ruissellement, aussi bien exprimé en pourcentage qu'en hauteur d'eau. L'intensité des précipitations doit donc constituer un facteur de l'érosion plus important que leur hauteur. L'intensité est le paramètre principal qui lie la pluie à l'érosion. Elle détermine le potentiel d'agressivité d'une pluie donnée qui est définie comme le pouvoir potentiel de cette pluie ou du ruissellement de causer l'érosion du sol pendant cette période (Henensal, 1986). L'intensité d'une pluie intervient à deux niveaux : la saturation momentanée de la porosité du sol, et l'énergie cinétique que la pluie dissipe en détruisant la structure de la surface du sol (battance) (Roose, 1977).

Au cours du temps la capacité d'infiltration diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur constante des fois nulle. Le temps requis pour atteindre cette valeur minimale varie de quelques minutes à quelques heures suivant les pluies et la perméabilité du sol. Une fois que l'intensité de la pluie dépasse cette capacité d'infiltration, le surplus ruissèle comme l'illustre la figure 53.

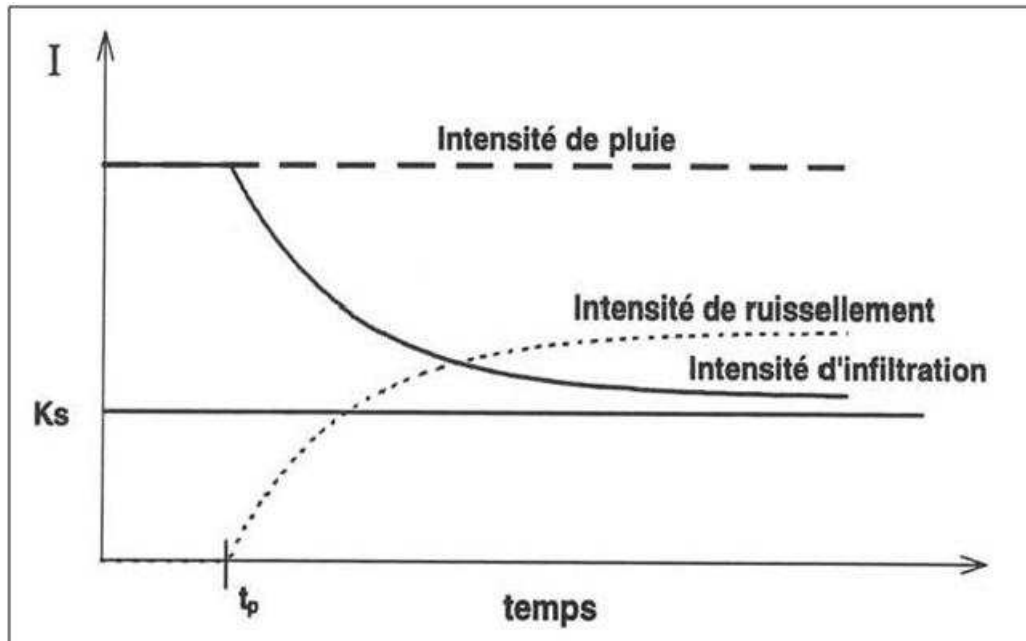


Figure 53: Evolution de l'infiltrabilité du sol dans le temps dans le cas d'une pluie uniforme (source : Peugeot 1995).

Cela nous a amené à chercher la valeur limite de l'intensité à partir de laquelle se déclenche le ruissellement. Ce qui revient à calculer une intensité limite en deçà de laquelle une parcelle ne ruisselle jamais, le ruissellement étant considéré de façon générale pour les deux campagnes 2010-2011. En 2009 le pluviographe étant loin du site de mesure, il peut pleuvoir au niveau des parcelles sans qu'il pleuve au niveau de cet appareil ou inversement. Les valeurs seuils obtenues sont représentées graphiquement sur les hyétogrammes (Peugeot, 1995 ; Bergaoui et *al.*, 1996 ; Chevalier, 1982). Les valeurs de la pluie limite du ruissellement dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, hauteur, durée) et surtout l'état d'humidité du sol avant la pluie. La figure 54 met en évidence cette valeur limite de l'intensité pour la parcelle croûte d'érosion (hyétogramme de la pluie du 26 juillet 2010). Le tableau 12 montre que cette valeur (intensité limite) est bien différente selon les parcelles de même que la hauteur de pluie qui puisse générer le ruissellement. La pluie d'imbibition varie entre 3 et 8 mm respectivement sur la croûte d'érosion et dans le champ de mil. La pluie d'imbibition est définie comme l'humectation initiale maximale du sol (Lamachère, 1991).

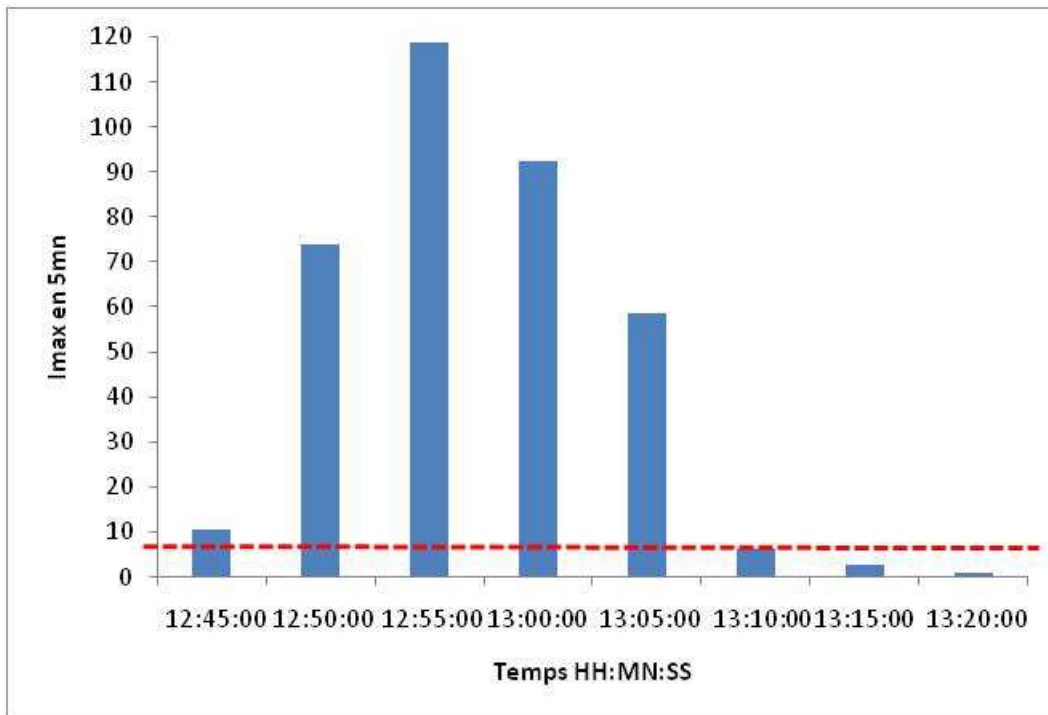


Figure 54: Exemple de calcul de la pluie potentielle au ruissellement pour l'averse du 26 juillet 2010.

Tableau 12 : seuils d'intensité et pluies d'imbibition par parcelles

Nomination des parcelles	Pluie imbibition (mm)	Intensité limite (mm/h)
CE	3	9,3
M	8	27,84
PW	7,1	27,84
CG (1m ²)	7,1	13,08

L'analyse des différentes valeurs seuils ou intensités limites de ruissellement nous a permis de dresser les figures 55 et 56.

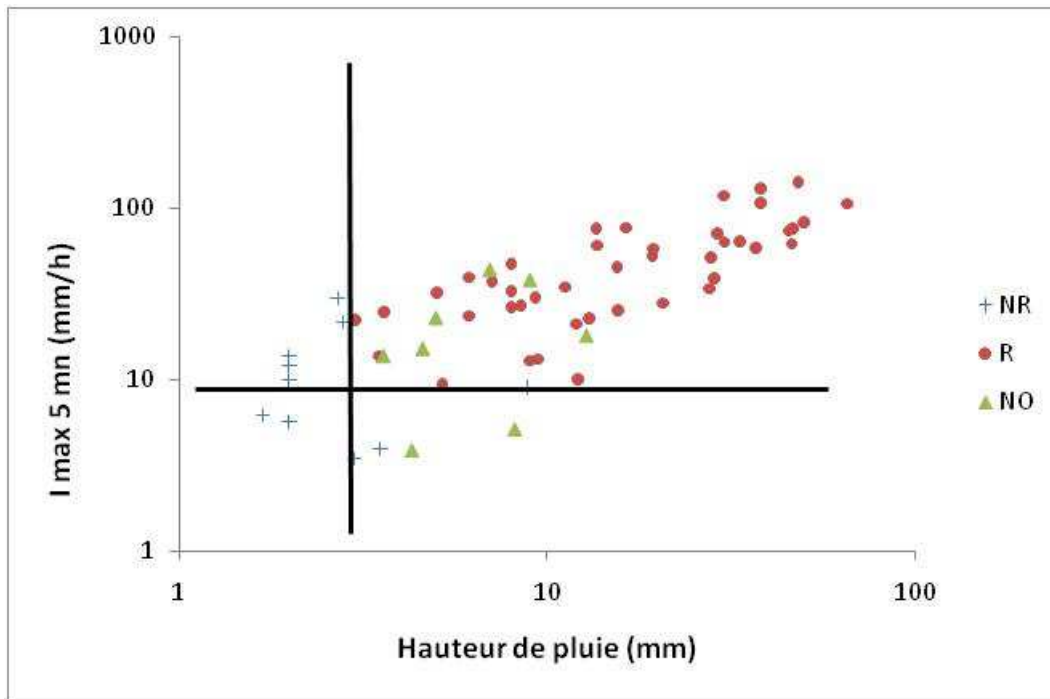


Figure 55: Seuil d'intensité et pluie d'imbibition dans la parcelle croûte d'érosion

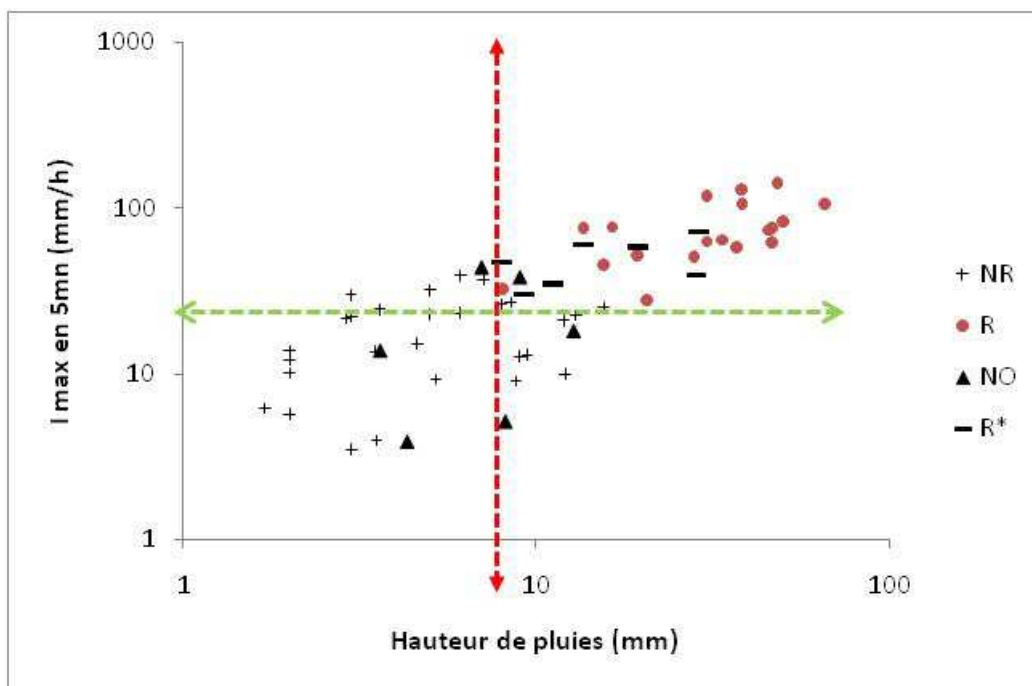


Figure 56: Seuil d'intensité et pluie d'imbibition sur les parcelles mil

NB : NR pluies non ruisselantes, R pluies ruisselantes, NO : pluies non observées, R* : pluies susceptibles de ruisseler

La figure 56 met en évidence l'impact du travail du sol notamment le sarclage sur le ruissellement et l'érosion. Comme l'a su bien précisé Peugeot (1995) le travail du sol a pour conséquence l'arrêt de l'évolution des croûtes et l'uniformisation de la surface de la parcelle. Le sarclage favorise par conséquent une augmentation significative de l'infiltration des eaux. La variable R* indique les pluies susceptibles de ruisseler sur la parcelle sur le champ de mil et dont l'effet du sarclage a empêché le ruissellement.

4.4.2. L'humidité des sols avant la pluie

On parle souvent de la fréquence des événements pluvieux pour montrer l'effet de l'humidité du sol sur le ruissellement. L'humidité des sols avant la pluie est un paramètre qui s'exprime, soit par le déficit de saturation du sol avant l'averse (porosité non gorgée d'eau), soit par le temps en heures qui s'est écoulé avant la pluie, soit par l'indice de Köhler et Linsey (1951). Cependant, l'état d'humidité du sol est très difficile à mesurer car très variable dans l'espace et le temps. On a souvent recours à d'autres paramètres qui reflètent l'humidité du sol et qui sont plus faciles à obtenir. En hydrologie, on fait souvent appel à des indices caractérisant les conditions d'humidité antécédentes à une pluie. Selon (Goujon, 1968), une pluie tombant sur un sol sec commence à pénétrer en profondeur et ne provoque pas de ruissellement. Pour montrer l'influence du ruissellement, nous avons calculé l'indice d'humidité préalable du sol avant la pluie (I_{kn}).

$$I_{kn} = (I_{kn-1} + P_{n-1})e^{-\alpha t}$$

I_{kn}, indice d'humectation immédiatement avant l'averse n, I_{kn-1}= valeur de l'indice avant la pluie n-1, P_{n-1}, hauteur de l'averse de rang (n - 1), en mm, t = temps séparant la fin de la pluie (n - 1) du début de la pluie n, calculé en jours et fraction de jour, à 5 mn, et α, % coefficient de décroissance pris généralement égal à 0,5 pour la zone sahélienne. En début du protocole, on a IK = 0.

Nous avons vu que pour l'intensité, le seuil est de 9,96 mm/h en 5mm. Pour mieux illustrer cet effet mémoire de pluie antérieure, nous avons comparé les réponses de quelques pluies. Le tableau 13 met en évidence l'influence de l'humidité du sol sur le

taux de ruissellement. En comparant les pluies des 11 et 24 juillet 2010 on se rend compte que sur la croûte d'érosion, 3,5 mm a ruisselé à 22,4 % sur la croûte d'érosion avec un taux d'humidité de 11 mm tandis que 4,5 mm n'a pas sur cet état de surface humide de 2,7 mm même si par l'intensité maximale en 5 mn est supérieure à celle de la première pluie. A l'image des pluies du 08-07-2010 et du 03-09-2010, avec une humidité quasi nulle, 49,9 mm ont ruisselé à 74,46 % alors que 30,4 mm avec 13,6 mm d'humidité ont ruisselé à 91,92 %.

Tableau 13 : influence de l'humidité du sol sur la production du ruissellement.

Date pluie	Hauteur (mm)	Ik (mm)	Imax (5mn)	Kr %
11/07/2010	3,5	11	13,68	22,4
24/07/2010	4,6	2,7	15,24	0
26/08/2010	12,13	9	9,96	28
08/07/2010	49,9	0,00	83,28	74,46
03/09/2010	30,4	13,6	63,24	91,92

En plus de ces facteurs, il faut ajouter les facteurs de résistance de sol ainsi que la notion d'érodibilité que nous avons évoqué très haut pour l'ampleur de la dégradation dans notre zone d'étude.

4.4.3. La topographie

L'influence de la pente sur le ruissellement et l'érosion a été évoquée par Roose (1977, 1994). Nous nous limitons à l'idée que la pente est un facteur important d'érosion. Le ruissellement et l'érosion commencent sur des pentes faibles (1 à 2 %). Toutes choses égales par ailleurs, l'érosion augmente avec la pente. Plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie. Poesen et Bryan (1990) soulignent que la relation entre le volume de ruissellement par unité de surface de sol et la longueur de pente est complexe et fortement influencée par la formation d'une pellicule de battance, par le développement de rigoles et de têtes de rigoles ainsi que par la formation de dépôts de

pende. Cette influence de la topographie sera mise en évidence dans le chapitre suivant sur la cartographie du risque érosif.

4.4.4. L'homme

Nous l'avons vu dans le troisième chapitre, l'homme est un facteur d'érosion. Roose (1994) a défini la dégradation des sols comme une situation où l'équilibre entre l'agressivité climatique et le potentiel de résistance du sol a été rompu par l'action de l'homme. Dans cette zone, l'homme joue un rôle dans le déclenchement et de l'accélération de l'érosion par le défrichement et la façon culturale. Même si la façon culturale augmente la perméabilité du sol, elle a surtout accéléré la dégradation du sol en diminuant sa cohésion, sa stabilité structurale et en réduisant le taux de la matière organique. En outre la façon culturale peut compacter le sol en profondeur et créer des semelles de labour. Pour appuyer cette idée, Golubev (1983) cité par Henensal (1986) estime que l'érosion sur les terres cultivées est 10 fois supérieure à celle qui se produit sur les pâturages et 100 fois supérieure à celle existant en forêt, tandis que les travaux de Morgan (1979) signalent qu'une diminution de 30 % de la forêt multiplie l'érosion par 5.

Chapitre 5 : Cartographie des risques érosifs de l'aire « *ayi noma* »

Les études antérieures, concernant le ruissellement et l'érosion au Niger, n'ont pas pris en compte l'utilisation du modèle pour l'estimation des pertes en terre. Dans ce contexte, l'élaboration d'une base de données dans un système d'information géographique s'avère nécessaire afin de faire un diagnostic précis de la dégradation des terres. En outre ce diagnostic permettra d'élaborer des documents cartographiques qui délimitent les zones vulnérables à l'érosion. C'est ainsi que ce chapitre est consacré à la mise en place d'un outil d'aide à la décision qu'est la carte des risques érosifs de l'aire « *ayi noma* ». Elle permettra d'orienter les priorités d'intervention et d'aménagement et aussi d'atténuer la dégradation des terres. La mise en œuvre d'un tel outil nécessite donc l'utilisation des données de la télédétection et celles descriptives pour une meilleure connaissance spatialisée des facteurs de différenciation de l'érosion. Le modèle empirique ou l'équation universelle des pertes de sols de Wischmeier sous sa forme révisée (RUSLE) a été appliqué. Ce modèle est basé sur cinq (5) facteurs influençant directement le ruissellement et l'érosion en nappe et rigoles. Ces facteurs sont connus comme des données naturelles à prendre en compte pour étudier les phénomènes érosifs (King et Le Bissonnais, 1992). Ainsi, L'équation de la perte en terre se présente comme suit :

$$A = R * K * SL * C * P$$

A : Perte de sol en t/ ha sur une période donnée; R : Indice d'érosivité des pluies caractérisant l'agressivité de la pluie en m t m /ha/ h; K : Indice d'érodibilité du sol exprimant sa sensibilité à l'érosion ; LS: Indice de pente qui intègre la longueur mais aussi l'inclinaison de la pente ; C : Indice de protection du sol par la couverture végétale;P : Indice de protection du sol par les travaux de conservation des eaux et des sols.

Pour pouvoir appliquer le modèle, ces différentes variables ont été intégrées dans les SIG sous formes des couches d'informations rasterisées qui, croisées entre elles donnent la carte du risque érosif. Le but de ce chapitre est de pouvoir prévoir le taux

annuel moyen à long terme de l'érosion des sols pour diverses pratiques de gestion des sols en association avec la configuration des pluies, la topographie et le type de sol d'une région (Wischmeier et Smith, 1978 cités par Wall et *al.*, 2002).

5.1. Détermination des différents facteurs du modèle

Parmi ces facteurs, on peut distinguer deux catégories. La première catégorie de facteurs concerne ceux qui expriment une vulnérabilité intrinsèque du milieu quant aux processus d'érosion pluviale (le facteur climatique, l'érodibilité des sols, et le facteur topographique) tandis que la seconde tient compte de l'action anthropique dont la protection du sol par un couvert végétal qui intègre les systèmes culturaux et le facteur de pratiques antiérosives.

5.1.1. Le facteur R : agressivité des précipitations

Le modèle RUSLE s'appuie sur les conditions climatiques responsables de l'intensité de l'érosion. Le facteur R, appelé aussi indice d'érosivité de pluies, caractérise l'agressivité des pluies et permet d'estimer à partir d'une averse, la quantité de terre pouvant être arrachée à un sol, dans des conditions standard (sol nu, pente 9%, longueur 75 pieds). Cet indice représente la capacité de la pluie à désolidariser les éléments du sol (Anglès D'Ortoli et Maurer, 2000). Dans le calcul de cet indice, interviennent l'intensité de la pluie et l'énergie cinétique délivrée durant l'averse. La prise en compte de tous ces paramètres nécessite la connaissance de la hauteur totale des pluies ainsi que les intensités maximales sur 30 mn des événements pluvieux sur au moins trois décennies (Fox et Morschel, 2004), ou 20 ans selon Wischmeier (Touaïbia et *al.*, 2000). Mais dans nos régions en général, et particulièrement dans notre zone d'étude, les intensités maximales en 30 mn ne sont disponibles. Cependant, faute d'avoir une longue série de données, plusieurs méthodes permettent d'évaluer ce facteur dont les cumuls des précipitations annuelles, mensuelles et horaires des plus grosses pluies sont les principales composantes. Parmi ces formules de substitution utilisées pour calculer le facteur d'érosivité on peut citer :

Roose (1994) qui trouve pour le cas de l'Afrique de l'ouest une corrélation entre la hauteur de pluie annuelle et le facteur R.

$$(R=P*0.5)$$

Roose (1979) a proposé pour la station de Saria au Burkina Faso un abaque (coordonnées Log-Log) liant l'indice R à la pluviosité suivant la formule :

$$R=0,0295*P^{1,89}.$$

Renard et Freimund (1994) (cités par Morschel et Fox 2004), proposent une méthode de substitution pour le calcul de l'indice d'agressivité climatique estimée avec un coefficient de détermination de 0,81 sur 132 stations malgré l'inégale répartition des précipitations dans l'espace.

$$R=0,04830*P^{1,610}.$$

Au Maroc, Kalman (1970) propose un indice qui tient compte des précipitations moyennes annuelles (P) et la moyenne des précipitations maximales en 24 heures pour une période de retour de 20 ans (P_{24}) et s'écrit sous la forme :

$$R= 143*\log (P*P_{24}^2*10^{-6}) + 89.7.$$

Au Philippines, Anglès D'Ortoli et Maurer, (2000) ont utilisé la formule de Bayotlang (1986, cité par Bantayan, 1996) élaborée en utilisant des données de 41 stations météorologiques. Elle permet d'estimer R à partir du cumul annuel des précipitations X (en centimètre):

$$R = - 10,551 + 10,259X + 0,214X^2$$

Le tableau 14 donne la valeur du facteur d'érosivité des pluies R suivant ces auteurs.

Tableau 14: Valeur du facteur en fonction de quelques formules de substitution.

Auteurs	Facteur R
Roose 1994	325
Roose 1979	6112,63
Renard et Freimund (1994)	1632,06
Anglès D'Ortoli et Maurer, (2000)	1560,43

De ces méthodes de substitution, le choix a été porté sur la formule proposée par Roose (1994) pour sa facilité d'utilisation. Cette formule a été proposée pour l'ensemble de la zone sahélienne et rapporte la pluviométrie moyenne annuelle (P) à une constante qui est de 0,5.

$$R = P * 0.5$$

Le facteur R est calculé sur une série de données de 30 ans de mesure au poste pluviométrique de Tamou. Avec une moyenne annuelle de l'ordre de 650 mm, l'indice d'agressivité des pluies R est égal à 325 (tableau 14). C'est cette valeur de 325 qui a été appliquée de façon uniforme à l'ensemble du secteur d'étude. Cependant, cela ne permet pas de tenir des distinctions inhérentes à la variation spatiale des pluies mais permet en revanche d'estimer l'érosion.

5.1.2. Le facteur k : érodibilité des sols

La distribution de ce facteur est tributaire de propriétés physiques des différents types des sols dans la zone d'étude. Il a été évalué en effectuant une série d'essais d'infiltration au cylindre qui a permis d'apprécier la capacité d'infiltration des différents types des sols, le taux de la matière organique ainsi que la texture des sols. Le volume total infiltré selon les différents sites d'essai nous a permis d'attribuer le code de perméabilité aux différents types des sols. La figure 57 met en évidence cette différence de perméabilité suivant les types des sols.

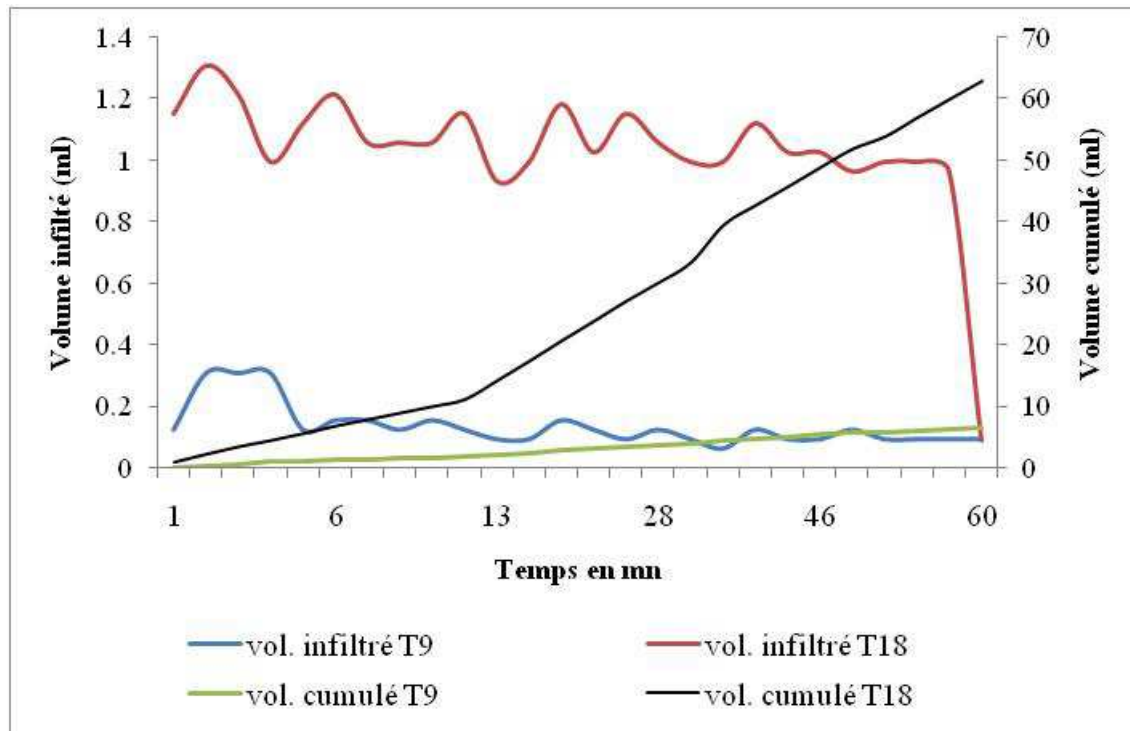


Figure 57: Evolution de l'infiltration

L'érodibilité des sols varie de 0.70 pour les sols les plus fragiles à 0.01 sur les sols les plus stables (El Garouani et al., 2008). La matière organique constitue un indicateur de durabilité des systèmes de culture puisque, directement ou indirectement, à travers ses multiples fonctions, elle est susceptible de jouer un rôle important dans de nombreuses propriétés édaphiques qui déterminent en partie la productivité végétale et la conservation des eaux et des sols (Feller, 1993). Par ailleurs, des valeurs-seuils des teneurs en matière organique des horizons de surface des sols sous cultures annuelles sont proposées en relation avec leur érodibilité. Leprun (1988) fixe cette valeur-seuil entre 1,5 à 2% tandis qu'Albrecht et *al.* (1992) limite ce seuil à 2.5%. En outre, Pieri (1989) a souligné que le maintien de la productivité végétale dépend plus ou moins étroitement des pratiques de fertilisation organique (fumiers, composts) ou organo-minérale et des niveaux des stocks organiques des sols. Wischmeier, Johnson et Cross (1972) cités par Roose (1994) soulignent qu'en élevant de 1 % le taux de matières organiques du sol, on réduit l'érodibilité du sol de 5 %.

Afin d'évaluer l'indice d'érodibilité K de divers types de sols, nous avons tenu compte de types des formations superficielles de la zone. Une série d'essais d'infiltration ainsi que l'analyse des échantillons de sols prélevés dans les 20 premiers centimètres de profils pédologiques ont permis d'apprécier et de calculer les différents paramètres entrant dans le calcul du facteur K. Il s'agit de la matière organique, de la texture, de la structure et de la capacité d'infiltration. Le facteur K est ainsi déterminé suivant la formule de Wischmeier et Smith (1978) en fonction des paramètres.

$$100K = 2,1 * M^{1,14} (10^{-4})(12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

où M est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{ limon}) * (100 - \% \text{ argile})$,

a est le pourcentage de matière organique, b est le code de la perméabilité,

c est le code de la structure.

Les résultats sont présentés dans le tableau 15. Il ressort donc de l'analyse de ce tableau que les sols contiennent de très faibles taux de matière organique loin inférieurs aux valeurs-seuils citées plus haut. L'ensemble des sols prélevés ont de taux de matière organique strictement inférieurs à 1,5 % qui correspond à la valeur en deçà de laquelle les sols sont très sensibles à l'érosion. Seuls trois échantillons ont un taux de matière organique supérieur à 1% mais toujours inférieurs à 1,5 %. Cela montre que les sols sont donc érodibles comme illustre le tableau 16. Les valeurs du facteur K comprises entre 0,33 et 0,54 révèlent une sensibilité élevée à l'érosion.

Tableau 15 : Distribution de l'érodibilité et de la matière organique en fonction des formations superficielles de l'aire « *ayi noma* »

N° du test	M O (%)	Facteur K	N° du test	M O (%)	Facteur K
1	0,94	0,343	13	1,24	0,375
2	0,64	0,326	14	0,55	0,411
3	0,69	0,481	15	0,17	0,505
4	0,73	0,411	16	0,35	0,379
5	0,86	0,361	17	0,41	0,437
6	0,28	0,450	18	0,22	0,451
7	0,25	0,481	19	1,38	0,434
8	0,55	0,550	20	0,41	0,420
9	0,41	0,472	21	0,28	0,355
1	0,62	0,385	22	0,21	0,410
11	1,11	0,424	23	0,21	0,448
12	0,86	0,384	24	0,17	0,365

Pour une meilleure lisibilité de ces résultats, les valeurs du facteur d'érodibilité K ont été regroupées en sept (7) classes résumées dans le tableau 16.

Tableau 16: Classes d'érodibilité des sols de l'aire « *ayi noma* »

Nomination du facteur K	Valeur attribuées
K1	0,33
K2	0,37
K3	0,4
K4	0,43
K5	0,47
K6	0,5
K7	0,54

Ce sont ces valeurs qui ont été introduites dans le modèle RUSLE ce qui permet de spatialiser le facteur d'érodibilité (K) dans Idrisi Andes (cf. figure 58).

5.1.3. Le facteur topographique LS

L'influence du relief se caractérise par la longueur de la pente et le degré de la pente. la déclivité est un élément déterminant de par son action gravitaire. Elle agit sur la vitesse de ruissellement et donc sur l'importance de l'ablation des matériaux détritiques, tandis que la longueur de la pente participe à la prise de vitesse du ruissellement et concourt à sa concentration par accroissement de l'aire de réception (Chevalier et *al.*, 2002). L'érosion s'intensifie avec l'augmentation de la longueur de la pente. Le calcul de ce paramètre dans le SIG est géré à partir d'un modèle numérique de terrain de résolution 30 m. La longueur de la pente est en réalité rapporté à la longueur de la parcelle standard qui est 21,8 m, tandis que le paramètre m est introduit dans la formule pour tenir compte de l'érosion ravinante.

$$L = (\lambda / 21,8)^m.$$

m est un exposant de longueur de pente sans dimension (Wischmeier et Smith, 1978). Cet exposant varie en fonction de β qui introduit les pertes en terre par ruissellement concentré dans les rigoles et de $1 + \beta$ qui correspond au taux d'érosion par l'impact des gouttes de pluie (effet splash).

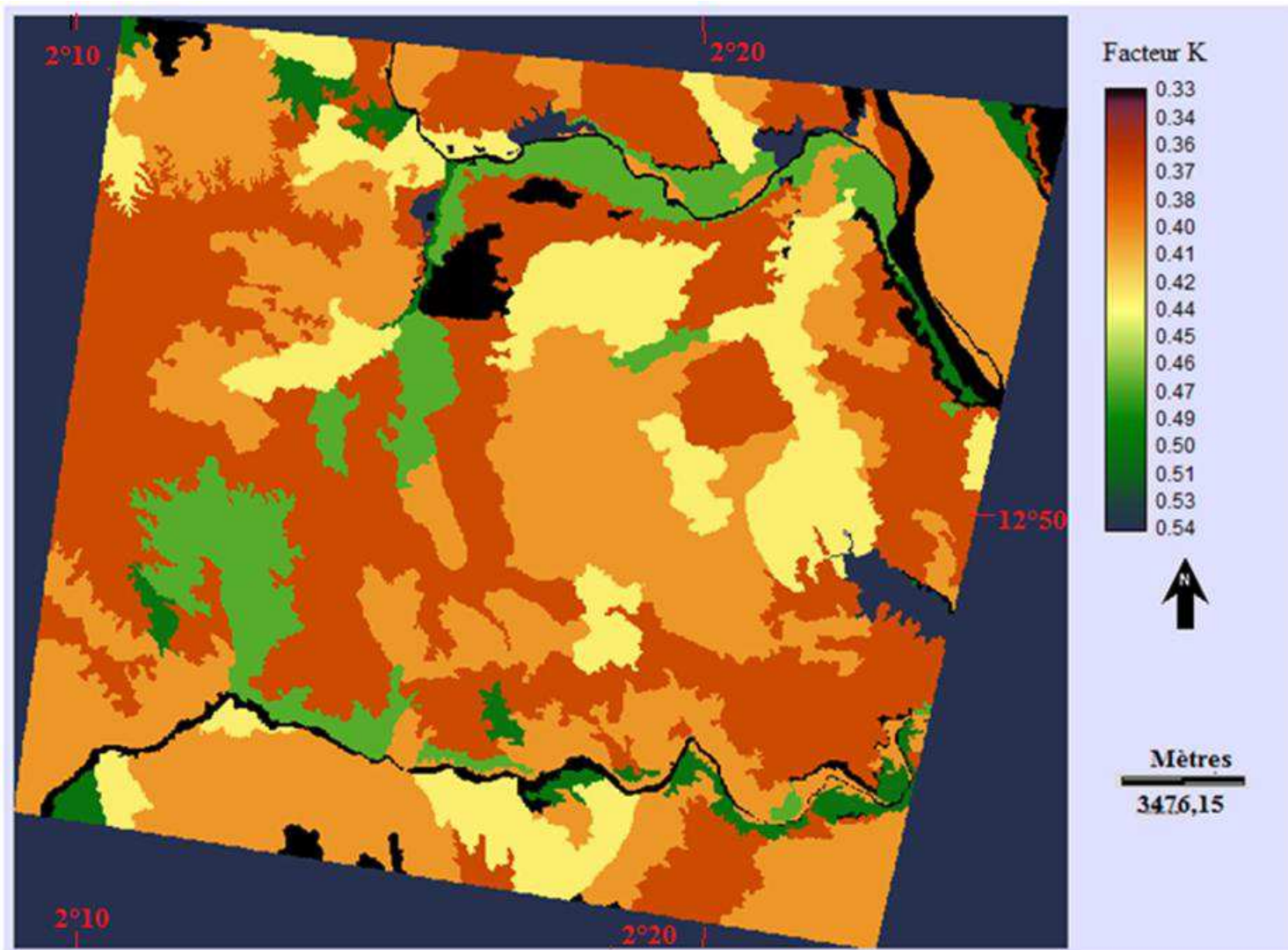


Figure 58: Répartition du facteur K

$$m = \beta(1 + \beta)$$

β dépend de l'angle de pente θ du versant : $\beta = (\sin\theta/0,0896)/(3,0(\sin\theta)^{0,8} + 0,56)$ (USDA/ARS, 2008).

m est un paramètre tel que $m = 0,5$ si la pente est $> 5\%$, $m = 0,4$ si la pente est de $3,5$ à $4,5\%$, $m = 0,3$ si la pente est de 1 à 3% et $m = 0,2$ si la pente est $< 1\%$ (Sadiki et al. 2004). Cependant, Le plus souvent m est appliqué uniformément à l'ensemble du paysage, ce qui ne permet pas de tenir compte de l'effet réel de la topographie sur le phénomène d'érosion.

L'inclinaison de la pente est traité à partir du MNT pas de 30 m. ce paramètre est estimé à partir de deux (2) régressions S1 et S2.

$$s1 = 10,8 * \sin\alpha + 0,03 \text{ si la pente est inférieure à } 9\%$$

$$s2 = 16,8 * \sin\alpha - 0,05 \text{ si la pente est supérieure ou égale à } 9\%$$

Dans le calcul de S , les valeurs de pentes supérieures à 9% sont systématiquement supprimées dans le cas de $s1$ et celles inférieures à 9% pour le cas de $s2$. Le paramètre S est ainsi obtenue en additionnant les couches $s1$ et $s2$. Ce paramètre S tient compte de l'accroissement du potentiel érosif des pluies et du ruissellement rattaché à une accentuation de la pente.

Le croisement de la carte de longueur (L) figure 59 et celle de l'inclinaison de pente (S) figure 60 a permis de calculer le facteur topographique (LS). Ce dernier permet de prendre en compte l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Ces valeurs varient de $0,00$ à $8,2$ (figure 61).

Les valeurs les plus fréquentes du facteur LS sont comprises entre $0,73$ et $2,37$ (figure 62).

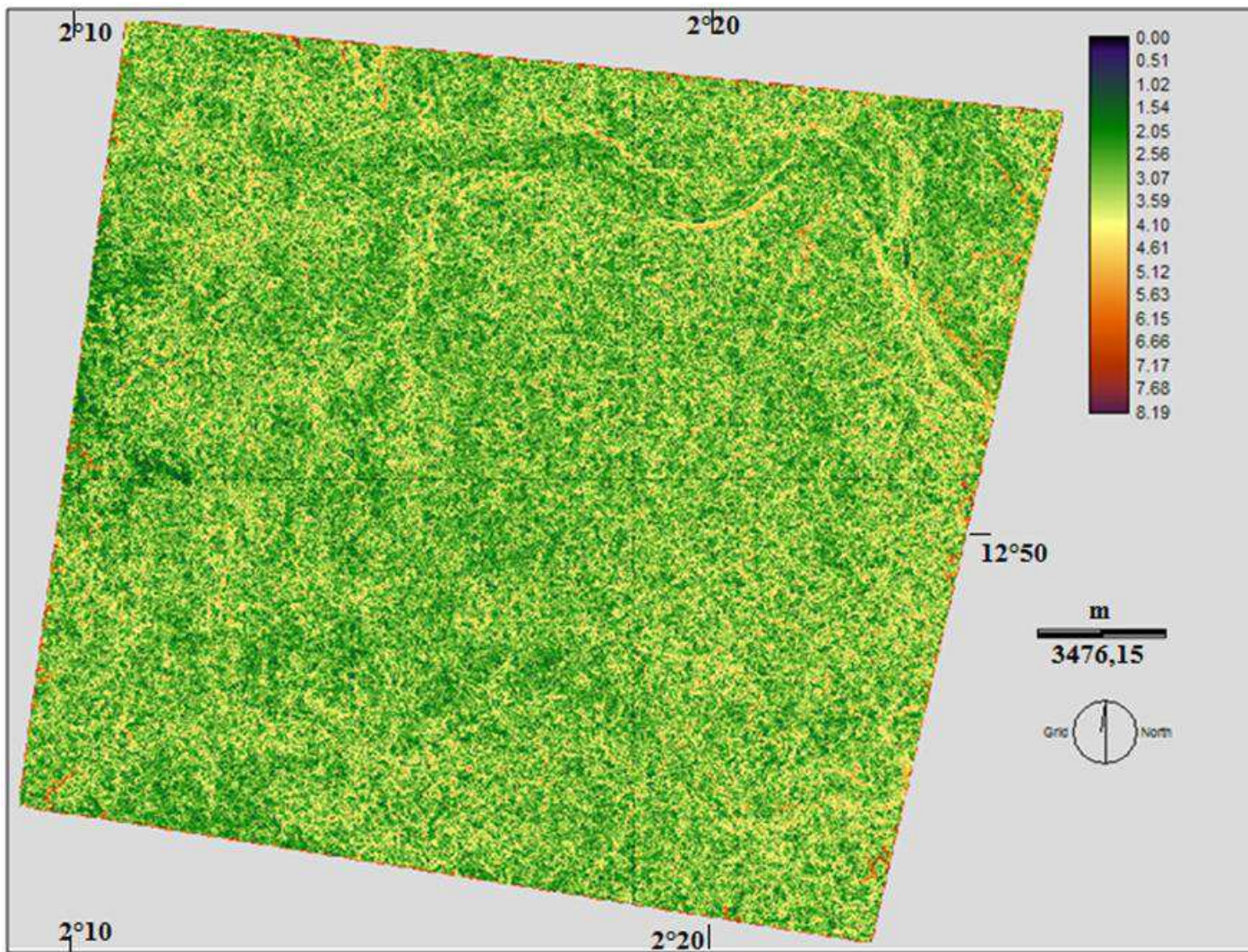


Figure 59: Longueur de pente

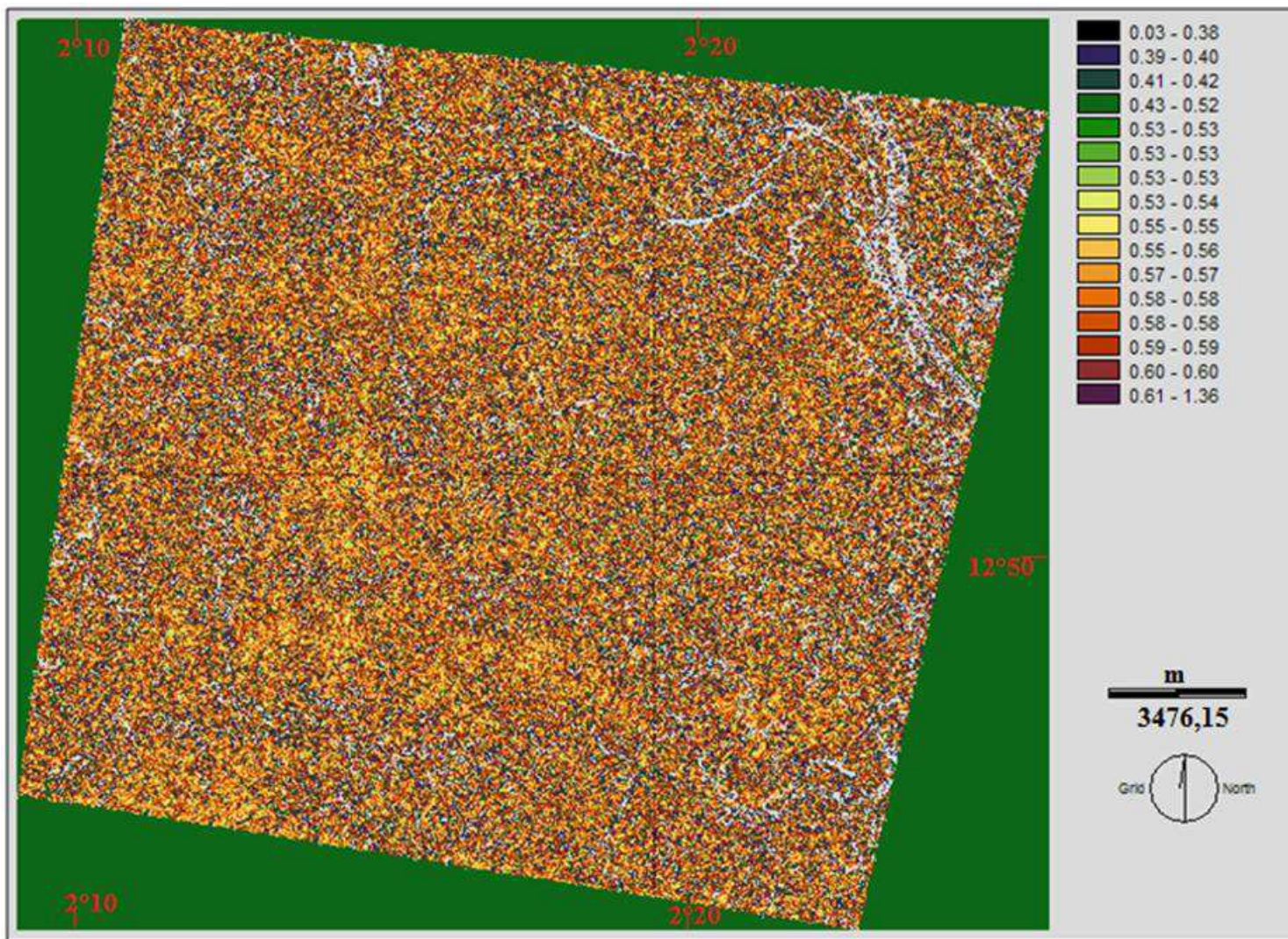


Figure 60: Inclinaison de pente

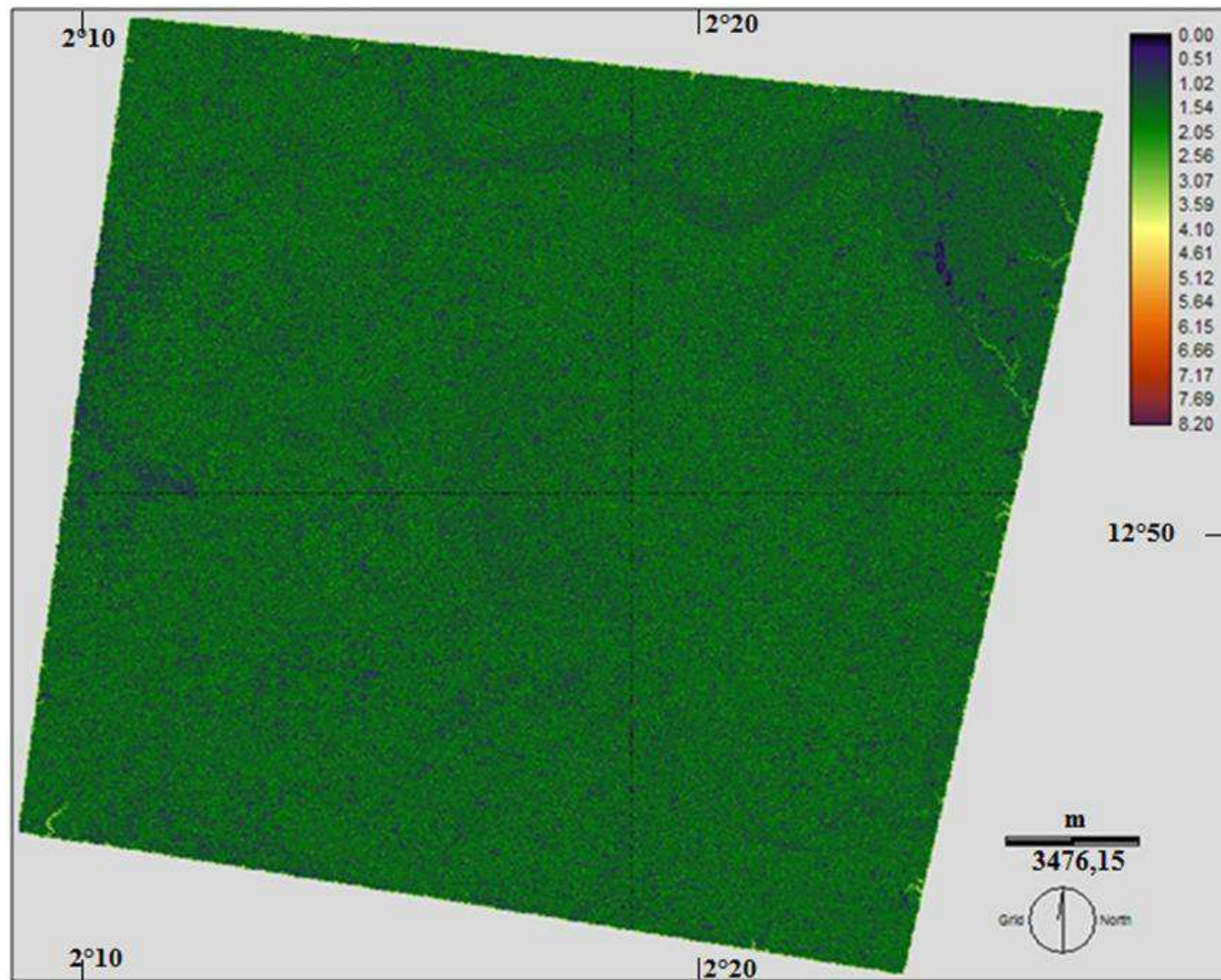


Figure 61: Répartition du facteur LS

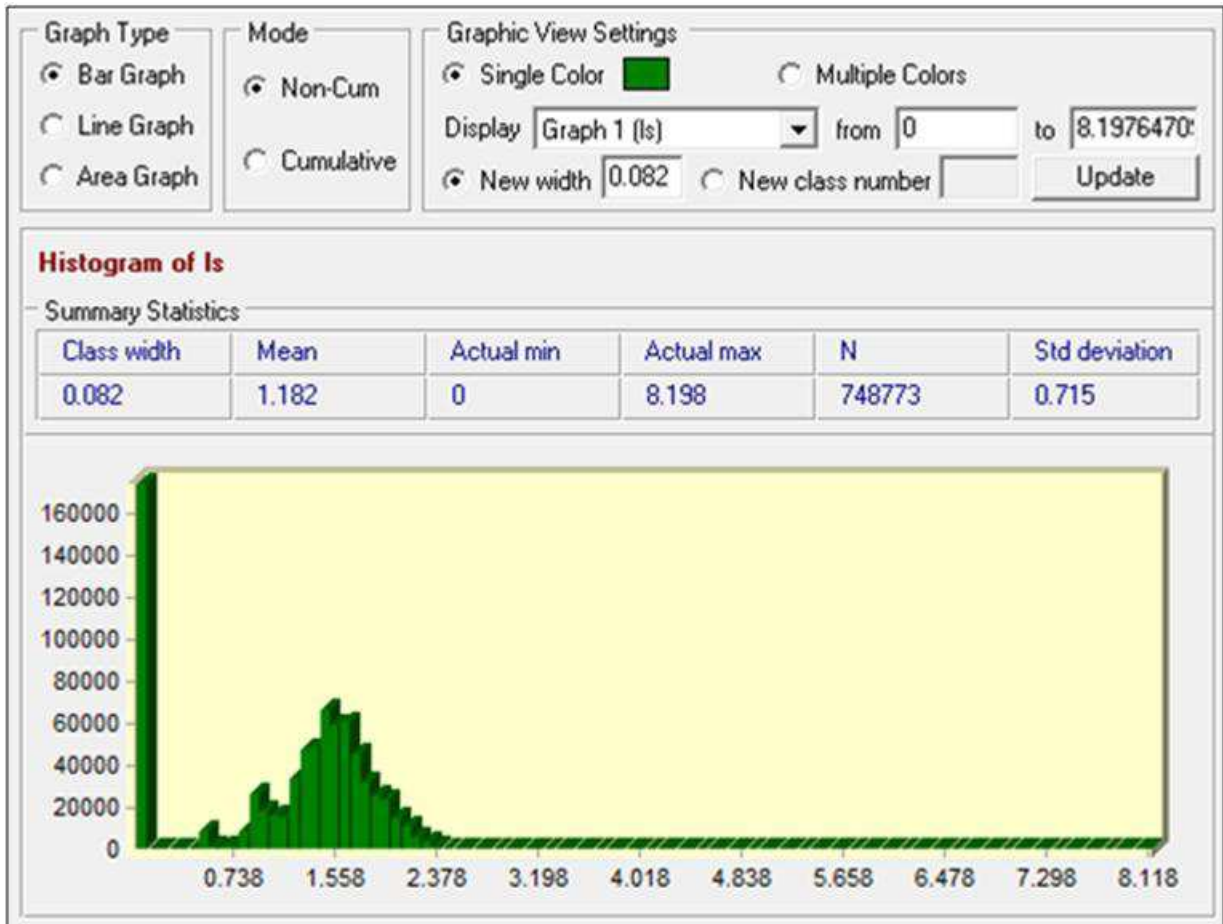


Figure 62: Histogramme représentant la distribution des valeurs de LS

5.1.4. Le facteur d'occupation du sol (C)

La couverture des sols est après la topographie le facteur le plus important contrôlant le phénomène d'érosion. Il définit l'efficacité relative des principaux systèmes cultureux et/ou de la végétation naturelle en terme de prévention des pertes de sols. Selon les unités d'occupation (végétation ou sol nu...), le risque d'érosion peut être atténué ou aggravé. L'effet de la couverture végétale selon Chevalier et La Torre (2002) est modulé à la fois par le taux de recouvrement du sol et par les caractéristiques liées aux types de végétaux présents (architecture, hauteur, racine...). Par exemple, l'érosion sera beaucoup plus réduite par une couverture type savane arbustive dense que par une couverture de type broussailles, cultures ou sols nus. Selon Xanthoulis et al., (à paraître), ce facteur traduit la proportionnalité de perte

en sol entre une parcelle cultivée et une parcelle en jachère nue continue. La répartition spatiale du facteur est faite à partir l'image satellitaire Spot HVR, du 26 septembre 2010 et de résolution 12 m, qui constitue la situation la plus récente que nous disposons. C varie en fonction du taux de recouvrement du couvert végétal entre 0,001 pour la savane arbustive denses à 1 pour les sols nus. Dans le dernier cas, l'érosion est une fonction du pourcentage de sol exposé. Ce dernier est soumis au détachement sous l'effet du jet des gouttes de pluie (Le Bissonnais et *al.*, 1998). Dans notre zone cette classe d'occupation du sol est constituée par les sols nus de plateaux et de glacis et les terrains rocheux. Pour les secteurs densément couverts C prend la valeur de 0,001 puis que la végétation constitue un frein à l'érosion. Ainsi, la prise en compte de la distribution de types d'occupation des sols permet de déterminer les secteurs les plus sujets aux processus d'érosion. Le tableau 17 illustre la répartition du facteur C en fonction des unités d'occupation des sols de 2010 et la figure 63 donne leur spatialisation.

Tableau 17 : Les valeurs du facteur C par types d'occupation du sol

Types d'occupation du sol	Facteur C
Sols nus	1
Broussailles	0,8
Savane arbustive très dégradée	0,1
Savane arbustive dégradée	0,01
Cultures	0,5
Jachère	0,3
Cordons ripicoles	0,001
Savane arbustive dense	0,001

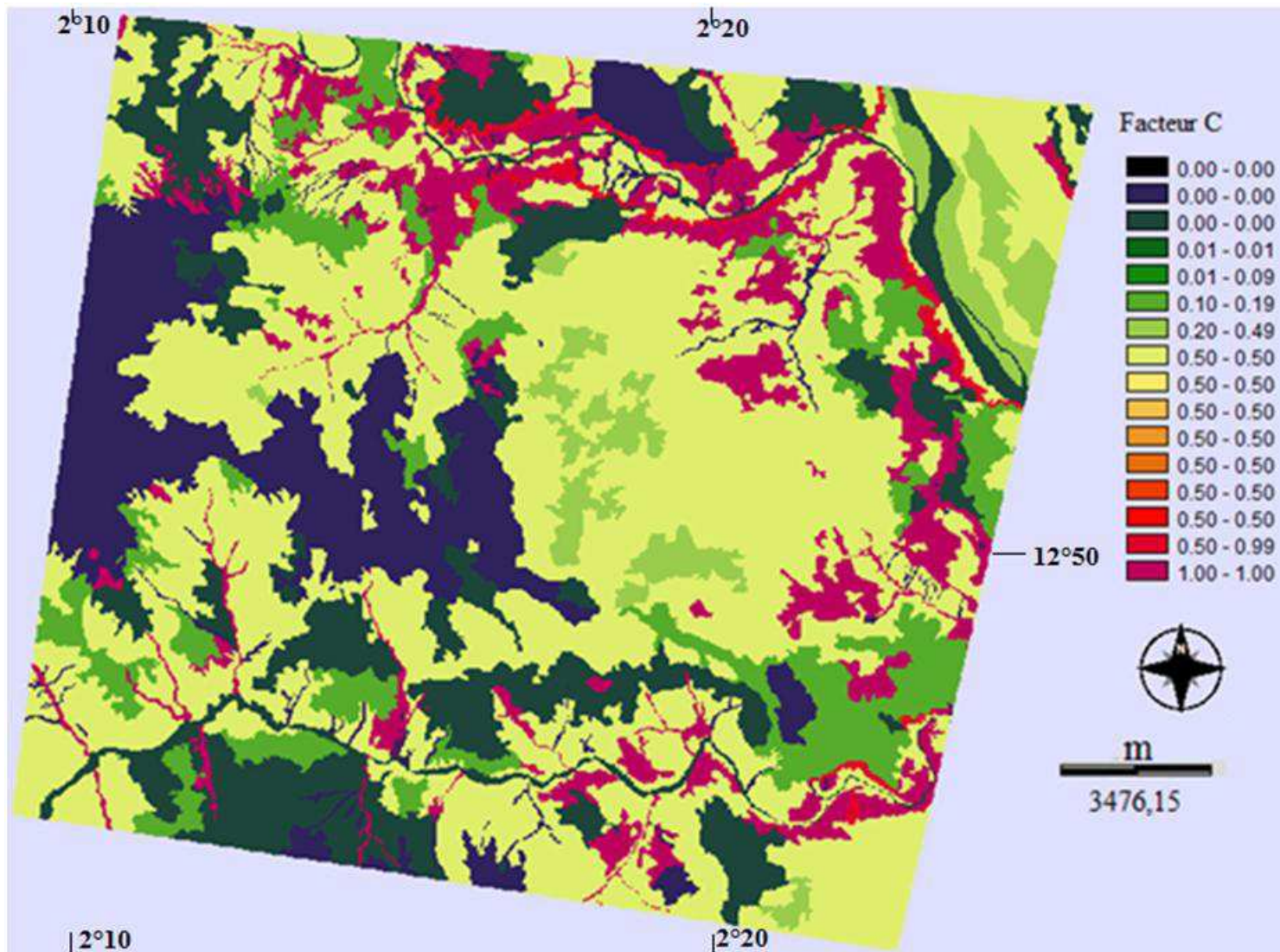


Figure 63: Répartition du facteur C

5.1.5. Le facteur P : influence des pratiques antiérosives

Le facteur P représente, par définition, le rapport de la perte de sol liée à une pratique de soutien particulière à la perte correspondante liée aux cultures et aux récoltes et ensemencement en amont et en aval de la pente (Wischmeier et Smith, 1978). Il tient compte des pratiques antiérosives qui favorisent la diminution du ruissellement à la surface ainsi que la quantité de sédiments transportés. Il diffère de C en tenant compte des effets additionnels de mesures de conservation de sol. Le facteur P traduit l'impact des aménagements sur la perte en sol par rapport à la situation sans aménagement. Sont prises en compte toutes les pratiques ayant une influence sur les effets de l'érosion hydrique.

Le facteur des pratiques antiérosives est défini par comparaison avec un étalon $P = 1$ pour les secteurs non aménagés ; il varie entre 0 et 1 pour les situations avec aménagement. Dans la zone « *ayi noma* », les mesures antiérosives se résument à quelques travaux de conservation des eaux et des sols (demi-lunes, banquettes et des cordons pierreux) qui ont été identifiés. Pour pouvoir spatialiser le facteur P, les contours de ces aménagements ont été relevés intégrés et numérisés sous forme d'un shapefile dans ArcView. Ainsi des valeurs sont attribuées aux zones aménagées : la valeur 1 a été affectée à la plus grande partie sans aménagée. En revanche, pour les sites aménagés, s'inspirant de Cheikha Lilia et Moncef (2008), en fonction de la topographie, la valeur 0,1 a été affectée aux secteurs du plateau aménagés en demi-lunes et banquettes et 0,3 pour le secteur aménagé en cordons pierreux sur le versant (Cf. tableau 18). Les secteurs aménagés ne dépassent pas 0,19 % de la totalité de l'espace étudié (figure 64).

Tableau 18: Pratiques antiérosives (répartition du facteur P sur le plateau de Dyabou)

Types d'aménagement	Pente %	Facteur P
Aucun	-	1
Banquettes et demi-lunes	1-3	0.1
Cordons pierreux	> 10	0.3
Demi-lunes	3-10	0,12

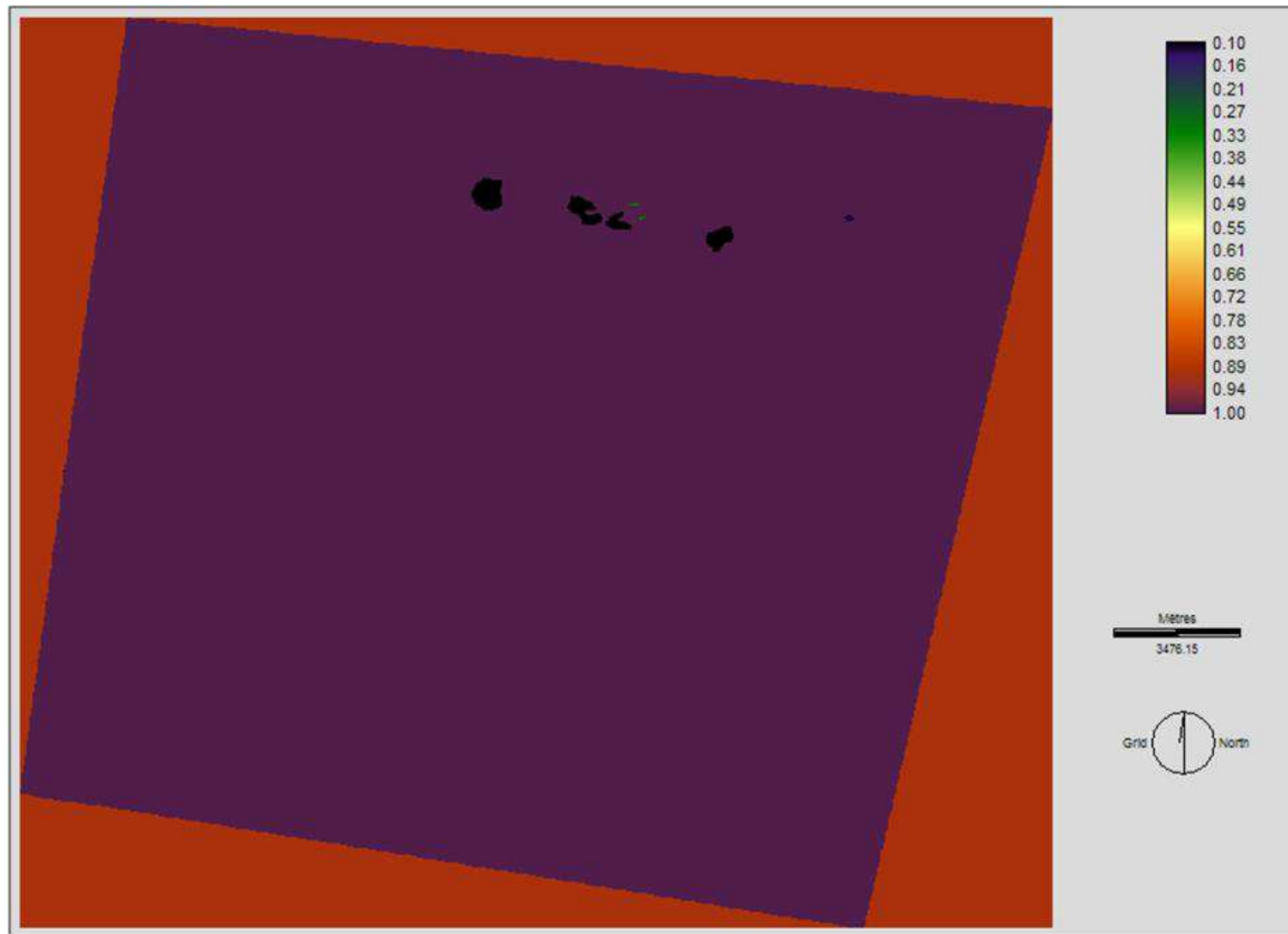


Figure 64: Répartition du facteur P

5.2. Estimation des risques érosifs

La carte des risques érosifs a été élaborée par intégration des différents facteurs intervenant dans l'érosion hydrique et regroupés en deux séries d'information. D'une part les facteurs intrinsèques de la zone d'étude c'est à dire des paramètres d'ordre physique que sont les facteurs R, K et LS, et l'influence humaine sur l'érosion (facteurs C et P) d'autre part. Ces couches d'information sont par la suite croisées comme l'illustre la figure 65. Le croisement consiste à multiplier ces couches dans Idrisi suivant la commande Image calculator.

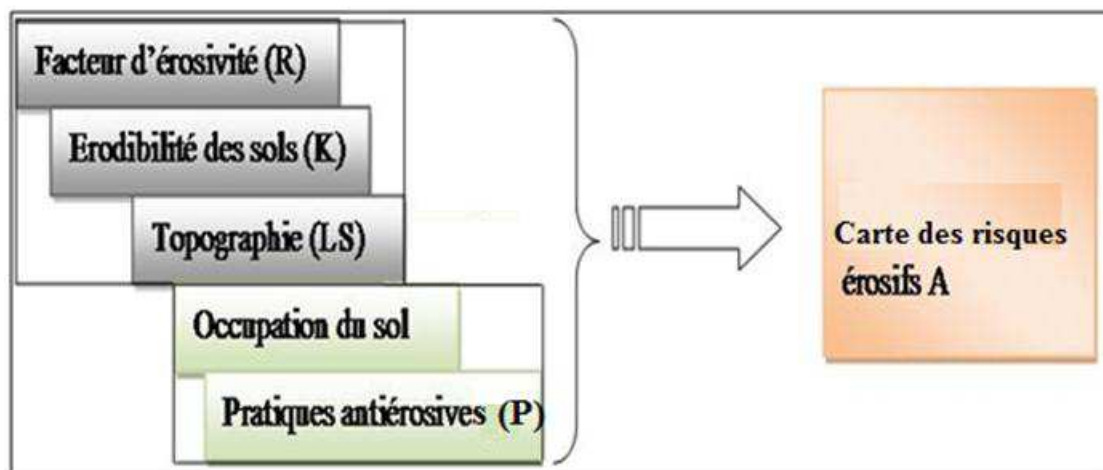


Figure 65 : Croisement des couches pour l'obtention de la carte des risques d'érosion

La figure 66 montre la répartition spatiale de différentes zones de production de sédiments. L'érosion est variable d'un point à l'autre, selon l'influence des facteurs qui la contrôlent. Comme l'ont su bien dit Anglès D'Ortoli et Maurer (2000), les limites des classes d'érosion peuvent varier selon que l'on se place du point de vue de l'agriculteur, de l'agronome, du sédimentologue ou du forestier : l'importance portée à telle ou telle érosion n'est pas la même. La cartographie des risques érosifs a permis de comprendre que l'aire « *ayi noma* » est sérieusement soumise au problème de l'érosion des sols.

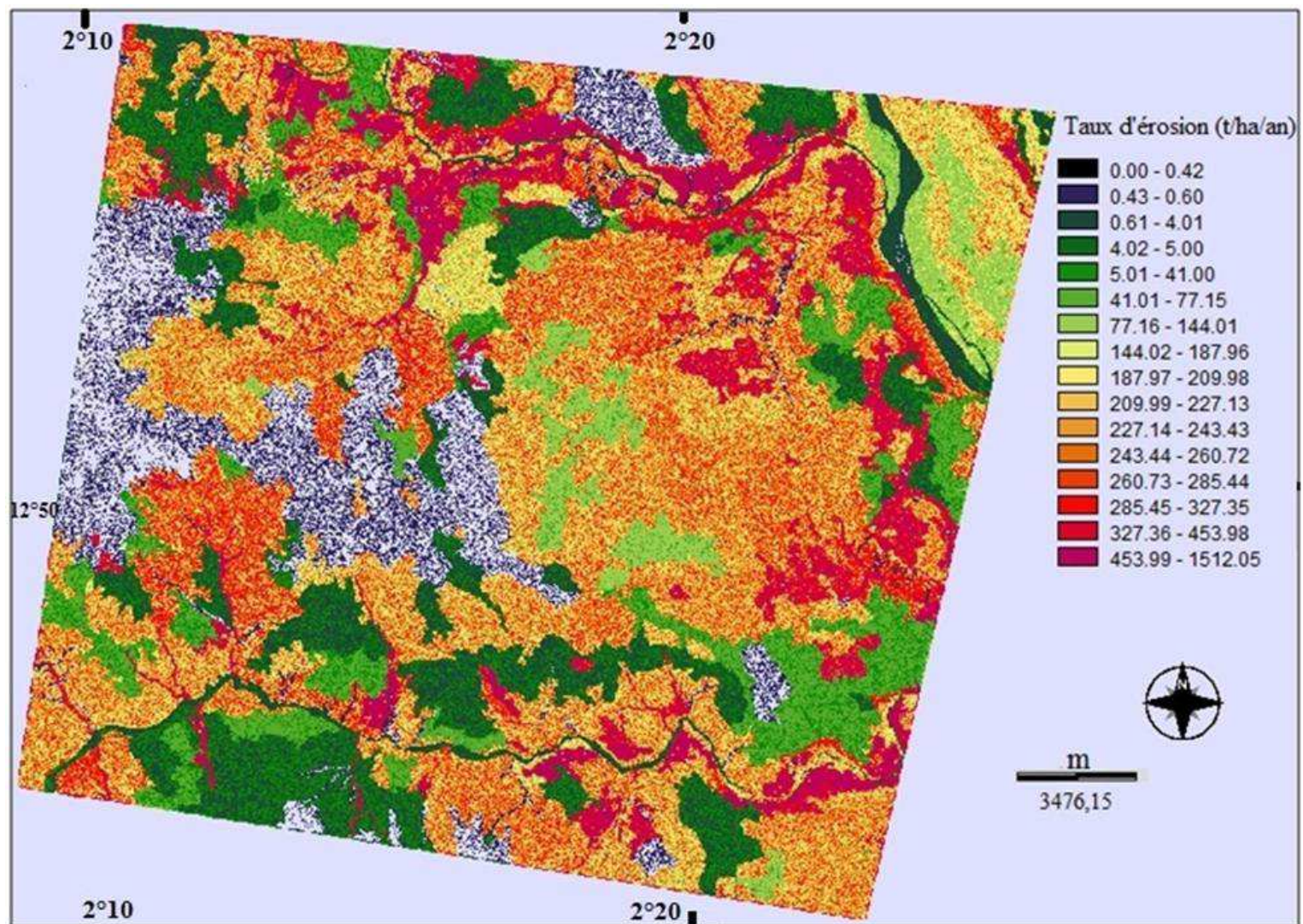


Figure 66: Carte des risques érosifs de l'aire « ayi noma » en utilisant uniformément le facteur R

L'observation de la carte des risques montre que les plus faible taux d'érosions inférieur ou égal à 4 t/ha/an se trouvent dans les secteurs encore boisés où se localisent les savanes arbustives denses et dégradées et où les formations superficielles sont pour l'essentiel cuirassées. Le faciès sableux du plateau est affecté par le risque d'érosif. Cela est d'ailleurs comparable à ce nous avons observé sur le terrain. Le plus souvent, ce faciès est affecté par le ravinement voir (photo 28). L'examen de la carte de répartition des pertes en sol montre que les valeurs les plus élevées des risques érosifs se situent sur les secteurs les plus pentus pour lesquels la valeur du facteur C est élevée.

La distribution des fréquences de pertes en sol peut être visualisée grâce à l'histogramme des valeurs es risques d'érosion (figure 67). Le plus grand nombre de valeurs est compris entre 0 et 438t/ha/an. On observe à partir de cette dernière valeur une baisse exponentielle de valeurs du risques jusqu'à 1512,05 t/ha/an. Les pertes en terre ont été regroupées en trois classes de risque d'érosion et leurs superficies sont calculées par la fonction Area du menu Gis Analysis/Database Query (tableau 19). Cette classification est faite en fonction du seuil de tolérance qui définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches Roose (1999). Le seuil de tolérance varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols.

Tableau 19 : essai de classification de risque d'érosion dans l'aire « *ayi noma* »

Pertes en sol (t/ha/an)	Risque d'érosion	Superficie (ha)	Proportion
<1	Faible	14 153	26
1 < A < 12	Moyen	7 859,7	14,5
>12	élevé	32 177,8	59,5
Total	-	54190,5	100

Il ressort de l'analyse du tableau 20 qu'une grande de la zone étudiée soit 59,5 %, est exposée à un risque érosif élevé avec des taux d'érosion supérieurs à la valeur limite du seuil de tolérance qui est de 12t/ha/an. Cette classée de risque érosif est localisée sur les versants dénudés. En dehors de l'absence du couvert végétal, ces versants se trouvent dans les secteurs à topographie accidentée. Ahys et al. (1993) disaient à ce propos que l'existence de perte de sol élevée n'est pas seulement due à l'absence de la végétation ; en

effet, le potentiel érosif qui fait abstraction de la nature de l'occupation des terres, a toujours attribué la plus grande valeur pour les sols nus. Le risque d'érosif faible occupe 26 % de la superficie totale dont l'essentiel se localise dans le domaine de la savane arbustive dense. En revanche le risque érosif faible moyen n'occupe que 14,5 %.

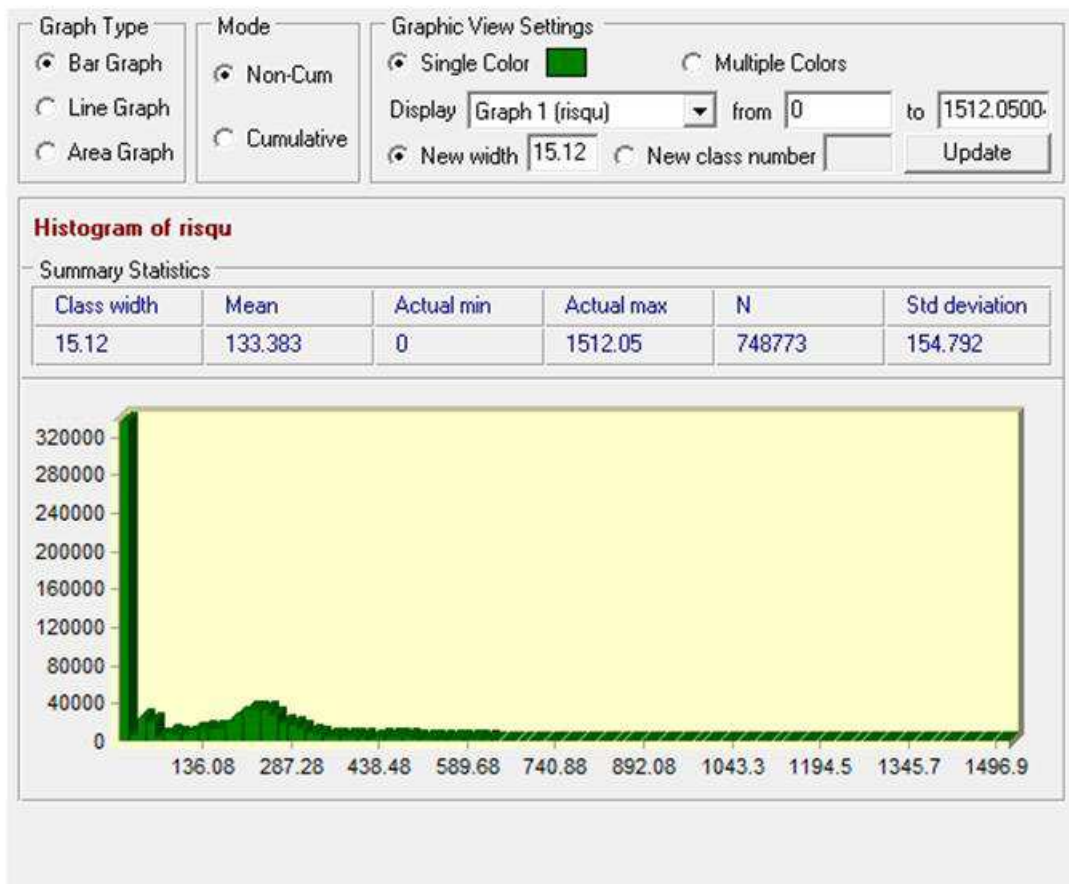


Figure 67: Histogramme représentant la distribution des valeurs de risque érosif

En utilisant la fonction *REGRESS* de la commande *Statistics* du menu *GIS Analysis*, nous sommes arrivés à corréler différentes variables.

En définissant le facteur C comme variable indépendante (ou explicative) et la quantité de pertes en sol comme variable dépendante (ou expliquée), le résultat obtenu (figure 68) traduit une forte corrélation positive entre ces variables. Le coefficient de corrélation (r) est égal à 0,93 et le coefficient de détermination vaut 87,92%. Cela veut dire que distribution du facteur C d'occupation du sol expliquent près de 88 % des variations de pertes en terre prédites en

appliquant le modèle RUSLE. On en déduit que le facteur C ou alors la pression qu'exercent les immigrés sur les terres de cultures joue un rôle déterminant sur l'aggravation des risques érosifs dans l'aire « *ayi noma* ». L'application du modèle RUSLE permet de mettre en évidence le rôle prépondérant de l'occupation des sols dans la distribution des risques érosifs dans l'aire « *ayi noma* ».

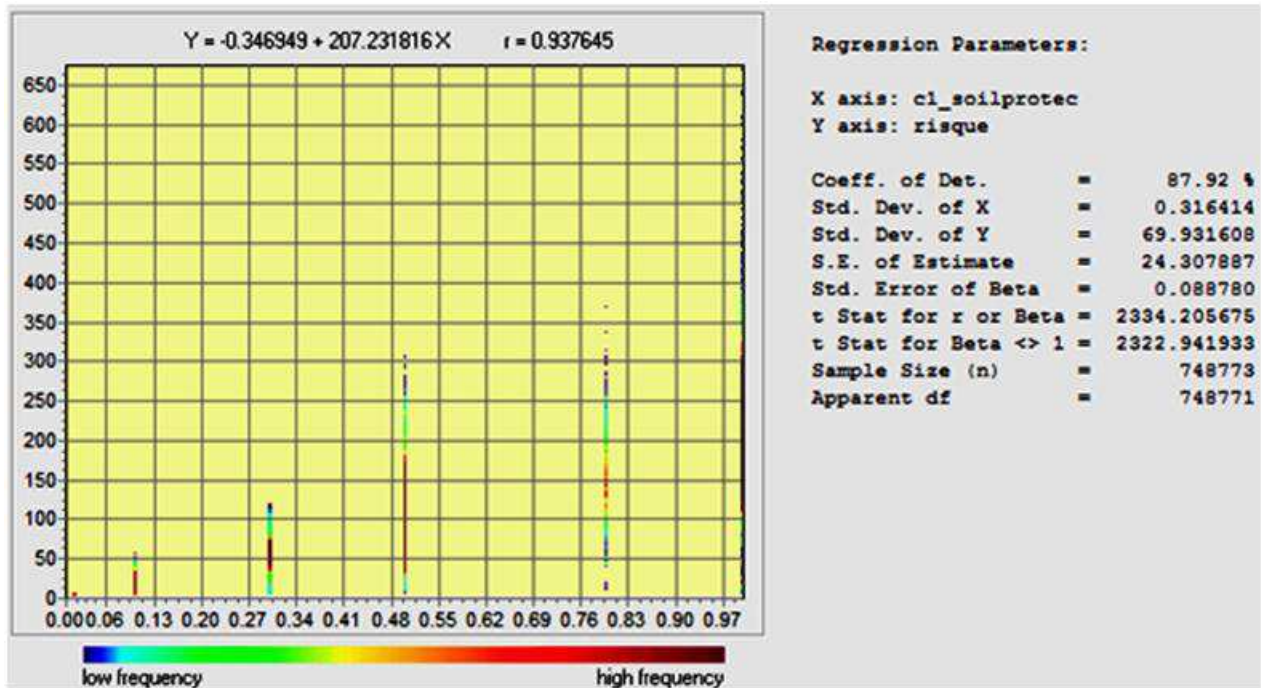


Figure 68: représentation graphique de la corrélation entre l'érosion et le facteur C

5.3. Réalisations des scénarios de simulation

La RUSLE s'applique normalement à des profils topographiques et permet de connaître l'érosion à l'échelle de la parcelle agricole (Fox et Morschell, 2004). Ainsi, vu le degré de dégradation observé à partir de la carte de risque érosif de l'aire « *ayi noma* », on peut proposer de scénarios tout tant jouant sur divers facteurs de l'équation RUSLE. Ces simulations pourront servir de base pour l'élaboration d'un plan d'aménagement.

5.3.1. Sur le facteur d'agressivité de pluies

En suite en tenant de l'amélioration de la pluviométrie ces dernières années, le facteur R a été modifié afin de tenir de la répartition spatiale des pluies qui varie d'un point à un autre. La répartition spatiale des précipitations, tant à l'échelle de la saison des pluies que de l'événement pluvieux, diffère d'un climat à l'autre. Elle est influencée par le relief, les orientations, les interactions entre facteurs locaux et globaux (Descroix et Diehdiou, 2004). La figure 69 met en évidence la variabilité spatiale de la pluviométrie dans l'aire « *ayinoma* ».

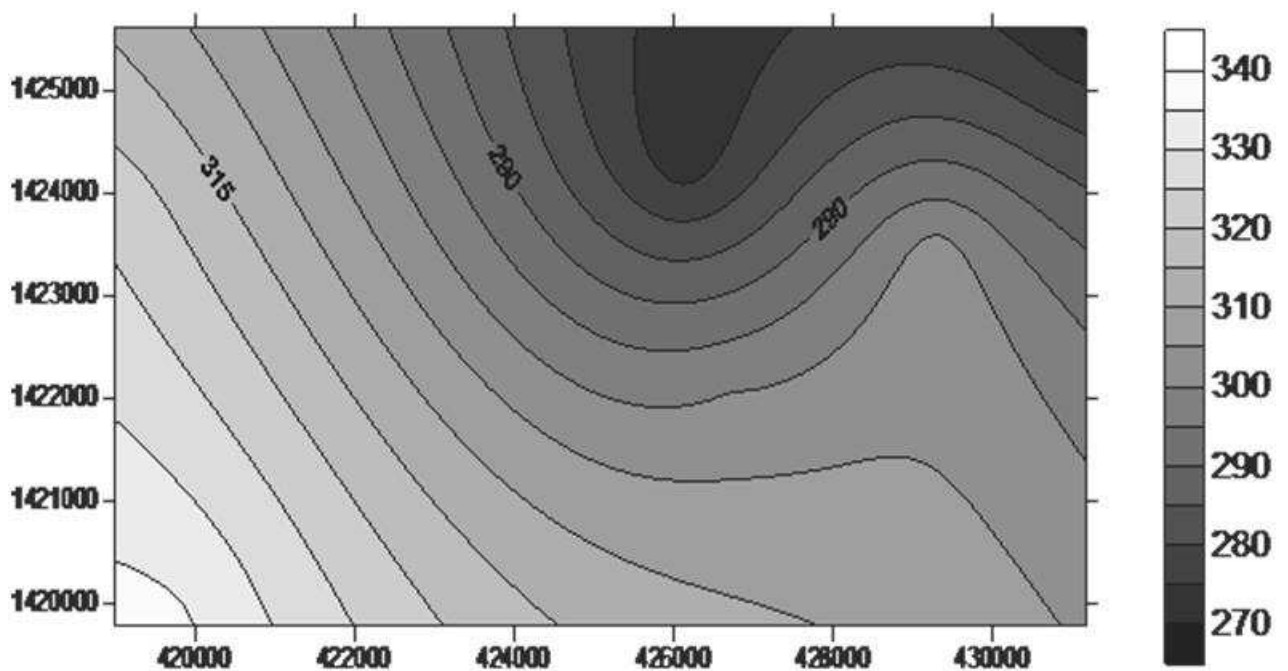


Figure 69: Variabilité spatiale de la pluviométrie en Août 2009.

C'est pourquoi au lieu de tenir compte de la seule valeur du facteur R pour l'ensemble de la zone d'étude, nous avons utilisé les données du réseau de pluviomètres et celles du poste de Tamou en 2009 (tableau 20). La carte d'agressivité des pluies (figure 70) est ainsi obtenue en spatialisant ces données. Cela permet de prendre en compte la variabilité spatiale des pluies et l'extrême variabilité du facteur d'érosivité de l'équation de perte en terre (RUSLE). Celle-ci varie entre 313,19 et 414,62.

Tableau 20: répartition de la pluviométrie et de l'agressivité dans la zone d'étude en 2009.

Pluviomètre	Longitude	Latitude	Hauteur	Agressivité
Arlit	2,32	12,83	658,2	329,1
Baoulégé	2,37	12,91	597,4	298,7
Dyabou	2,32	12,9	704,1	352,05
CheickFari	2,33	12,86	620,5	310,25
Fetta Bogga	2,35	12,85	639,1	319,55
Station	2,35	12,88	630	315
Tamou	2,19	12,76	861,4	430,7
Tyala	2,25	12,88	716,7	358,35
Tyala1	2,26	12,85	778,1	389,05
Dyabou1	2,27	12,87	658,3	329,15

La carte du risque érosif obtenue montre que le facteur R joue un rôle déterminant dans la répartition des risques d'érosion dans cette zone. On observe une augmentation de la valeur maximale du risque d'érosif. Cette valeur correspond désormais 1792,21 au lieu de 1512,05 t/ha/an (figure 71).

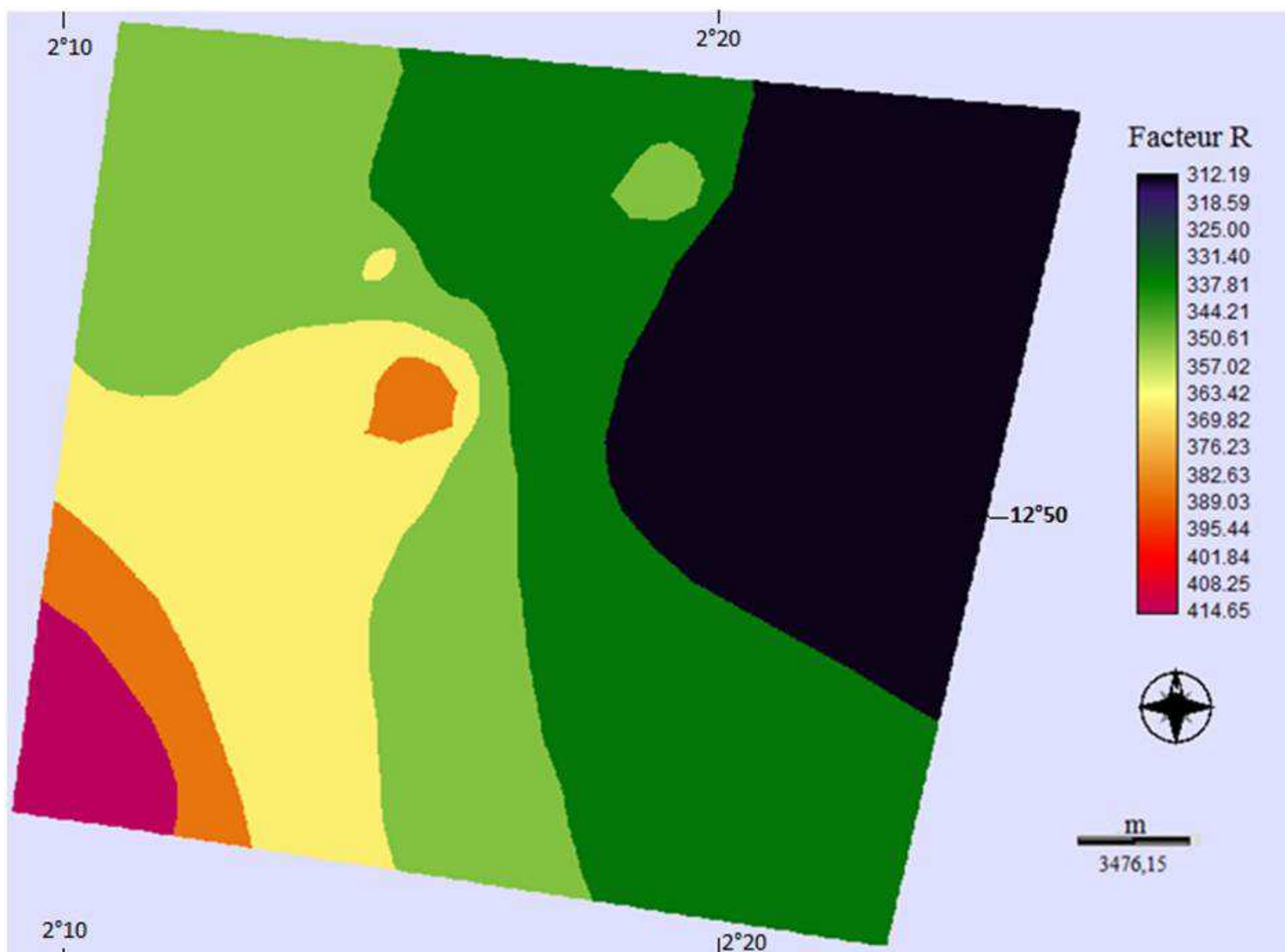


Figure 70: Répartition du facteur de l'agressivité climatique en 2009

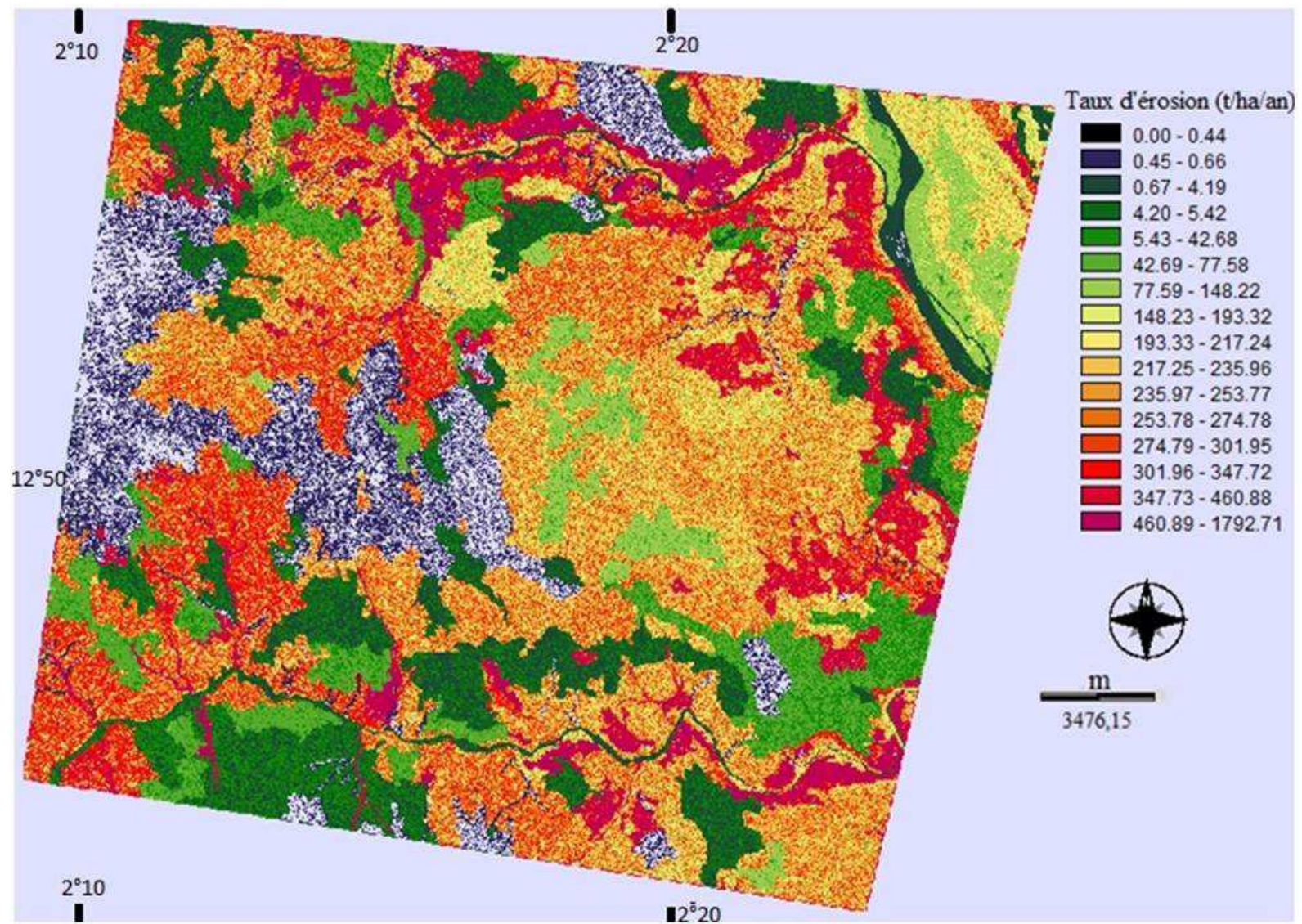


Figure 71: Carte des risques érosifs de l'aire « ayi noma » en utilisant la répartition du facteur R en 2009

5.3.2. Sur le facteur d'occupation du sol

Il s'agit pour ce cas de faire de projections sur les valeurs du facteur C de l'occupation du sol qui intègre aussi bien la végétation naturelle que les types de cultures. Ainsi, nous avons considéré certaines portions de la zone occupées par les cultures comme de jachères et du coup le facteur C prend la valeur de 0,3 au lieu de 0,5 tandis que les classes occupées par la végétation naturelle ont soit conservé soit modifier leur valeur initiale.

Cependant le facteur P a été appliqué tel que utilisé sur les deux premières cartes c'est-à-dire, P n'a des valeurs différentes de 1 que dans le secteur aménagés en banquettes, demi-lunes ou cordons pierreux. En revanche le facteur R correspond à la répartition de l'agressivité des pluies de 2009 qui tient compte de l'inégale répartition des précipitations dans l'espace. En croisant les différents facteurs de la RUSLE on obtient la carte de la figure 72.

5.3.3. Sur le facteur des pratiques antiérosives

La carte des risques érosifs, obtenue par le modèle RUSLE, nous permet de proposer de simulations qui peuvent par la suite servir de base pour l'élaboration d'un plan d'aménagement en fonction notamment des unités topographiques. Le choix de type d'ouvrages a été guidé par les réalisations trouvées déjà sur le site mais aussi les bandes enherbées dont l'effet a été testé durant trois campagnes sur les parcelles expérimentales. En effet, celles-ci ont un rôle important dans la réduction de ruissellement et de l'érosion.

Ainsi des banquettes et demi-lunes ont été installées sur les faciès cuirassé du plateau afin de retenir les eaux de ruissellement et en même temps agir sur le transfert de sédiments. La simulation consiste donc à appliquer la RUSLE avec les valeurs modifiées du facteur des pratiques antiérosives (P) au niveau des secteurs traités en banquettes et demi-lunes, la valeur du facteur P devient donc inférieure à 1. Ainsi la valeur de 0,1 est attribuée à toutes les surfaces traitées en banquettes et demi-lunes. Le choix de cette valeur est guidé par le fait que ces réalisations sont implantées sur le faciès cuirassé du plateau où les pentes sont faibles.

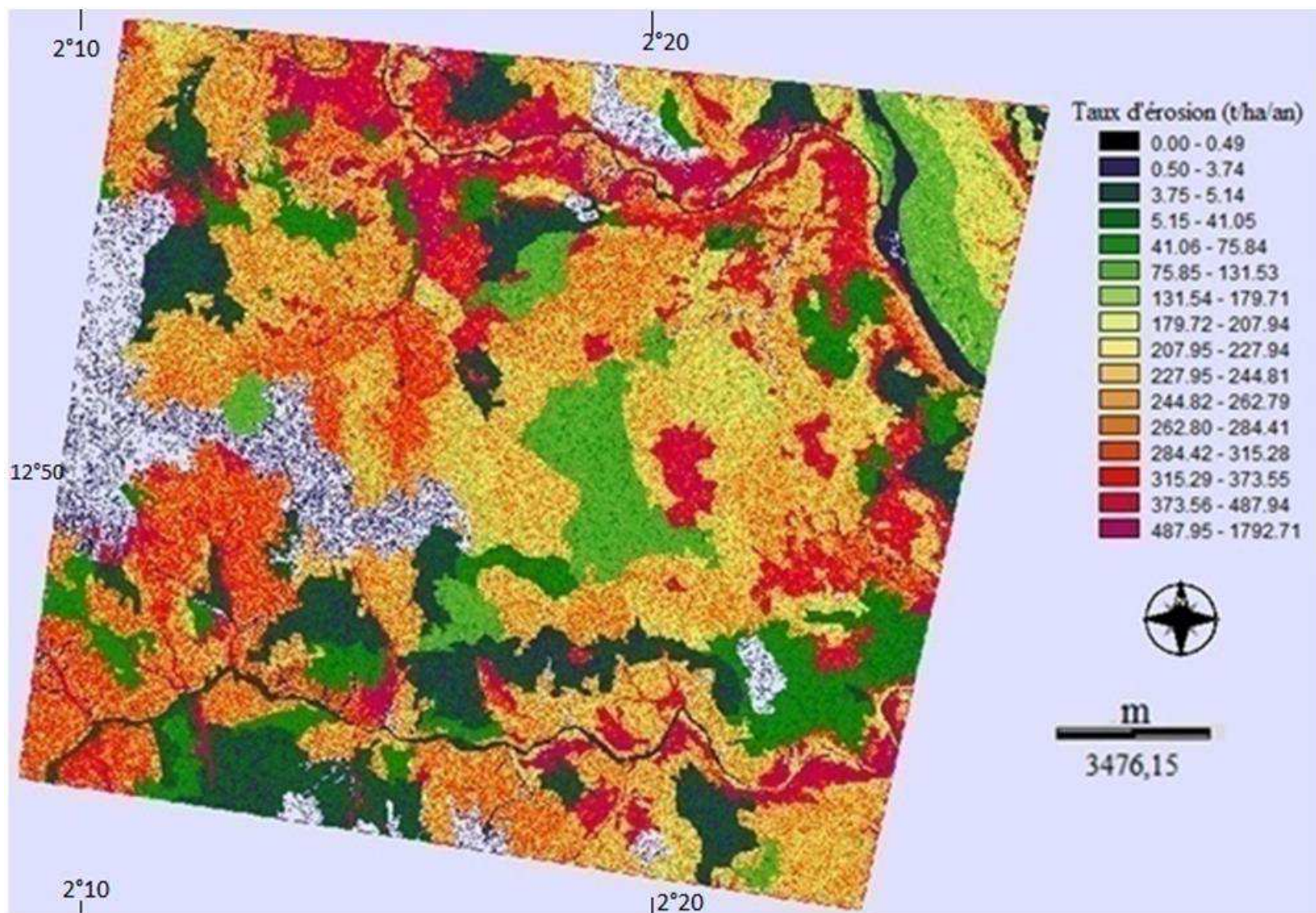


Figure 72: Carte des risques érosifs par simulation du facteur C

En fait ces réalisations sur le plateau permettent la rétention d'une bonne partie des eaux de ruissellement et des sédiments. Cela améliore donc l'infiltration des eaux.

En outre, des bandes enherbées d'*Andropogon gayanus* ont été implantées sur des secteurs propices au développement de leur cycle végétatif. Il s'agit ici de faciès sableux du plateau et sur certains secteurs de glacis. Des réalisations comme les bandes enherbées fonctionnent comme un filtre et piègent les sédiments en amont, même si par ailleurs les bandes enherbées n'ont d'effet dans leur amont (Zougmore et *al.*, 2004 ; Roose, 1971). Comme nous avons étudié son effet sur les parcelles, la valeur de 0,5 a été attribuée au facteur P à tous les secteurs aménagés. Celles-ci jouent un double rôle. D'une part elles protègent les sols contre l'effet splash et de d'autre et réduit la vitesse de ruissellement et le transfert de sédiments vers l'aval. La figure 73 représente la répartition de facteur P simulé. La figure 74 montre la distribution des risques érosifs en tenant compte de la simulation du facteur P. Les techniques de conservation des eaux et des sols, qu'elles soient biologiques ou mécaniques, permettent de réduire la vitesse de ruissellement et au delà le risque d'érosion.

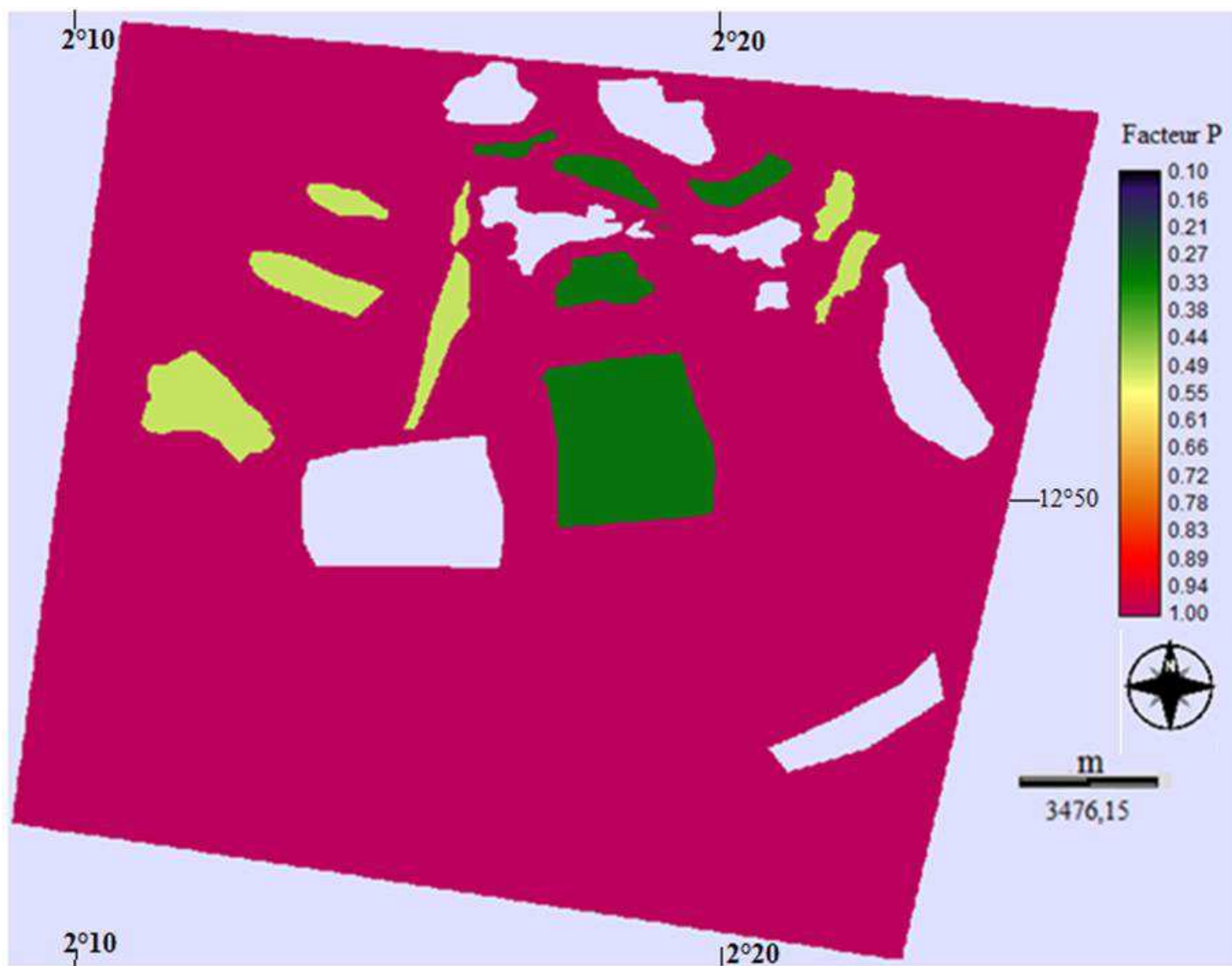


Figure 73: Répartition du facteur P obtenu par simulation

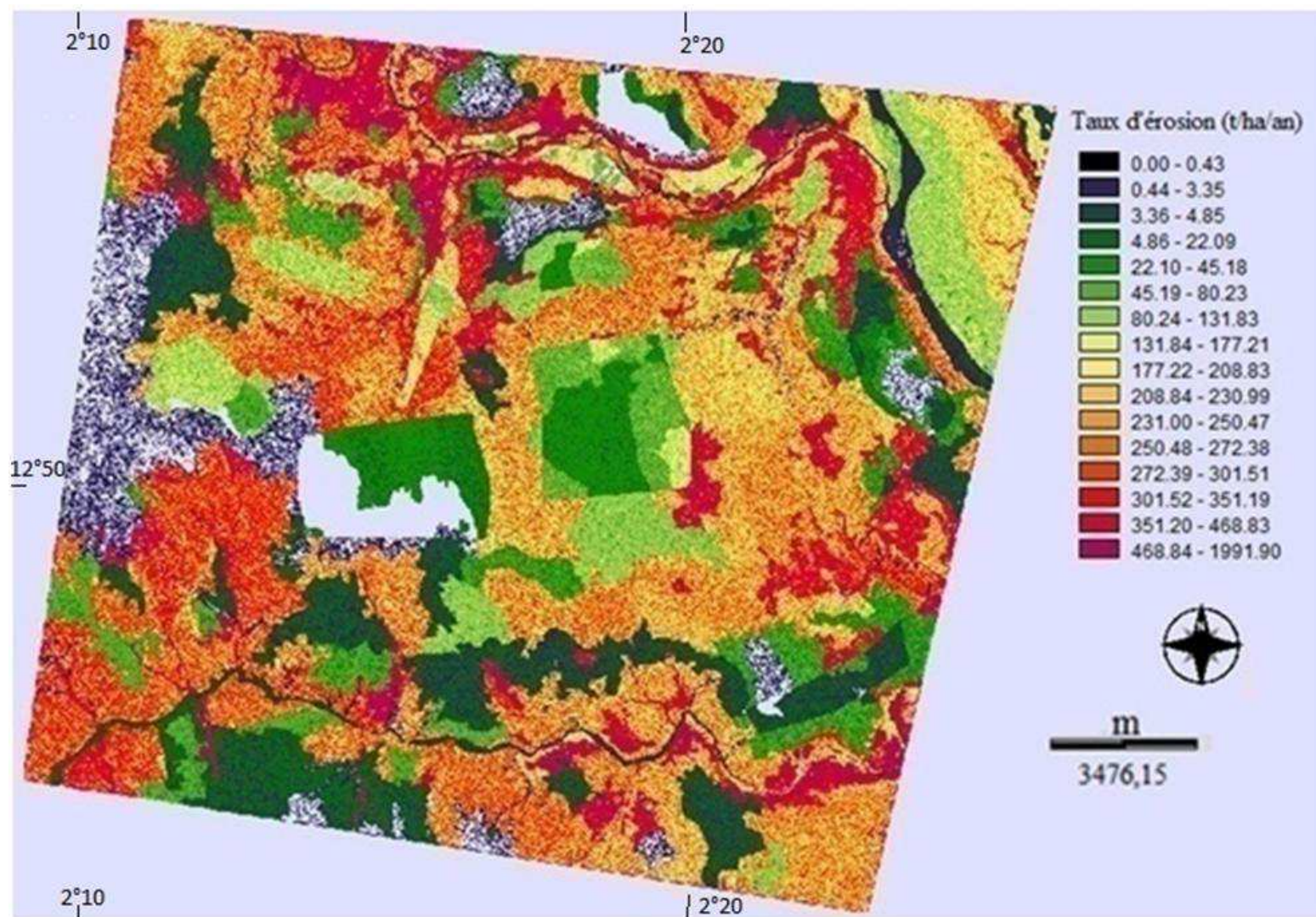


Figure 74: Carte des risques érosifs par simulation du facteur C

L'application de RUSLE a donné des résultats intéressants sur le risque érosif dans l'aire « *ayi noma* » malgré certaines difficultés inhérentes à son utilisation du fait qu'initialement ce modèle est conçu pour étudier l'érosion en nappe sur les parcelles expérimentales. Ce modèle nous a permis de quantifier et d'analyser les risques d'érosifs dans l'aire « *ayi noma* ». La réalisation des scénarios permettra plus tard aux aménagistes de mieux choisir les stratégies d'intervention afin de venir en aide aux paysans qui observent de plus en plus leur cadre de vie se détruire.

L'analyse des différentes cartes des risques érosifs montre que 59,5 % de l'espace cartographié sont affectés par un risque érosif élevé et qui dépasse de façon exponentielle le seuil de tolérance de 12 t/ha/an d'où la nécessité d'intervenir le plus vite afin d'apporter de solutions dans cette zone dont la pression sur les ressources naturelles ne fait qu'augmenter. La spatialisation du risque érosif peut aider les décideurs à déterminer la portée du problème de dégradation des sols à la périphérie du parc du W et de concentrer les actions d'aménagements là où elles seront les plus efficaces.

5.3.4. Propositions d'aménagement

La dégradation accentuée des sols du fait des phénomènes naturels (climat) et anthropiques (exploitation sans mesures conservatoires), a entraîné la formation des vastes surfaces dénudées sur les glacis et les plateaux dont l'importance devient inquiétante devant la forte pression démographique et foncière que connaît l'aire « *ayi noma* ». Il ressort de nos observations que ces surfaces nues sur glacis sont fortement dégradées.

L'impact de la dégradation se répercute sur les rendements des activités rurales en particulier l'agriculture et l'élevage en ce sens que l'aménagement et la réhabilitation de cet espace devienne une voie de sortie de crises. Ainsi, vu le niveau de la dégradation du paysage de l'aire « *ayi noma* », la tendance doit être inversée, ou atténuée afin de permettre la reconstitution de la fonctionnalité et de la productivité des sols afin d'éviter le risque que ces espaces dégradés ne soient abandonnés comme des nombreux domaines devenus incultes. Mais ces aménagements doivent être adaptés à la vocation des différentes unités pour qu'ils soient durables et profitables pour les paysans. Cependant avant toute intervention, il faut sensibiliser les paysans sur ses bienfaits car toute mesure

d'aménagement, de conservation et de protection des sols doit nécessairement passer par la sensibilisation et surtout l'implication de la population sous peine d'être vouées à l'échec (Bouzou Moussa 1994 cité par Souleymane Salaou, 2012). Dans le même ordre d'idées, Ousseini et Bender (2000) précisent que la clé de tout aménagement doit être le schéma directeur de protection et de mise en valeur conçu avec la population, bien compris et bien accepté par elle.

Comme l'a su bien souligner Mondain Monval (1993), l'aménagement doit passer par une caractérisation de la région, du terroir, ou du bassin versant. C'est pourquoi, les suggestions faites ici découlent des caractéristiques qui constituent d'indicateurs à prendre en compte et c'est de ça que va dépendre la réussite de toute intervention.

5.3.4.1. Aménagements sur les sommets de plateaux

Les aménagements sur les sommets de plateaux doivent tenir compte de leurs caractéristiques. Selon qu'il s'agit du faciès cuirassé ou du faciès sableux, les types d'interventions sont variables.

- Sur le faciès cuirassé des plateaux, les aménagements trouvés déjà sur place peuvent être préconisés. En effet, ils permettent une bonne rétention des eaux de ruissellement du plateau et favorisent la colonisation des surfaces aménagées par un tapis herbacé constituant une source de fourrage. En outre, d'autres types d'aménagement peuvent être préconisés. Ce sont les banquettes et les demi-lunes ou encore les tassas. Ce sont des ouvrages qui favorisent la rétention d'eau. Ces ouvrages à impluvium ont pour rôle de contrôler le ruissellement, d'améliorer la capacité d'infiltration et de réhabiliter les sols. Ils réalisables sur de pentes faibles où les ruissellements en nappe et diffus sont dominants. Ces ouvrages peuvent être accompagnés par des plantations qui en plus de la réduction de la vitesse des écoulements et ils favorisent la régénération du couvert végétal et servir pour le sylvo-pastoralisme. L'évaluation de l'impact de ces ouvrages sur la collecte et la productivité de l'eau est encore qualitative (Gunt Winchler et *al.*, 1995 cité par Guéro, 2000).
- Sur le faciès sableux du plateau il faut préconiser la végétalisation car le couvert végétal est sans aucun doute le facteur le plus puissant pour réduire le risque d'érosion

(Roose, 1998, cité Malam Abdou, 2005). En effet, le rôle d'une plante dans la maîtrise de l'érosion est multiple et est plus durable que celui d'un ouvrage mécanique. La plante peut servir d'obstacle pour le vent et réduire l'action éolienne ; à travers ses racines et les insectes fouisseurs qu'elle attire, elle peut augmenter la capacité d'infiltration ; par sa production de la matière organique, elle peut favoriser l'agrégation de la structure du sol et augmenter sa stabilité vis-à-vis de l'érosion. Le couvert végétal devient plus efficace quand il est diversifié. La bande enherbée d'*Andropogon gayanus* peut être efficace dans la diminution du ruissellement et de l'érosion. Nous avons vu ses effets sur le ruissellement et l'érosion à travers l'expérimentation sur les parcelles. La bande enherbée a permis de réduire respectivement le taux de ruissellement et d'érosion sur la croûte et le champ de mil.

5.3.4.2. Les aménagements sur les talus

Il faut envisager des ouvrages comme les tranchées de reboisement puisque c'est une unité à vocation sylvo-pastorale. Ces tranchées peuvent être accompagnées des micro-barrages filtrants en tête des entailles afin de retarder les écoulements. Ces ouvrages sont essentiellement conçus pour freiner le ruissellement afin de réduire les dégâts sur les glacis. Par ailleurs des diguettes filtrantes, de murets peuvent être envisagés.

5.3.4.3. Les aménagements sur les glacis

Sur les glacis érodés, les aménagements doivent passer par la stabilisation et la sédimentation des incisions à travers des techniques d'enrochement ou d'empierrement des rigoles et ravines. Les mesures biologiques permettent également une bonne stabilisation. Cependant, ces réalisations doivent être accompagnées par des techniques de CES (de tassas ou zaï) favorisant l'infiltration des eaux avant d'atteindre les incisions en aval. Les épis et les seuils peuvent aussi être efficaces pour dissiper et épandre les eaux dans les grands ravins.

L'induration est un problème majeur de sols au niveau de glacis notamment en amont. Et en aval des quantités importantes d'eau et d'énormes superficies sont perdues par ravinement. Dans ce contexte, la réalisation de cordons de pierre accompagnés de traitement biologique notamment la plantation d'arbres en amont ou associés à des bandes enherbées. Ce qui permettra en même temps de réduire le ruissellement et l'érosion éolienne.

Il faut associer à ces ouvrages mécaniques des techniques traditionnelles de gestion de la fertilité telles que : le paillage qui consiste à laisser sur place les résidus de culture. Cette technique joue un multiple rôle en piégeant les sédiments et en protégeant le sol contre l'effet splash qui favorise le glaçage mais aussi et sert plus tard de la matière organique. Le branchage qui favorise la sédimentation. Et enfin la jachère avec comme fonction principale la restauration de la fertilité des sols (Saâdou et *al.*, 1997). La jachère permet une évolution de la matière organique dont la minéralisation, favorisée par le travail de la terre, enrichit les sols en azote. Une jachère travaillée (dry farming) reste aussi favorable à un accroissement de l'humidité des sols; de plus, elle entraîne une destruction des adventices nuisibles aux cultures (Sebillote, 1991). Cependant cette technique est difficile à envisager compte tenu de la pression démographique dans la zone. Mais on peut pratiquer de la jachère améliorée qui consisterait à laisser une partie du champ par exemple une année sur deux. Les cordons ripicoles doivent être entretenus dans la mesure où la reconstitution du paysage passe par eux (Roose, 2012).

5.3.4.4. Les aménagements dans les bas-fonds

La dynamique dans les bas-fonds peut être contrôlée par des mesures biologiques mais aussi par des mesures mécaniques (diguettes en pierres) qui limiteront les dégâts d'inondation. Les diguettes sont envisageables pour le cas de « *Gorou izé* » sauf dans sa partie aval qui est dégradée. Cela permettra de mieux valoriser l'eau pour la riziculture et d'autres pratiques le long de ce kori. Ces aménagements doivent être conçus de telle sorte qu'ils ne limitent pas l'accès à l'eau au village situé en aval. En effet, la population s'approvisionne en eau tout au long de l'année à travers les eaux d'infiltration. Cependant, dans le secteur aval du « *Gorou izé* » et le kori Tyala, nous préconisons des actions

beaucoup plus appropriées. A l'image des seuils d'épandage qui sont des mesures « logiques » pour réhabiliter les bas-fonds dégradés sans perturber tout le système hydrique en équilibre relatif antérieur à la dégradation (Ousseini et Bender, 2000). Ces ouvrages facilitent la dissipation de la vitesse de crues, l'inondation de vastes superficies, la sédimentation, l'infiltration ainsi la recharge de la nappe. Des gabions pour la protection des berges afin de limiter l'élargissement des koris par sapement, et éboulement des berges. Mais aussi des épis doivent être alternés sur les berges dans le but de limiter l'érosion sur la berge concave étant donné que les écoulements sont sinueux.

Conclusion générale

Depuis quelques années, la problématique du changement d'usage des sols et de la dégradation des sols est devenue une question d'actualité. Au Sahel, des chercheurs se sont intéressés aux conséquences de ce changement sur la dynamique actuelle à l'échelle des bassins versants ou des terroirs. L'érosion hydrique, processus naturel accéléré par l'homme constitue la cause principale de la dégradation du potentiel de production. Dans ce contexte, la cartographie évolutive de l'occupation du sol et la connaissance des caractéristiques de formations superficielles semblent les facteurs clés pour la compréhension de la dynamique récente de l'aire « *ayi noma* ».

Les objectifs principaux de ce travail s'articulent autour de plusieurs points qu'il convient de rappeler ici. Dans un premier temps, le travail porte sur l'instabilité des versants du Goroubi basée sur la caractérisation et l'étude des processus sur les unités géodynamiques. Ensuite, sont étudiée estimer les apports en sédiments des différents états de surface ou d'occupation du sol et de tester les effets des techniques biologiques de la lutte antiérosive. Ce travail vise à cartographier les risques érosifs en appliquant le modèle de prévision de perte en terre RUSLE. Ce dernier objectif permet d'avoir une vue d'ensemble des problèmes et donc de localiser les secteurs nécessitant une intervention prioritaire (Morschel et Fox, 2004).

Ce travail se veut davantage une contribution à la compréhension de cette problématique du changement d'usage du sol et de la variabilité climatique sur la dynamique actuelle dans cette zone semi-aride.

La démarche générale adoptée dans ce travail a consisté à caractériser la dynamique actuelle, quantifier le ruissellement et l'érosion hydrique sur les états de surface plus représentatifs de l'aire « *ayi noma* », et de tester les effets de la pratique antiérosive biologique. En outre l'innovation dans ce travail réside dans la cartographie des risques érosifs. Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, nous sommes partis sur la base que la croissance et la pression démographiques d'une part et l'agressivité des pluies d'autre part sont les facteurs déterminants de la dynamique récente de l'aire « *ayi noma* ». Ainsi, les caractéristiques des formations superficielles et pluviométriques associés à la forte

croissance démographique font de notre zone d'étude un milieu favorable au phénomène de l'érosion hydrique et éolienne, donc à l'instabilité des versants.

Cette étude a permis de mettre en évidence les implications du changement d'usage des sols sur l'instabilité des versants dans l'aire « *ayi noma* ». Ainsi, la vulnérabilité au changement, qu'il soit d'origine climatique ou anthropique, est très grande et la menace de dégradation des terres et de l'ensablement du fleuve Niger, une réalité. L'instabilité des versants se manifeste par :

- une importante érosion aréolaire mettant en place des regs (vastes surfaces caillouteuses) sur les sommets des plateaux,
- une importante érosion linéaire qui se traduit par l'élargissement, le sapement des berges, et le recul de tête qui varie de 6 à 39 m /an en fonction des ravines,
- une importante incision avec des berges étroites et profondes en forme de "canyon" (profondeur moyenne 5-6 m),
- une intense érosion éolienne façonnant des vastes surfaces de déflation qui constituent des surfaces de ruissellement,
- un bilan sédimentaire déficitaire à la surface de cônes à l'exemple du kori Tyala
- une importante sédimentation en aval des réseaux hydrographiques contribuant à l'ensablement des bas-fonds (koris, goroubi, fleuve Niger...).

Les accumulations sableuses en aval sont d'autant plus importantes que les paysans parlent de « *crue de sables* ». Le fleuve Niger est sujet à d'importants problèmes d'ensablement provenant par ses innombrables affluents à l'échelle cette entité fortement anthropisée. Cela est démontré par l'analyse diachronique de l'occupation du sol a permis de comprendre la vitesse de dégradation des terres dans l'aire « *ayi noma* ».

Cette dynamique va de pair avec la croissance démographique qui depuis 1976 n'a cessé d'accroître. Cela augmente le risque de la dégradation à travers le défrichement de nouvelles parcelles ou la remise en culture des anciennes jachères et des zones fragiles. La dégradation continue des terres a atteint à certains endroits un état irréversible. Il serait hasardeux de semer sans pour autant introduire les engrais dans les semences au risque de ne rien récolter. Cela pousse les paysans à prendre l'engrais à crédit qu'ils doivent rembourser par le mil, ce qui augmente leur vulnérabilité.

L'étude du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles d'érosion a permis d'estimer les parts respectives de trois états de surfaces les plus représentatifs à l'échelle de l'aire « *ayi noma* » en terme de production de sédiments. Dans les champs cultivés, on enregistre des taux de ruissellement élevés (14,16 %) comparativement à ceux observés ailleurs notamment à Boubon et dans le Fakara où ils varient entre 2 et 5 % même si les taux d'érosion sont semblables. Sur les croûtes d'érosion, 55 % des précipitations ruissèlent. Cela occasionne des pertes en terre d'environ 19 t/ha/an légèrement supérieures aux pertes enregistrées dans le Fakara. Cependant, le coefficient de ruissellement maximum est plus élevé. La mise en place de la bande enherbée bien que semi-perméable a permis une réduction significative du ruissellement et des pertes en terre. Le nombre de pluies ayant ruisselé a baissé de près de 11% en moyenne sur la croûte d'érosion. Il serait intéressant de repiquer cette graminée sur les croûtes d'érosion afin de réduire la vitesse des écoulements sur les versants et par là diminuer le taux d'érosion sur les versants. La bande enherbée constitue donc un moyen de lutte antiérosive qui doit être vulgarisé et encouragé à l'échelle de l'aire « *ayi noma* ».

Cette étude met en évidence la gravité et l'intensité par laquelle se manifestent les problèmes de l'érosion de sols dans l'aire « *ayi noma* ». Elle a aussi permis de comprendre la gravité des phénomènes érosifs qui a été démontré à travers l'étude des processus sur les différentes unités topographiques.

De façon pratique, cette étude a fourni un outil d'aide à la décision pour la définition et la mise en place d'un plan d'aménagement et de conservation des eaux et des sols en matière de lutte contre l'érosion. La carte du risque érosif élaborée en croisant les différents facteurs de l'équation de perte en terre a permis de classer les zones à faible, moyen et fort risque d'érosion. Cette variation est dépendante du poids de facteurs interagissant. Le plus grand taux de pertes de sol dans l'aire « *ayi noma* » se localise sur les versants dénudés.

Sur un autre plan, elle montre la possibilité d'adapter les facteurs des différentes équations pour rendre possible leur application dans un environnement tout à fait différent de celui pour lequel elles ont été conçues (Lai Vinh, 2000).

Dans un contexte où les fortes pressions démographiques et de variabilité climatique sont des questions d'actualité pour la compréhension de la rapidité de la dégradation des sols et ses implications sur l'ensablement des bas-fonds, la carte du risque érosif représente un

outil, indispensable pour toute action de conservation et gestion des eaux et des sols dans l'aire « *ayi noma* ». Sur le plan cartographique, les investigations doivent être poussées afin de tenir compte des zones d'érosion et des zones de dépôts. En effet, même s'il est vrai que cette zone où les processus d'érosion sont actifs, il existe quand même de secteurs avec un bilan positif.

Le ruissellement et l'érosion doivent donc être étudiés sur les autres états de surface ou d'occupation du sol notamment la croûte structurale, la croûte biologique et la jachère. Cela permettra d'estimer la contribution en sédiments vers les fleuve Niger à l'échelle de cette zone fortement dégradée.

Sur le plan hydrologique réinstaller la station hydrométrique sur le Goroubi afin d'estimer les débits liquides et les apports sédimentaires de cet important réseau hydrographique.

Références bibliographiques

Abba B. (2007) : *Approche méthodologique pour la constitution d'une base de données pour la surveillance des systèmes hydrogéomorphologiques de l'aire pionnière « ayi noma » (observatoire de Tamou, Département de Say)*, mémoire de DEA de géographie, FLSH, Université Abdou Moumouni, Niamey, 72 p.

Abba. B (2005). *Genèse et morphodynamique des bas-fonds sahéliens, caractérisation des bas-fonds de Birnin Lokoyo, Doutchi, et Sormo*. Mémoire de maîtrise Géographie, UAM, 104 p.

Abdourhamane D. (1995). *Contribution à l'étude hydrologique du bassin versant du Goroubi à Diongoré*. Mémoire fin d'études, Agrhymet, Niamey, Niger, 109 p.

Abdourhamane Touré A. (2011). *Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : dynamique actuelle et récente en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques*. Thèse de Doctorat de L'Université de Bourgogne 224 p.

Aboubacar A. (2008) : *Evaluation du ruissellement et de l'érosion potentiels à Banizoumbou (Degré carré de Niamey)*, mémoire de maîtrise Géographie, UAM, 56 p.

Albergel, J., 1987. *Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso ; du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution*. Thèse Université Paris 6, Editions de l'Orstom, 330 p.

Albergel, J., Casenave A., Valentin C. (1986). *Modélisation du ruissellement en zone soudano Sahélienne simulation de pluie et cartographie des états de surface*. ORSTOM, Ouagadougou. Pp. 75–89.

Albrecht A., Brossard M., Chotte J.L. et Feller C. (1992). « Les Stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles) ». In *Cahiers ORSTOM, série Pédologique* 27.

Amadou B. (1991). *Contribution à l'étude et à l'aménagement des ressources du milieu naturel : Exemple de la colonisation des nouvelles terres et la dynamique des*

agrosystèmes le long du Goroubi au Niger. Thèse de doctorat géographie de l'aménagement. Université de Bordeaux III, Avril 1991, 279 p.

Amadou B. (1995). « Crise alimentaire et conquête agricole des nouvelles terres dans le Sud-Ouest du Niger », in *revue de géographie alpine : Au contact Sahara Sahel milieux et société du Niger*, numéro hors série vol. 2. Pp171-184.

Amani A., Nguetora M. (2000) « Evidence d'une modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Niamey ». In *Friend 2002 Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice* (H. Van Lannen and S. Demuth Sci. Eds.), Proc. Friend Conf., Cape Town, South Africa, 2002, IAHS Pub. n° 274. Pp. 449-456.

Ambouta, J.M.K., Valentin, C., Laverdiere, M.R., (1996). « Jachère et croûte d'érosion au Sahel ». In *Sécheresse* vol.7, Pp. 269–275.

Ambouta J.M.K. (1994). *Etude des facteurs de formation d'une croûte d'érosion et de ses relations avec les propriétés internes d'un sol sableux fin au Sahel*. Thèse Ph-D, Université Laval. 97 p.

Ambouta, J. M. K., Bouzou Moussa. I. Et Ousmane, S. D. (2000). « Réhabilitation de jachère dégradée par les techniques de paillage et de zaï au Sahel ». In *La Jachère en Afrique Tropicale – Roles, Aménagements, Alternatives*. Volume n°1, Actes du séminaire international Dakar-CEE-IRD-CORAF-JL-CTA-CRDI-CIR-UNESCO-CF. Pp. 751-759.

Amogu O. (2009). *La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger moyen*. Thèse de doctorat Université Joseph Fourier Grenoble 1, 425 p.

Amoukou A. I. (2009) : *un village nigérien face au changement climatique : stratégies d'adaptation au changement climatique dans une zone rurale du bassin du Niger*, GTZ, ABN, Niamey nouvelle imprimerie du Niger, 95 p.

Anglès d'Ortoli N., et Maurer C., (2000). « Evaluation et localisation des risques d'érosion en zone agricole dans une réserve (makiling forest) aux philippines » in *Bulletin réseau érosion n°21*. Pp. 357-370

Anonyme (2000). *Etude des écoulements des affluents de la rive droite du fleuve Niger. Direction des ressources en eau, Projet NER/98/001/01/NEX : "Appui au PNEDD", Niamey, Niger, 47 p.*

Anys H., Bonn F. et Merzouk A. (1993). « Cartographie et calcul de l'érosion hydrique à l'aide de la télédétection et d'un SIG : cas du bassin versant d'Oued Aricha (Settat, Maroc) », in *télédétection et cartographie*. Edition AUPELF-UREF. Les presses de l'Université du Québec. Pp. 141-150

Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R., (1998). « Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development », *Journal of the American Water Resources Association*, 1 : Pp. 73-89.

Asseline, J., De Noni G., Nouvelot J.F., Roose E. (1995). « Caractérisation de l'érodabilité d'une terre de moyenne montagne méditerranéenne (sud Aveyron-France) » in *Bulletin réseau érosion n°15*. Pp. 471-488.

Atari B. (1997). « Le schéma directeur d'approvisionnement en bois de la ville de Niamey », in *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*. John Libbey, Pp. 25-37.

Auzet, A.V. (1987). L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques, Min. Env., Min. Agri., CEREG URA 95 CNRS, 60 p.

Avenard J. M. (1995). « Dynamique érosive actuelle et actions humaines Dans le Préfif (Maroc) » ; in *Bulletin réseau érosion n°15*, pp. 394-407

Azontondé H. A. (1995). « L'impact de l'homme sur la dynamique érosive des sols ferrugineux du nord et centre Bénin et mesures conservatrices » in *Bulletin réseau érosion n° 15*, pp. 326.

Baechler A (1992). *Géomorphologie générale* : document de base- Tome II matériaux pour les cours et séminaires n° 27 UNIL, 150p.

Bantayan C.N., (1996). *Participatory decision support systems: the case of the Makiling Forest Reserve, Philippines*. Doctor of Philosophy Thesis, University of Melbourne. 156 p.

Barrow, C. J. (1991). *Land degradation: development and breakdown of terrestrial environments*, Cambridge University Press, 48 p.

Batti A. Depraetere C. (2007). *Panorama des méthodes d'analyse de l'érosion dans un contexte insulaire ; analyse méthodologique composante IA-projet IA4 gestion côtière intégrée*. CRISP/IRD Unité Espace 26 p.

Ben Cheikha L., Gueddari M. (2008). *Le bassin versant de Jannet (Tunisie) : évaluation des risques d'érosion hydrique*. Mappemonde 90 (2008.2) <http://mappemonde.mgm.fr/18/articles/art08202.html>, 15 p..

Ben Cheikha L., Gueddari M., Saadaoui M. (2008) Modélisation des écoulements de surface et du transport solide du bassin-versant Jannet (région de Maktar, Tunisie), in *Sécheresse* 2008 ; vol. 19 (3) : Pp.155-162.

Benabdeli K. (2000). Évaluation de l'impact des nouveaux modes d'élevage sur l'espace et l'environnement steppique : Commune de Ras-El-Ma (Sidi-Bel-Abbès, Algérie). *Options Méditerranéennes, CIHEAM, série A, n° 39 (Rupture... nouvelle image de l'élevage sur parcours)*, Pp. 129-141.

Bender H., Ousseini I. (2000). *Les bas-fonds au Niger. Transfert d'expériences Niamey*. PCGES 113 p.

Benoit M. (1998). *Statuts et usages du sol en périphérie du parc national du W ; tome 1 Contribution à l'étude du milieu naturel et des ressources végétales de canton de Tamou et du Parc du W*, Paris, ORSTOM, 32 p.

Benoit M. (1998). *Statuts et usages du sol en périphérie du parc national du W ; tome 2 Introduction à la genèse de l'espace sauvage dans la région du parc du Niger*, Paris, ORSTOM, 35 p.

Benoit M. (1998). *Statuts et usages du sol en périphérie du parc national du W ; tome 3 Introduction à l'étude des paysages du canton de Tamou (périphérie du parc national du W du Niger)* ORSTOM, Paris-Niamey 30 p.

Bénoît M. (1999). *Peuplement et genre de vie dans le Gourma oriental avant la création du Parc national du W du Niger*, Paris, Niamey, IRD, 96 p.

Bergaoui M., Camus H. et Nouvelot J. F. (1996). « Quantification du transport solide sur les micro-bassins versants de TEBABA (Tunisie centrale) » in *Bulletin réseau érosion n° 16*, Pp. 257-275

Beven K.J., (2004). « Infiltration excess at the Norton Hydrology Laboratory », in *Journal of Hydrology n° 293*, Pp. 219-234.

Bilgo A., Hien V., Serpantie G., Masse D., Fournier J., Zaonero P. (2002). « Rôles des jachères naturelles ou gérées dans les processus de ruissellement et d'érosion des sols en zone soudanienne (Burkina Faso) » in *Bulletin réseau érosion 2002*, Pp. 128.

Bonn F., (1998). « La spatialisaton des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites ». In *Sécheresse*, 9 (3). Pp.185-192.

Boubacar A. (2004). *Etude des impacts du projet gestion des ressources naturelles (PGRN) dans l'arrondissement de Say cas de deux villages de la communauté rurale de Djabou: Djabou et Fétoboga*. Mémoire de maîtrise géographie UAM, 86 p.

Bouzou Moussa I., Descroix L., Oumarou Faran Maïga O., Gautier E., Adamou Mahaman M., Esteves M., Souley Yéro K., Malam Abdou M., Mamadou I., Le Breton E. Abba B. (2011). Les changements d'usage des sols et leurs conséquences Hydrogéomorphologiques sur un bassin-versant endoréique sahélien» in *Sécheresse 22*, Pp. 13-24

Bouzou Moussa I., Faran Maïga O., Ambouta Karimou J.M., Sarr B., Descroix L. Adamou Mahaman M. (2009) « Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien» in *Sécheresse 20* (1). Pp. 145-152.

Bouzou Moussa I. (2000). « Dégénération des champs et reconstitution des jachères : le vent, facteur prépondérant (Bogodjotou, Niger) » in *la jachère en Afrique Tropicale ; Rôles, Aménagement, Alternatives vol. 1 Actes du séminaire international*, Dakar, 13-16 avril 1999. Paris, édition John Libbey Eurotext, Pp. 163-169.

Bouzou Moussa I., (1988), *L'érosion dans la vallée de Keita (Adar, Niger)*, thèse de Géographie, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph-Fourier Grenoble, 248 p.

Brabant P. (2008). *Activités humaines et dégradation des terres*, planète terre, géosciences au service de l'humanité, 365 p.

Calcagni G. (1982). « Aspects morphodynamiques des environs de Garaguso Lucanie (Italie méridionale) », in revue *de Géomorphologie dynamique* 13, n°3. Pp 81-90.

Carroué L., Claval P., Di Meo G., Miossec A., Renard J. P., Simon L., Veyret Y., Vigneau J. P. (2002). *Limites et discontinuité en géographie. Dossiers des Images Economiques du monde*, collection dirigée par Gamblin André, SEDES 159 p.

Casenave A. et Valentin C., (1989). *Les Etats de surfaces de la zone sahélienne : influence sur l'Infiltration*. ORSTOM, Paris, Collections didactiques 229 p.

Chevallier P., Planchon O. (1993) « Hydrological processes in a small humid savanna basin Ivory Coast », *Journée hydrologique vol. 151*. Pp 173-191.

Chevallier P. (1983). « L'indice des précipitations antérieures, Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs », in *Cahiers ORSTOM*, série hydrologiques, vol. 20, n°3-4. Pp. 179-189.

Chevalier P., (1982). Simulation de pluie sur deux petits bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi Haute Volta), in *Cahier ORSTOM*, Série hydrologique, XIX (4): n° spécial: Simulation de pluie sur bassins versants représentatifs.

Chevallier P. DE La Torre Y. Hebert A. et Kaufmant T. (2002). *Cartographie de l'aléa érosion des sols à la réunion, phase 2 : caractérisation et cartographie (1/100 000 à 1/50 000) de l'aléa érosion ; étude réalisée dans le cadre du projet de service public du BRGM 02 RIS 370*, 66 p. + annexes.

Chikhaoui M., Bonn F., Merzouk A., Lacaze B., Mejjati A. M. (2007). « Cartographie de la dégradation des sols à l'aide des approches du spectral angle mapper et des indices spectraux en utilisant des données aster » in *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4. Pp. 343-357.

Chinen T. (1999). « Recent accelerated gully erosion and its effects in dry Savanna, southwest of Niger » In, *Hunan Response to Drastic Change of Environments in Africa*. Edited by Obuyuki Hori; Tokyo

Coelho C.O.A., Ferreira A.J.D., Laouina A., Boulet A. K., Chaker M., Nafaa R., Naciri R., Regaya K., Hamza A., Carvalho T.M.M., et Keizer J.J. (2004). « Impact des changements d'utilisation des sols sur la production d'érosion et de ruissellement superficiel dans la région du Maghreb ». In *Revue des Sciences de l'Eau*. Vol 17/2. Pp. 163-180.

Conacher A, Sala M. (1998). *Land degradation in Mediterranean environments of the world: nature and extent, causes and solutions Chichester (Great Britain): John Wiley and Sons Ltd, 37 p.*

Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (2007). *Guide des négociations Canada*. Printed in Canada, 82 p.

D'Amato, N., Lebel, T. (1998). « On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability », in *International Journal of Climatology*, 18: Pp. 955-974.

Danish Hydraulic Institute (DHI) Water and environment (1999). *SEAGIS: soil erosion assessment using GIS*. Documentation and user guide SEAGIS Horsholm : DHI 48 p.

Delwaulle JC. (1973), « Résultats de six ans d'observation sur l'érosion au Niger ». In *Revue Bois et Forêts des Tropiques* n° 150.

« Démocratie 2000 » (2004). *Etude socio-foncière dans la zone « ayi noma » canton de Tamou, Département de Say*, rapport. 46 p.

Desautels M., Bonn F., Lavoie A., Prud'homme M. (inédit) *Cartographie des unités de paysage génératrices d'érosion et de pollution diffuse dans un bassin versant agro-forestier à l'aide de l'observation spatiale et du modèle SWAT : Bassin de la Tomifobia, Québec-Vermont*. Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500 boul. Université, Sherbrooke (Qc), Canada, J1K 2R.

Desconnets J.C. Galle S., Leduc C. et Peugeot C. (1996). « Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne: l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel ». In, *l'hydrologie tropicale; géoscience et outil pour le développement*. IAHS n°238; Paris. Pp. 125-137.

Desconnets J-C., (1994). *Typologie et Caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger-degré carré de Niamey)*. Thèse Université Montpellier II, 326 p.

Descroix L. (1994). *L'érosion actuelle dans la partie occidentale des alpes du sud*. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon II, 400 p.

Descroix L. et Diedhiou A. (2004). *Répartition spatiale des précipitations et conditions de surface en zone sahélienne*. Disponible sur le site : http://www.obs.ujf-grenoble.fr/ecole_doctorale/sujets/2004/lthe.htm.

Descroix, L., Mamadou, I., Malam.Abdou M., Abba B., Bouzou Moussa, I., Le Breton, E., (2009). « Etat des lieux et proposition de restauration des sols sur le bassin versant de Tondi Kiboro à titre expérimental ». *Colloque International de Port-au-Prince (Haïti)*, 19 - 24 octobre 2009, 8 p.

Desse M. (2002), « Pression anthropique et dégradation des littoraux haïtiens : l'exemple du golfe de la Gônave », *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 219 | Juillet-Septembre 2002, [En ligne], mis en ligne le 13 février 2008. URL : <http://com.revues.org/index1018.html> Consulté le 17 janvier 2012.

Diallo (2000). Erosion des sols en zone soudanienne du Mali transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitoko (haut Niger), thèse de doctorat, 202 p.

Dugue P. (1998). « Les graminées pérennes : des plantes utiles pour l'amélioration des aménagements antiérosifs en zone de savane » in *Bulletin réseau érosion n°18*. Pp. 260-268.

Elbouqdaoui K., Ezzine H., Badrahoui M., Rouchdi M., Zahraoui. Ozer A. (2005). « Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel

d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc) », in *Geo-Eco-Trop*. Pp. 26-36.

El Garouani A. et al. (2005). « analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif marocain » in *revue Télédétection*, 2005, Vol. 5, n° (1-2-3), Pp. 69-80.

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. (2008). « Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi au nord-est du Maroc », in *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 3, p. 193-201

Elhadj Moussa S. (2007). *Evaluation du ruissellement et de l'érosion potentiels à Wankama, degré carré de Niamey*, mémoire de maitrise, UAM. 61 p.

Faran Maïga O. (1984). *Contribution à l'étude géomorphologique du bassin de Goroubi de Tiantargou à Gueladio*, mémoire de maîtrise Géographie, Grenoble, 74p.

Faran Maïga O. (2000). *La dynamique actuelle dans le Zarmaganda : Recherche géomorphologique dans l'ouest du Niger*. Thèse de doctorat de 3e cycle de géographie physique. Université Cheik Anta Diop de Dakar, 365p.

Faran Maïga O. (2004). « *L'érosion éolienne dans le zarmaganda* », in *revue de Géographie Alpine n°1, De part et d'autre de Sahara*. Pp. 71-82.

FAO (1996). *Protéger et Produire*. Rome, 40 p.

Feller C. (1993). « La matière organique du sol, un indicateur potentiel de la durabilité des systèmes de culture dans les zones tropicales semi-arides et subhumides d'Afrique de l'ouest » in *actes de l'atelier SCOPE "Gestion durable des terres en zones semi-arides et subhumides de l'Afrique"*, tenu Dakar (Sénégal) du 15 au 19 Novembre 1993. Pp. 82-99.

Fiandino (2004). Apports de matières en suspension par les fleuves côtiers à l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône, France) : quantification des flux, identification des zones sources, étude des relations avec les conditions hydrologiques. In *revue Etudes de Géographie Physique. Supplément au N°XXXI-2004*. Travaux du BVRE du Mont-Lozère. UMR 6012 « Espace » du CNRS et de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis. 260 p.

- Fournier F. (1960). *Climat et érosion*, Presses Universitaires de France, Paris, 201 p.
- Fournier J. et Durand J. M. (2002). *Le diagnostic des bas-fonds soudano-sahéliens: Guide méthodologique et technique*. CEFOC. 277 p.
- Fox D. et Morschel J. (2004). « Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort ». *mappemonde* 76 (2004.4) <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.html>. 11 p.
- François T. (1970) « Les phénomènes de discontinuité en géographie par Roger Brunet » in *Annales de Géographie*, volume 79, Numéro 434. Pp. 492–494.
- Galle, S., Ehrmann, M., Peugeot, C., (1999). «Water balance in a banded vegetation pattern. A case study of tiger bush in western Niger ». In *Catena* 37. Pp. 197–216.
- Gavaud M. 1977). *Les grands de la pédogenèse au Niger méridional*. Travaux et documents de L'ORTOM n° 76, édition ORSTOM, Bondy 102 p.
- Georges Y. (2008). *Contribution à l'évaluation de l'érosion dans le bassin versant de la rivière Grise pour un meilleur plan d'aménagement*, mémoire de Master complémentaire en Gestion des risques naturels, 29 p.
- Golubev G.N., (1983). Economic activity, water resources and the environment: a challenge of hydrology. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques* 28, 1, 3.
- Goujon P. (1968). Conservation des sols en Afrique et à Madagascar : première partie, les facteurs de l'érosion et l'équation universelle de Wischmeier in *bois et forêts des tropiques*, n° 118, Mars- Avril 1968.
- Gorse J, (1985). « La désertification dans les zones sahélienne et soudanienne en Afrique de l'Ouest » ; *Unasyuva Revue internationale des forêts et des industries forestières* 37 (150) <http://www.fao.org>

Géuro Y. (2000). « *Fonctionnement hydrique des sols et productivité de l'eau dans les ouvrages CES-DRS* » In *innovation technologique et transfert dans les domaines de la gestion conservatoire des eaux et des sols*.

Greigert, J. & Pougnet J. (1967). *Essai de description des formations géologique de la république du Niger*, BRGM, Paris, 273 p.

Henensal P. (1986). *L'érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes*. Rapport de recherches Laboratoire Central des Ponts et Chaussées N° 138, 18p.

Heusch B., 1970. – *L'érosion hydraulique au Maroc : son calcul et son contrôle*. Rapport Direction-Eaux et Forêts du Maroc, 16 p.

Heusch B., (1970). « L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif Occidental ». In: *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, numéro spécial, études sur l'érosion, Rabat, 12, pp. 169-176.

Hiernaux, P., Le Houérou, H.N., (2006). « Les parcours du Sahel » in *Sécheresse 17* Vol. (1-2): Pp. 51-71.

Horton R.E., (1933). The role of infiltration in hydrological cycle. In *Trans. Amer. Geophys. Union*, 14, Pp. 446-460.

Hountondji Y. C., Ozer P. et Nicolas J. (2004). « *Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection a basse résolution au Niger* » in *Cybergeog : revue européenne de géographie*, n° 291, 10 novembre 2004.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation#Types_de_mod.C3.A9lisation, lue le 16/4/12 en ligne à 10:18

Hudson N., (1981). *Soil conservation*, Batsford Academic and Educational Ltd London 324 p.

Hulme, M. (1996). « Recent climatic change in the world's drylands » in *Geophysical Research Letters*, 23: Pp. 61-64.

INS (2007). Rapport national sur les progrès vers l'atteinte des OMD. Institut National de la Statistique. Niger 2007. 6 p.

Issoufou Mamane H. (2010). L'évolution morphodynamique actuelle du bassin versant de Gorouizé dans le terroir de Dyabou (commune rurale de Tamou), mémoire de maîtrise, Géographie UAM, 57 p.

Jabbar Mushtak T., et Xiaolin C. (2005). «Soil degradation risk prediction integrating RUSLE with Geo-information techniques, the case of northern Shaanxi province in China » in *American journal of applied sciences* (2), ISSN 1546-9239. Pp 550-556.

Joly F. (1997). Glossaire de géomorphologie. Base des données sémiologiques pour la cartographie. Paris, Armand Colin, 325 p.

Kalman, R. (1970). « Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie) ». in *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, tome 12, Rabat. Pp. 177-187

King D., Le Bissonais Y., (1992). « Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe ». In *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 78, n° 6. Pp. 91-105.

Kingumbi A. (2006). *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation : cas du Merguellil en Tunisie centrale*. Thèse de doctorat du Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement 218 p.

Kohler M.A. Linsey (1951). *Predicting the runoff from storm rainfall*. Weather bureau, US Dept of commerce. Res. Paper n° 34, washing.

Lahousse P. (1996). « L'instabilité actuelle des versants de la vallée de la Guisane (Hautes-Alpes, Briançonnais) », in *revue Géomorphologie : relief, processus, environnement*, volume 2, n°4. pp. 21-35.

Lai Vinh C., (2000). « Soil Erosion Study in Northwest Region of Vietnam by Integrating Watershed Analysis and Universal Soil Loss Equation (U.S.L.E) » in *Journal of Science, Nat. Sci.*, XI : Pp. 142-150.

Lamachere, J-M., (2000). « *Transports solides à l'exutoire d'un bassin sahélien (région de Bidi-Burkina Faso)* » In *Bulletin du Réseau Erosion n°20*, volume 2, IRD, GTZ, Montpellier. Pp. 112-126.

Lamachère, J. M. (1991). Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. Soil Water Balance in the Sudano Sahelian Zone (*Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991*). IAHS Publ. no. 199.

Lamb P.J. (1985). « Rainfall in sub-Saharan West Africa during 1941-1983 ». In *Zeitscherkunde und glazialgeologie 21*. Pp. 131-139.

Laouina A. (1995). « Démographie et dégradation des sols dans le Rif » in *Bulletin réseau érosion*. Pp. 69.

Laouina A., Adelghal M., Al Karkouri J., Chaker M., Machmachi I., Machouri N., Sfa M. (2010). « Utilisation des sols, ruissellement et de'gradation des terres : le cas du secteur Sehoul, région atlantique (Maroc) », in *Sécheresse vol. 21* (4). Pp. 309-316

Laouina A., Coelho C., Ritsema C., Chaker M., Nafaa R., Fenjiro I., Antari M., Ferreira A., Van Dijck S. (2004). « Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global, dans le bassin du Bouregreg (Maroc) ». In *sécheresse vol. 15* (1). Pp. 65-77.

Laouina A, Chaker M, Naciri R, Nafaa R. (1993). « L'érosion anthropique en pays méditerranéen, le cas du Maroc septentrional ». In *Bulletin Assoc Géog Fr*; 5. Pp. 384-398.

Le Barbé, L., Lebel, T., (1997). « Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990 », in *Journal of Hydrology*, 188–189: Pp. 43–73.

Lebel, T., Ali, B., (2009). « Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007) » *Journal of Hydrology*, 375: Pp. 52-64.

Lebel, T., Diedhiou, A., Laurent, H., (2003). « Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales ». *Journal of Geophysical Research*, 108 (D8), Pp. 1401–1411.

Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J, King D. (1998). *Cartographie de l'aléa "Erosion des sols" en France*. Collection Etudes et Travaux n° 18, institut français de l'environnement (Ifen). 77 p.

Leblanc M., Favreau G., Massuel S., Tweed S., Loireau M., Cappelaere B., (2007). « Land clearance and hydrology change in the Sahel » : SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61: Pp 135-150.

Le Breton E. (2012). *Réponses hydrologiques et géomorphologiques aux changements environnementaux au Sahel nigérien*. Thèse de doctorat d'Universités Abdou Moumouni et Paris I Panthéon Sorbonne, spécialité Géographie, 205 p. + annexes.

Le-Breton E. (2004), *Etude de l'érosion hydrique dans un bassin versant du Sahel. Typologie du bassin de Wankama et description des phénomènes érosifs, Degré carré de Niamey, Niger*. Mémoire de maîtrise géographique. Université Paris 8, 77 p.

Lecerf, (2008). *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne)*. Thèse de doctorat de l'université des Rennes 2, Université européenne de Bretagne discipline géographie, 326 p.

L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet, J.P., (2002). Analysis of a sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. In *Hydrological Sciences Journal*, 47 (4) : Pp. 563-572.

Leprun J. C. (1988). « Matière organique et conservation des sols. Exemples brésiliens », in *Cahiers ORSTOM*, série Pédologique 24 (4). Pp. 333-395.

Leroux M., (1983). *Le Climat de l'Afrique Tropicale* Editions H. Champion - M. Slatkine, Paris - Genève subventions de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), Paris tome 1 : (22 x 30 cm), 636 p., 649 figures, tome 2 : (31 x 46 cm), notice bilingue et Atlas de 250 cartes.

Loireau M. (1998). *Espaces-ressources-usages: spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*. Thèse de doctorat géographie, université Montpellier-III, Paul-Valéry, 411 p.

Loireau M., D'herbes J. M. (2000). «Espaces-ressources-usages : proposition méthodologique pour le suivi de la désertification dans le cadre du Réseau Roselt-Oss », in *gestion intégrée des ressources naturelles en zone inondable tropicale*, colloques et séminaires IRD, Paris. Pp. 903-916.

Loireau M., D'herbes J.M. (1997). « Des unités spatiales de référence pour l'étude de la dynamique des relations ressources-usages dans la zone agro-pastorale du Sahel nigérien », in *Régulations démographiques et Environnement*, eds L. Auclair, P. Gubry, M. Picouët & F. Sandron. VI^e Journées démographiques de, Paris, ORSTOM, CEPED, LPE : Pp 45-51.

Loireau M., D'herbes J.M., Delabre E. (2000). « Evolution et place de la jachère à travers une analyse spatiale des ressources-usages au Sahel agro-pastoral nigérien », in *la jachère en Afrique Tropicale; Rôles, Aménagement, Alternatives vol. 1*. Actes du séminaire international, Dakar, 13-16 avril 1999. Paris, édition John Libbey Eurotext. Pp. 32-42.

Lozet J. Mathieu C., (1990). *Dictionnaire de Science du sol*. 2^{ème} édition Lavoisier. Technique et documentation, Paris, 384 p.

Macaire J.J., Campy M. (1989) - *Géologie des formations superficielles : Dynamique, faciès, utilisation*. Paris, Masson ; 433 p.

Mahé G. et Paturel J. E., (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers in *C. R. Geoscience 341* Published by Elsevier Masson SAS. Pp . 538-546

Mahé G. (2002). «Impacts and Vulnerability of the Water/Wetland Resources to Climate Change» In : *Climate Change, Water and Wetlands in West Africa: Building linkages for their Integrated Management*, (Oyebande L., Amani A., Mahé G., Niang-Diop I., Contributors), IUCN-BRAO Working Paper, 9 p.

Malam Abdou M. (2007). *Approche méthodologique pour la constitution d'une base de données pour la surveillance des systèmes hydrogéomorphologiques du bassin de Kori Dantiandou (Degré carré de Niamey)*, mémoire de DEA de géographie, FLSH, UAM, Niamey, 115 p.

Malam Abdou. M. (2005). *Genèse et morphodynamique actuelle des bas fonds sahéliens étude comparative de quelque bas fonds ruraux de socle et du bassin sédimentaire dans l'ouest Nigérien*, mémoire de maîtrise de Géographie UAM, 141 p.

Mamadou I. (2012). *La dynamique accélérée des koris de la région de Niamey et ses conséquences sur l'ensablement du fleuve Niger*. Thèse de doctorat Ph. D, spécialité Géographie physique, UAM et Université Paris I, 303 p.

Mamadou, I., Gautier, E., Descroix, L., Bouzou Moussa I., Le Breton. E., Brunstein, D., Faran Maïga, O. (2009). *Dynamique accélérée des koris et ensablement du fleuve Niger : région de Niamey (Niger)*. Poster, Forum des doctorants Ecole doctorale de Géographie de Paris, Institut de géographie, Université Paris 1, Paris.

Mamadou I. (2006). *Erosion et ensablement dans les koris du Fakara* mémoire pour l'obtention d'un DEA en géographie, Département de Géographie, FLSH, UAM, 116 p.

Manrique L. A. (1988). *Land Erodibility Assessment Methodology-EAM, Using Soil Survey Data, Based on Soil Taxonomy*. University of Hawaii, Editorial & Publication Shop, Honolulu, 28 p.

Maschens E. (1973). *Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la république du Niger*. Mémoires du B.R.G.M. n°82, 170 p.

Mathieu C. et Lhomme A. (2002). « Implantation et efficacité des bandes enherbées en midi-pyrénées (France) » in *Bulletin réseau érosion* 2002 Pp. 125.

Meterfi B., Letreuch-Belarouci N. et Benabdeli K. (2011) « Incidence de la fluctuation des précipitations sur l'occupation des sols dans les hautes plaines de Sidi-Bel-Abbès (Algérie) », in *Physio-Géo (En ligne)*, Volume 5, mis en ligne le 26 septembre 2011,

Consulté le 15 décembre 2011. URL : <http://physio-geo.revues.org/2059> ; Doi : 10.4000 / physio-geo.2059.

Mietton M. (1980). *La morphodynamique actuelle dans la région de Po-Tiebele, recherches géomorphologiques*. Thèse de doctorat de 3ème cycle université de Grenoble1 UER de Géographie 235 p.

Ministère de l'économie et des finances (2010). *Annuaire statistique des cinquante ans d'indépendance du Niger* ; institut national de la statistique édition spéciale République du Niger ; 338 p.

Ministère de l'économie et des finances (2006). *Répertoire national des communes (RENACOM)*, institut national de la statistique, Niamey, République du Niger ; 526 p.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte Contre la Désertification (2001). *Nomenclature pour la construction de bases de données sur l'occupation des sols au Niger au Sud du 16^{ème} parallèle*, version finale 69 p.

Mondain Monval J. F. (1993). *Diagnostic rapide pour le développement agricole*. Coopération Française, ACCT, GRET, IRAM. Coll. Le point sur les technologies, 128 p.

Morel A., (1980). « Climat » in *Atlas du Niger*. Les Atlas Jeune Afrique Paris, édition Jeune Afrique, pp. 14-17.

Morel, R. (1998). « Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest » in *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*. eds. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, Pp. 200-211.

Morgan R.P.C., (1979). *Soil erosion*, Longman, London, 113 p

Morsli B., Mazour M., Mededjel N., Hamoudi A., Roose E (2004). « Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie » In sécheresse 2004 vol. 15 (1) pp. 96-104.

Mounirou A. L. (à paraître). *Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le Bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso* :

Quantification et transposition des données. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II et 2iE. 245 p.

Mounkaïla H. (2005). « Migration de la colonisation agricole et dynamique du peuplement dans les communes rurales de Say et de Tamou (ouest nigérien) » in *Vivre en milieux fragiles : Alpes et Sahel, hommage au professeur Jorg Winistorfer*. Pp. 149-164.

Mounkaïla H. (2004). « Migration, chefferie et accès aux ressources foncières dans le canton de Torodi (Ouest du Niger) » in *Les Cahiers d'Outre-Mer* Avril-Septembre 2004. 15 p.

Mounkaïla H. (1999). *Migrations environnement et santé au Niger : dynamique récente des Migrations Songhai-Zarma dans le département de Tillabéri (Ouest du Niger)*. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Bordeaux-III. Discipline géographie tropicale, 439 p + annexes.

Moussa Mahamadou S. (2005). Morphodynamique actuelle des bas-fonds sahéliens: caractérisation du bas-fond Goubé. Mémoire de maîtrise; département de géographie, FLSH, UAM, 80 p.

Moussa Noma I. (2010). *Mesure du ruissellement et de l'érosion potentiels sur le bassin versant de Boubon*. Mémoire de maîtrise géographie, UAM, 82 p.

Musy A. (1998). *Hydrologie appliquée*, Edition *H*G*A*, Bucarest, 368 p.

Neboit R., (1982) *L'Homme et l'érosion dans le monde*. Faculté des lettres et Sciences Humaines de l'Université de Clermont Ferrand II, Nouvelle série, Fascicule 17, 179 p.

Neboit R., (1991). L'homme et l'érosion dans le monde. Fac n° 34. Lettres et Sciences Humaines, Univ. Clermont-Ferrand, France, 2^{ème} édition: 269 p.

Nicholson, S.E., (2001). « Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries », in *Climate Research*, 17 (2), Pp. 123-144.

Nicholson, S.E., (1980). The nature of rainfall fluctuations in *subtropical West-Africa*. *Monthly Weather Review*, 109: Pp. 2191–2208.

Nouvelot J. F. (1993). *Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique Tropicale et Equatoriale*, Paris, Orstom, 570 p.

Perez P. et Sene M. (1995). Evolution des structures agraires et érosion dans le sud-Saloum (Sénégal). » In *Bulletin réseau érosion n°15*. Pp. 60-68

Peugeot (1995). *Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger), Expérimentation in situ et modélisation*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, 356 p.

Pias J. (1978). *Etude pédologique du plateau de Dyabou (Say)*, ORSTOM, Ministère du plan, 43 p.

Planchon O., Valentin C. (1999). « Croissance démographique et dégradation des sols en Afrique de l'Ouest », in *Bulletin réseau érosion* 19, Pp. 157.

PNUE / CCD, (1995) *Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique*, 71 p.

Poesen J.W.A. Bryan R.B. (1990). « Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation » in *Cahier ORSTOM*. Série pédologique vol. XXV, n ° 1-2. Pp 71-80

Poirel A. (2007). « Un an de mesure des flux de Matières En Suspension (MES) et de Carbone sur une rivière alpine : l'Isère », in *Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains*, Lyon, 28-29 novembre 2007.

Projet prospection minière da le Liptako (1998). *Notice explicative des cartes géologiques du Liptako à 1/100 000 et 1/200 000, république du Niger*. Ministère des mines et de l'énergie 59 p.

Raynaut C., 2001. « Societies and nature » in the *Sahel: ecological diversity and social dynamics*. Global Environmental Change, 11. Pp.9-18.

Renard K. G., Freimund J. R. (1994). « Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE ». In *Journal of hydrology* 157. Pp. 287-306.

Rey F. et al. (2004) « Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface », in *C. R. Géoscience* 336. Pp. 991-998.

Ringrose, S., Matheson, W., (1992). «The use of Landsat MSS imagery to determine the aerial extent of woody vegetation cover change in the west-central Sahel», in *Global Ecology and Biogeography Letters*, 2. Pp. 16–25.

Roose E. (communication) *La restauration des sols dans le monde et en Afrique tropicale*.

Roose E. (2004). « La gestion conservatoire de l'eau, et de la fertilité des sols : une stratégie nouvelle de la lutte antiérosive pour le développement durable » in *Sécheresse* n°1, vol. 15. pp.5-7.

Roose et al. (1999). « Ravinement en Algérie, Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation », in *bulletin réseau érosion n° 19 : vol. 1 à l'échelle du versant*. Pp. 122-141.

Roose E. et al. (1998). « L'érosion : 40 ans de recherche pluridisciplinaire » In *Spécial érosion* n° 56. ORSTOM.

Roose, E. (1996): *Land husbandry - Components and strategy*. Soils Bulletin FAO 70: Rome. www.fao.org/docrep/T1765E/T1765E00.htm lu le 14/05/2012.

Roose (1999). *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols*. Bulletin pédologique de la FAO, n° 70, 420 p.

Roose E (1987). Evolution des stratégies de lutte antiérosive. Nouvelle démarche : les G.C.E.S. Communication au Séminaire « Bilan de l'efficacité des techniques antiérosives » ; INRF, Médéa Algérie du 15 au 17 Novembre 1987. Pp. 91-96

Roose E. (1981). *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale : étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de*

matières sous végétations naturelles ou cultivées. Paris ORSTOM, travaux et documents n° 130. 569 p.

Roose E. (1979). *Pédogenèse actuelle du plateau Mossi (Haute Volta) Gonse, campagne 1968-1974* ORSTOM d'Adiopodoumé, 54 p.

Roose E. (1977). *Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest, vingt ans de mesures en petites parcelles expérimentales*. Travaux et documents de l'Orstom n° 78. ORSTOM Paris, 108 p.

Roose E. (1971). *Projet de lutte contre l'érosion hydrique sur le plateau Mossi (Haute Volta)*, ORSTOM, centre d'Adiopodoumé, 22 p.

Roose E. et Bertrand R. (1971). « Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest : résultats expérimentaux et observations sur le terrain » in *Agronomie tropicale* ; Vol. XXVI, n° 11, Pp. 1270-1283.

Rosnay De J. (1977). *Le macroscopie, vers une vision globale*, Paris, édition du seuil, collection points, 305 p.

Saâdou M., Garba M., et Bouzou Moussa I. (1997). « Contribution à l'étude de la jachère dans l'ouest nigérien » in *Actes du colloque SPP/E* tenu à Niamey (Niger), 1997 Pp. 87-97.

Sadiki A., Bouhlassa S., Auajjar J., Faleh A. et Macaire J. J. (2004). « Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab », In *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 2004, n° 26. Pp. 69-79.

Saidou B. (2006). *Pratiques d'exploitation de ressources pastorales dans la périphérie du parc national du W du Niger: cas des éleveurs de Gosso dans la réserve totale de faune de Tamou*. Mémoire de maîtrise géographie Faculté des Lettres Sciences Humaines, 112 p + annexes.

Sarr M. A., (2009). « Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat », *Cybergeog* : European

Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 472, mis en ligne le 07 octobre 2009. URL : <http://cybergeog.revues.org/index22707.html>.

Schenher A. (1973). « Résultats de six ans d'observations sur l'érosion au Niger ». In *Revue Bois et Forêts des Tropiques* n°150, Pp. 15-37.

Sebillotte M. (1991). « La jachère, Cléments pour une théorie ». In *dynamiques des systèmes agraires*, Editions, ORSTOM. Série, colloques et séminaires. 175-229.

Seguis L., et al., (2003). *Influence de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin sahélien*, U. M. R. Hydrosociences, IRD, France, 11 p.

(SRICAC, 2003). *Collectivités locales et agriculteurs : ensemble pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols une approche globale du bassin versant avec tous les acteurs du territoire pour optimiser les moyens de lutte*. Plaquette érosion, 6 p..

Sidikou A. H. (1977) : « la stratégie adaptative et ses limites des Zarma du Zarmaganda (République du Niger) face à la sécheresse actuelle (1965-1976) » In *élevage et contacts entre pasteurs et agriculteurs, stratégies pastorales et agricoles des sahéliens durant la sécheresse 1969-1974*. Pp. 141-167.

Sidikou A.H., (1991) : « Une région sahélienne en crise : le Zarmaganda (République du Niger) ». In *Sahel, Nordeste, Amazonie. Politiques d'aménagement en milieux fragiles*. Paris, UNESCO l'Harmattan. Pp. 51-87.

Souley K. (2010). *Analyse des flux migratoires et leur impact sur les communautés locales à périphérie de la réserve de biosphère du W du Niger*, thèse de doctorat, Département de Géographie, université Abdou Moumouni, 431 p.

Souley K. (2004) : *Etat des lieux quantitatif et spatialisé de la transhumance dans la zone d'influence du parc W du Niger (Say, Kollo, Boboye)*. Mémoire de maîtrise géographique Faculté des Lettres Sciences Humaines, 113 p. + annexes.

Souleymane Salaou M. (2011). *Etude de l'érosion sur un petit bassin versant anthropisé : le bassin du Kori Tyala dans l'aire « ayi noma »*. Mémoire de maîtrise géographie Faculté des Lettres Sciences Humaines, 74 p.

Taous A. et al. (2004). « Impacts des cônes latéraux sur le fonctionnement hydrodynamique et morphosédimentaire actuel des fonds de vallées préifaines : cas de l'oued Larbâa (Maroc) ». In *De part et d'autre de Sahara*, revue de Géographie Alpine 2004 n° 1. Pp. 15-28.

Tidjani A. D. (2008). *Erosion éolienne dans le Damagaram Est (Sud-Est du Niger) : paramétrisation, quantification et moyens de lutte*. Thèse de doctorat s sciences. Université catholique de Louvain I, 171p.

Touaïbia B., Gomer D., Kidaoui A. (2000). « Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro-bassins expérimentaux de l'oued mina en Algérie du nord ». In *bulletin réseau érosion 2000*. Pp. 478-484.

Tavares-Filho J. Tessier D. (1998). *Influence des pratiques culturelles sur le comportement et les propriétés de sols du Paraná (Brésil)*. Étude et Gestion des Sols, 5, 1. Pp. 61-71.

Tribak A. (2002). « Stratégies et techniques de lutte antiérosive dans les montagnes du préif oriental (Maroc) » in *bulletin réseau érosion n° 21*. Pp. 45-55.

Tricart J., (1978). *Géomorphologie applicable*. Collection de géographie applicable, Masson, 1978, 204 p.

Tsayem Demaze M. (1995). « Milieu physique et humain et dégradation des sols en pays Bamiléké de l'Ouest Cameroun », in *bulletin érosion n° 15*. Pp. 329-339.

Ulysse B. (2008). *Contribution à l'élaboration d'un plan d'aménagement du Bassin Versant de la Coupe à l'Inde (4^{ème}, 3^{ème} section communale de Dessalines)*. Mémoire de Fin d'études agronomiques, Université d'État d'Haïti. 56 p + annexes.

UNEP (2007) GEO-4: Global environmental outlook. Environment for development. United Nations Environ. Programme, Nairobi. Zhu, A. X. (2000) Mapping soil landscape as

spatial continua: The neural network approach. In *Water resources research*, vol. 36, Pp. 663-677.

USDA/ARS (2008). User's reference guide. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2). <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=6028>. 431 p..

Valentin, C., Rajot, J.L., Mitja, D., 2004. « Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the subhumid and semi-arid regions of West Africa ». In *Agriculture. Ecosystems and Environment* n° 104: Pp.287–302.

Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63. Pp. 132–153.

Vetaas, O.R., 1993. Spatial and temporal vegetation changes along a moisture gradient in northeastern Sudan. *Biotropica*, 25 (2): 164–175.

Vezina K., St-Onge L., Bonn F., Pham V. C. (à paraître). *Caractérisation environnementale et évaluation des risques de ruissellement et d'érosion pluviale associés aux unités géo-agro écologiques du paysage : cas d'un bassin versant au nord-est du Viêt-Nam*.

Vuillaume G. (1969). Analyse quantitative du rôle du milieu- physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue des bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Bassin de Kountkouzout, Niger). In *cahiers ORSTOM, sér. Hydrol. n° 4*, Pp. 87-132.

Vuillaume G. (1968). « Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne » In *cahiers ORSTOM, sér. Hydrol. n° 4*. Pp33-56.

Wafo Tabopda G. et Huynh H. (2009). « *Caractérisation et suivi du recul des ligneux dans les aires protégées du Nord Cameroun : analyse par télédétection spatiale dans la réserve forestière de Kalfou* » ; Journées d'animation scientifique de l'AUF, Alger, novembre 2009, 7 p.

Wall G.J., Coote D.R., Pringle E.A. et Shelton I.J. (2002). *RUSLE-CAN Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada ; Manuel pour l'évaluation des pertes de sol causées par l'érosion hydrique au Canada*. Direction

générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, No de la contribution AAC2244F, 117 p.

Wotling G., (2000). *Caractérisation et modélisation de l'aléa hydrologique à Tahiti*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, France, 309 p + annexes.

Wischmeier, W.H., et Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses-a guide for conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, Washington, D.C. 1-537.

Xanthoulis D., Debauche O., et Fonder N. (inédit). *Le ruissellement et l'érosion en grandes Cultures. Projet Life swap-CPP ; protection des eaux de surface contre les transferts diffus de produits phytosanitaires*. Gembloux faculté des sciences agronomiques. 10 p..

Yassin M., El Bahi S., Renard K. et El Wartiti M. (1998). « Application du modèle de perte en terre révisée 'RUSLE' aux terrains forestiers du plateau central du Maroc ». in *Bulletin réseau érosion* n° 18. Pp. 196-204.

Zahar Y., Laborde J-P (1998). « Génération stochastique d'averses et de leurs index d'érosivité pour la simulation de la dynamique érosive en Tunisie centrale ». *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46 (2) avril.

Zougmore R., Ouattara K., Mando A., Ouattara (2004). « Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso », in *sécheresse* 2004 vol. 15 (1). Pp. 41-48.

<http://www.bf.refer.org/toure/p.web/erohydri.htm>.